



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



## Grado en Ingeniería Mecánica

*TRABAJO FIN DE GRADO*

---

DESARROLLO E IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA  
OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE MOLDES DE INYECCIÓN EN LA  
INDUSTRIA DEL PLÁSTICO BASADO EN PROGRAMAS DE AYUDA A  
LA INGENIERÍA

---

Autor: Sandra Coy Márquez

*Valencia, Septiembre de 2018*

Tutor: Joaquín Lluch Cerezo



## RESUMEN

Actualmente, en la Comunidad Valenciana, multitud de pequeñas empresas dedicadas al sector del diseño y fabricación de moldes para la inyección de plástico continúan desarrollando sus proyectos de manera tradicional; es decir, sin ayuda de las nuevas tecnologías como pueden ser los programas de asistencia a la ingeniería (CAE). Esto supone la problemática de no optimizar al máximo los procesos de fabricación, lo que repercute en los beneficios de las entidades.

Con este proyecto, tratamos de paliar la carencia diseñando e implementado un sistema que complementará y optimizará su actual forma de trabajo. Determinaremos unas pautas que se deberán seguir a la hora del diseño del molde basadas en programas CAE específicos del sector. Posteriormente, aplicaremos el estudio realizado a un caso concreto, a modo de ejemplo, para demostrar la eficacia del sistema propuesto.

## PALABRAS CLAVE

Optimización

Molde

Inyección de plástico

CAE

## RESUM

Actualment, a la Comunitat Valenciana, moltes petites empreses dedicades al sector del disseny i fabricació de motles per a la injecció de plàstic continuen desenvolupant els seus projectes de forma tradicional; és a dir, sense l'ajuda de les noves tecnologies com poden ser els programes d'assistència a l'enginyeria (CAE). Açò suposa la problemàtica de no optimitzar al màxim els processos de fabricació, cosa que repercuteix en els beneficis de les entitats.

Amb aquest projecte, tractem de pal·liar la carència dissenyant i implementant un sistema que complementarà i optimitzarà la seua forma de treball actual. Determinarem unes pautes per seguir a l'hora del disseny del motle basades en programes CAE específics del sector. Posteriorment, aplicarem l'estudi realitzat a un cas concret, a tall d'exemple, per a demostrar l'eficàcia del sistema proposat.

## PARAULES CLAU

Optimització

Motle

Injecció de plàstic

CAE

## ABSTRACT

Nowadays, in the Comunidad Valenciana, many small business dedicated to the design and manufacturing of molds for plastic injection, still develop their projects in a traditional way; that is, without the use of new technologies such as the Computer Aided Engineering programs. Due to this way of working, the companies do not optimize to the maximum the process of manufacturing, impacting straight on the benefits.

The objective of this project is to solve the lack by designing and implementing a system that will complement and optimize the current way of working. We will determine some guidelines to follow when designing a mold, based on CAE specific programs. Subsequently, we will apply the study carried out to a specific case, as an example, to prove the effectiveness of the proposed system.

## KEYWORDS

Optimizing

Mold

Plastic injection

CAE



## CONTENIDO

<b>MEMORIA TÉCNICA</b> .....	14
1. OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN .....	15
1.1. OBJETIVO .....	15
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	15
1.2.1. ACADÉMICA .....	15
1.2.2. INTERÉS TECNOLÓGICO .....	15
1.2.3. EMPRESA MOLDES 2010 SL .....	16
2. ALCANCE .....	17
2.1. ÁMBITO DE APLICACIÓN .....	17
2.2. LÍNEAS GENERALES .....	17
3. ANTECEDENTES .....	18
3.1. HISTORIA DE LA EMPRESA .....	18
3.2. DISEÑO DE MOLDES .....	19
4. HERRAMIENTAS CAE .....	20
4.1. ELECCIÓN DE SOFTWARE .....	20
4.2. MOLDEX3D .....	20
4.2.1. MOLDEX3D DESIGNER .....	21
4.2.2. MOLDEX3D PROJECT .....	21
4.2.3. MOLDEX3D VIWER .....	22
5. ESTUDIO E IMPLANTACIÓN .....	24
5.1. DATOS INICIALES .....	24
5.2. V01 – INICIO .....	26
5.3. V02 MODIFICACIÓN SISTEMA COLADA CALIENTE .....	61
5.3.1. V02.2 – VARIACIÓN SECCIÓN .....	75
5.4. V03 – REFRIGERACIÓN .....	80
6. CONCLUSIONES Y ACTUACIONES FUTURAS .....	89
7. BIBLIOGRAFÍA .....	90
<b>PLIEGO DE CONDICIONES</b> .....	92
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....	93
2. CONDICIONES TÉCNICAS .....	93
2.1. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA .....	93
2.2. ESPECIFICACIONES DE HARDWARE .....	93
<b>PRESUPUESTO</b> .....	96
1. PRESUPUESTO PROYECTO .....	97
2. PRESUPUESTO IMPLANTACIÓN .....	97



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1.1 DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO DE DISEÑO PROPUESTO .....	16
FIG. 3.1 DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO DE DISEÑO ACTUAL .....	19
FIG. 4.1 INTERFAZ DEL USUARIO MOLDEX3D DESIGNER .....	21
FIG. 4.2 INTERFAZ DEL USUARIO MOLDEX3D PROJECT .....	22
FIG. 4.3 CÓMO EXPORTAR A ARCHIVO .RSV .....	22
FIG. 4.4 ESPECIFICACIONES DE EXPORTACIÓN A .RSV .....	23
FIG. 4.5 INTERFAZ DEL USUARIO MOLDEX3D VIWER.....	23
FIG. 5.1 DISPOSICIÓN DE CAVIDADES EN POSTIZOS, VISTA ISOMÉTRICA.....	25
FIG. 5.2 DISPOSICIÓN DE CAVIDADES EN POSTIZOS, VISTA EN PLANTA.....	25
FIG. 5.3 PIEZA EN PROYECTO MODELO, 1 .....	25
FIG. 5.4 PIEZA EN PROYECTO MODELO, 2 (IZQUIERDA).....	26
FIG. 5.5 PIEZA EN PROYECTO MODELO, 3 (DERECHA) .....	26
FIG. 5.6 INTERFAZ DEL USUARIO MOLDEX3D DESIGNER .....	26
FIG. 5.7 IMPORTAR PIEZA A MOLDEX3D DESIGNER.....	27
FIG. 5.8 CONJUNTO DE CAVIDADES IMPORTADAS .....	27
FIG. 5.9 AGREGACIÓN ENTRADA MATERIAL .....	28
FIG. 5.10 ENTRADA DE MATERIAL AGREGADA .....	29
FIG. 5.11 EN CANAL DE ALIMENTACIÓN: BOCETO > “LÍNEA” .....	29
FIG. 5.12 EDITANDO ATRIBUTO COLADA CALIENTE.....	30
FIG. 5.13 EDITANDO SECCIÓN TRANSVERSAL COLADA CALIENTE .....	30
FIG. 5.14 EDITANDO DIÁMETRO CANAL COLADA CALIENTE.....	31
FIG. 5.15 DISEÑO SISTEMA DE COLADA CALIENTE TERMINADO .....	31
FIG. 5.16 EN ENTRADA DE FUNDIDO, “ASISTENTE” DE ENTRADA FUNDIDO.....	32
FIG. 5.17 PUNTO DE ENTRADA DE FUNDIDO INTRODUCIDO.....	32
FIG. 5.18 INTERFAZ DEL PASO 4 .....	33
FIG. 5.19 EN PASO 4, “MODIFICAR LA SIEMBRA DE NODOS” .....	34
FIG. 5.20 TAMAÑO DE MALLA POR DEFECTO .....	34
FIG. 5.21 TAMAÑO DE MALLA MODIFICADO .....	35
FIG. 5.22 AJUSTAR POSICIÓN DE NODOS: SELECCIONAR BORDE .....	35
FIG. 5.23 AJUSTAR POSICIÓN DE NODOS: BORDE SELECCIONADO .....	36
FIG. 5.24 AJUSTAR POSICIÓN DE NODOS: NÚMERO DE SEGMENTOS MODIFICADO .....	36
FIG. 5.25 EN PASO 4, “ESPECIFICAR PARÁMETROS DE MALLA” .....	37
FIG. 5.26 PARÁMETROS DE MALLA MODIFICADOS.....	37
FIG. 5.27 EN PASO 4, “GENERAR” > SELECCIÓN DE ELEMENTO A MALLAR.....	38
FIG. 5.28 EN PASO 4, “GENERAR” > SELECCIÓN DE ELEMENTO A MALLAR.....	38
FIG. 5.29 FALLO EN MALLADO.....	39
FIG. 5.30 INTERFAZ DE “ARREGLAR/MEJORAR MALLA SUPERFICIAL” .....	39
FIG. 5.31 BORDE LIBRE .....	40
FIG. 5.32 EN REPARACIÓN DE BORDE LIBRE > “LLENAR ORIFICIO” > SELECCIÓN DEL BORDE LIBRE.....	40
FIG. 5.33 MALLADO DE UNA REGIÓN CON “RELLENAR ORIFICIO” .....	41
FIG. 5.34 EN MEJORA DE LA CALIDAD > “DIVIDIR”> SELECCIÓN DE SUPERFICIE A DIVIDIR.....	41
FIG. 5.35 EN MEJORA DE LA CALIDAD > “DIVIDIR” > SELECCIÓN DEL BODE A DIVIDIR .....	42
FIG. 5.36 SISTEMA TOTALMENTE MALLADO.....	42
FIG. 5.37 EN PASO 5, “GUARDAR LA MALLA COMO” .....	43



FIG. 5.38 INICIO DE NUEVO PROYECTO EN MOLDEX3D PROJECT.....	44
FIG. 5.39 CREAR NUEVA EJECUCIÓN > VENTANA DE “OPCIÓN” .....	45
FIG. 5.40 CREAR NUEVA EJECUCIÓN > VENTANA DE “MALLA” .....	45
FIG. 5.41 CREAR NUEVA EJECUCIÓN > SELECCIÓN DE LA MALLA .....	46
FIG. 5.42 CREAR NUEVA EJECUCIÓN > MALLA SELECCIONADA .....	46
FIG. 5.43 CREAR NUEVA EJECUCIÓN > VENTANA DE “MATERIAL” > SELECCIÓN DE MATERIAL EN BIBLIOTECA.....	47
FIG. 5.44 CREAR NUEVA EJECUCIÓN > VENTANA DE “PROCESO” > RESUMEN DE DATOS INTRODUCIDOS .....	47
FIG. 5.45 CREAR NUEVA EJECUCIÓN > VENTANA DE “PROCESO” .....	48
FIG. 5.46 CREAR NUEVA EJECUCIÓN > VENTANA DE “COMPUTACIÓN” .....	48
FIG. 5.47 CREAR NUEVA EJECUCIÓN > VENTANA DE “VERIFICAR DATOS DE EJECUCIÓN” .....	49
FIG. 5.48 ANÁLISIS > SELECCIÓN DE TIPO DE ANÁLISIS.....	49
FIG. 5.49 ANÁLISIS FINALIZADO, CON ÁRBOL ORGANIZADO .....	50
FIG. 5.50 ANÁLISIS FINALIZADO, CON ÁRBOL DESPLEGADO.....	50
FIG. 5.51 POST > ANÁLISIS DE REPORTE.....	51
FIG. 5.52 POST > ANÁLISIS DE REPORTE > EXPORTACIÓN DE DATOS .....	51
FIG. 5.53 DEFECTO DE HESITATION.....	52
FIG. 5.54 DEFECTO DE TIRO CORTO O “SHORT SHOT” .....	52
FIG. 5.55 DEFECTO DE LÍNEAS DE SOLDADURA .....	53
FIG. 5.56 DEFECTO DE “OVERPACKING” O SATURACIÓN.....	53
FIG. 5.57 RESULTADO LLENADO V01: TIEMPO DE FRENTE DE FLUJO, VISTA GENERAL.....	54
FIG. 5.58 RESULTADO LLENADO V01: ESTADÍSTICAS DE TIEMPO DE FRENTE DE FLUJO (IZQUIERDA) .....	54
FIG. 5.59 RESULTADO LLENADO V01: TIEMPO DE FRENTE DE FLUJO, VISTA CAVIDAD (DERECHA) .....	54
FIG. 5.60 DEFECTO DE LÍNEA DE UNIÓN .....	55
FIG. 5.61 RESULTADO LLENADO V01: PRESIÓN CONJUNTO CAVIDAD Y SISTEMA COLADA CALIENTE (IZQUIERDA).....	56
FIG. 5.62 RESULTADO LLENADO V01: PRESIÓN CAVIDAD (DERECHA).....	56
FIG. 5.63 RESULTADO LLENADO V01: ÁNGULO DE ENCUENTRO DE FUNDIDO .....	57
FIG. 5.64 ESQUEMA CÁLCULO RELACIÓN CAPA CONGELADA .....	57
FIG. 5.65 ESQUEMA CÁLCULO TEMPERATURA CENTRAL .....	58
FIG. 5.66 RESULTADO LLENADO V01: TEMPERATURA CENTRAL, VISTA GENERAL.....	58
FIG. 5.67 RESULTADO LLENADO V01: ESTADÍSTICAS DE TEMPERATURA CENTRAL (IZQUIERDA) .....	58
FIG. 5.68 RESULTADO LLENADO V01: TEMPERATURA CENTRAL, VISTA CAVIDAD (DERECHA) ..	58
FIG. 5.69 RESULTADO COMPACTACIÓN V01: PRESIÓN .....	59
FIG. 5.70 RESULTADO COMPACTACIÓN V01: DENSIDAD.....	60
FIG. 5.71 RESULTADO COMPACTACIÓN V01: INDICADOR DE RECHUPE (IZQUIERDA) .....	60
FIG. 5.72 RESULTADO COMPACTACIÓN V01: ESTADÍSTICAS INDICADOR DE RECHUPE (DERECHA).....	60
FIG. 5.73 RESULTADO COMPACTACIÓN V01: FUERZA DE CIERRE .....	61
FIG. 5.74 APERTURA ARCHIVO V02.MDG.....	63
FIG. 5.75 SELECCIÓN DE LOS CANALES A ELIMINAR .....	63
FIG. 5.76 SUPRESIÓN DE CANALES A MODIFICAR.....	64
FIG. 5.77 LÍNEA DE CANAL CON NUEVA LONGITUD.....	65

FIG. 5.78 SOBRE LA LÍNEA, CLIC DERECHO > “EDITANDO LOS ATRIBUTOS DEL MOLDEO POR INYECCIÓN” .....	65
FIG. 5.79 ASIGNACIÓN ATRIBUTO .....	66
FIG. 5.80 ASIGNACIÓN DIÁMETRO .....	66
FIG. 5.81 EN LA BARRA SUPERIOR > “COPIAR” > SELECCIÓN CANAL VERTICAL .....	67
FIG. 5.82 EN LA BARRA SUPERIOR > “COPIAR” > SELECCIÓN DE PUNTO DE ORIGEN Y PUNTO DE DESTINO .....	67
FIG. 5.83 EN LA BARRA SUPERIOR > “COPIAR” > COPIA CONSECUTIVA > SELECCIÓN OBJETOS A COPIAR .....	68
FIG. 5.84 RESULTADO DE TODOS LOS CANALES COPIADOS.....	68
FIG. 5.85 EN LA BARRA SUPERIOR > “DESPLAZAR OBJETOS” > SELECCIÓN DE OBJETOS A DESPLAZAR .....	69
FIG. 5.86 EN LA BARRA SUPERIOR > “DESPLAZAR OBJETOS” > SELECCIÓN DE PUNTO DE ORIGEN Y DESTINO.....	69
FIG. 5.87 RESULTADO DE TODO EL SISTEMA DE CANALES UNIDO .....	70
FIG. 5.88 EN PASO 4, “GENERAR” .....	70
FIG. 5.89 EN PASO 4, “GENERAR” > LISTA ELEMENTOS A MALLAR .....	71
FIG. 5.90 EN PASO 4, “GENERAR” > SELECCIÓN DE ELEMENTO A MALLAR.....	71
FIG. 5.91 EN ÁRBOL DE LATERAL IZQUIERDO > “HACER DOBLE CLIC AQUÍ PARA AGREGAR UNA NUEVA EJECUCIÓN” .....	72
FIG. 5.92 CREAR NUEVA EJECUCIÓN > VENTANA DE “OPCIÓN” .....	73
FIG. 5.93 RESULTADO COMPACTACIÓN V02.1: PRESIÓN .....	74
FIG. 5.94 RESULTADO COMPACTACIÓN V02.1: DENSIDAD.....	74
FIG. 5.95 RESULTADO COMPACTACIÓN V02.1: FUERZA DE CIERRE .....	75
FIG. 5.96 MODIFICACIÓN DIÁMETRO 1.....	76
FIG. 5.97 MODIFICACIÓN DIÁMETRO 2.....	76
FIG. 5.98 MODIFICACIÓN DIÁMETRO 3.....	77
FIG. 5.99 RESULTADO DE TODOS LOS CANALES COPIADOS.....	77
FIG. 5.100 EN PASO 4, MALLADO DEL CANAL DE ALIMENTACIÓN .....	78
FIG. 5.101 EN PASO 3, “ASISTENTE” .....	81
FIG. 5.102 EN PASO 3, “ASISTENTE” > INTRODUCCIÓN DE MEDIDAS TOCHO.....	81
FIG. 5.103 EN PASO 3, “IMPORTAR” .....	82
FIG. 5.104 EN PASO 3, “IMPORTAR” > SELECCIÓN DE ARCHIVO .....	82
FIG. 5.105 CLIC DERECHO SOBRE REFRIGERACIÓN > “EDITANDO LOS ATRIBUTOS DEL MOLDEO POR INYECCIÓN” > ATRIBUTO: CANAL DE REFRIGERACIÓN .....	83
FIG. 5.106 RESULTADO DE TODA LA REFRIGERACIÓN INTRODUCIDA .....	83
FIG. 5.107 RESULTADO DE ENTRADAS Y SALIDAS DE REFRIGERACIÓN ASIGNADAS .....	84
FIG. 5.108 RESULTADO REFRIG. V03: EFICIENCIA DE REFRIGERACIÓN.....	85
FIG. 5.109 RESULTADO REFRIG. V03: TEMPERATURA CENTRAL, VISTA GENERAL.....	85
FIG. 5.110 RESULTADO REFRIG. V03: ESTADÍSTICAS TEMPERATURA CENTRAL (IZQUIERDA) ....	86
FIG. 5.111 RESULTADO REFRIG. V03: TEMPERATURA CENTRAL, VISTA CAVIDAD (DERECHA) ...	86
FIG. 5.112 RESULTADO REFRIG. V03: DIFERENCIA DE TEMPERATURA DEL MOLDE .....	86
FIG. 5.113 ESQUEMA CÁLCULO TIEMPO DE ENFRIAMIENTO MÁXIMO.....	87
FIG. 5.114 RESULTADO REFRIG. V03: TIEMPO DE ENFRIAMIENTO MÁXIMO, VISTA GENERAL..	87
FIG. 5.115 RESULTADO REFRIG. V03: ESTADÍSTICAS TIEMPO DE ENFRIAMIENTO MÁXIMO (IZQUIERDA) .....	87
FIG. 5.116 RESULTADO REFRIG. V03: TIEMPO DE ENFRIAMIENTO MÁXIMO, VISTA CAVIDAD (DERECHA).....	87



## INDICE DE TABLAS

TABLA 1 PARÁMETROS DE MALLADO .....	33
TABLA 2 EVOLUCIÓN DE LA PRESIÓN DE LLENADO. ....	79
TABLA 3 EVOLUCIÓN DE LA FUERZA DE CIERRE.....	79
TABLA 4 PRESUPUESTO REALIZACIÓN PROYECTO .....	97
TABLA 5 PRESUPUESTO PLAN DE SEGUIMIENTO PARA IMPLANTACIÓN PROYECTO .....	97



DESARROLLO E IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA OPTIMIZACIÓN  
DEL DISEÑO DE MOLDES DE INYECCIÓN EN LA INDUSTRIA DEL PLÁSTICO  
BASADO EN PROGRAMAS DE AYUDA A LA INGENIERÍA.

---

# *MEMORIA TÉCNICA*

---

# 1. OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN

## 1.1. OBJETIVO

En la actualidad existe una problemática en el sector de la matricería, concretamente se habla del campo de los moldes: se sigue trabajando de manera tradicional en cuanto a lo que el diseño de moldes se refiere. A la hora de la toma de decisiones se tiene en cuenta la experiencia y el criterio de los responsables, no optimizando al máximo los moldes y repercutiendo en los beneficios de la empresa.

Se ha tratado de forma cercana con una empresa del sector afincada en Manises, Comunidad Valenciana, llamada Moldes 2010 SL. Para ella, se va a realizar un estudio que se espera palie esta carencia tan arraigada en el sector. Pese a que trabaja con moldes para la inyección de varios tipos de material, el estudio se centrará en los moldes que se inyectan con plástico por ser los predominantes en la industria.

Se realiza el proyecto con el objetivo de mejorar el sistema de trabajo. Este se basa pues en crear unas pautas a seguir que complementarán al actual proceso de diseño. Se emplearán programas de asistencia a la ingeniería (CAE) que guiarán el diseño junto con el actual método. Posteriormente, las pautas serán aplicadas en la empresa en diferentes proyectos a modo de prueba. Se realizará un estudio estadístico para analizar la eficacia del programa propuesto, comparando los resultados obtenidos antes y después de aplicar el sistema regido por los programas CAE. Se ofrece un estudio retroalimentado, realizando mejoras si procede.

El trabajo será llevado a cabo mediante investigación, y se expondrán puntos a seguir de forma genérica, como referencia. En función del caso en cuestión se podrán suprimir o añadir pasos en las pautas según convenga.

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

### 1.2.1. ACADÉMICA

Es una necesidad llevar los conocimientos adquiridos actualmente en los centros a la práctica real del mundo laboral con el fin de evolucionar de manera conjunta. De este modo también es posible cerciorarse de que estos estudios de investigación teóricos son válidos puestos en práctica. En este caso, las ayudas tecnológicas son un gran desconocido en la industria tradicional, predominante en el sector; mientas que en las escuelas de ingeniería, los complementos informáticos están a la orden del día. Se trata pues de ayudar a la actualización del mundo laboral.

Por otra parte, este tipo de procesos prácticos también son útiles para el alumnado de ingeniería, que aprende a extrapolar sus conocimientos y ponerlos en práctica en casos concretos.

### 1.2.2. INTERÉS TECNOLÓGICO

El estudio realizado supondrá un avance científico-práctico para empresas que todavía no hayan dado el paso con los sistemas CAE. Se aportará una plantilla que completará el actual modo de operar, ayudando a mejorar y optimizar el proceso de diseño de moldes.

Gracias a las herramientas proporcionadas las empresas serán capaces de reducir el sobredimensionamiento en sus proyectos, y aumentar de este modo las ganancias. También se

conseguirá disminuir el tiempo dedicado al proceso de diseño, lo que repercutirá del mismo modo en los beneficios de las entidades.

### 1.2.3. EMPRESA MOLDES 2010 SL

Es un hecho que Moldes 2010 es una empresa en pleno crecimiento y expansión. En los últimos años ha actualizado su maquinaria a la última generación, consiguiendo las mejores prestaciones en taller. En la oficina técnica en cambio, pese a tener un buen equipo de trabajo que ofrece soluciones a las complejidades presentadas por cada cliente, no ha habido un cambio tan drástico que acompañe al crecimiento exponencial del taller.

Se tiene como pretensión que la ingeniería siga al resto de áreas de la empresa en su crecimiento. Es por esto que en este proyecto se propone una evolución en el diseño de los moldes. Se tratará de crear un complemento que se añada a su actual modo de operar: una guía de uso de programas CAE. Junto con la experiencia y el juicio de los responsables experimentados, los ingenieros se harán servir de esta herramienta para determinar algunas características de los moldes. Aunando el trabajo que se realiza actualmente y el sistema propuesto, obtendremos resultados más precisos y controlados cuando el molde esté en funcionamiento. Con esto, el diagrama de flujo que se pretende instaurar en la empresa es el mostrado a continuación.

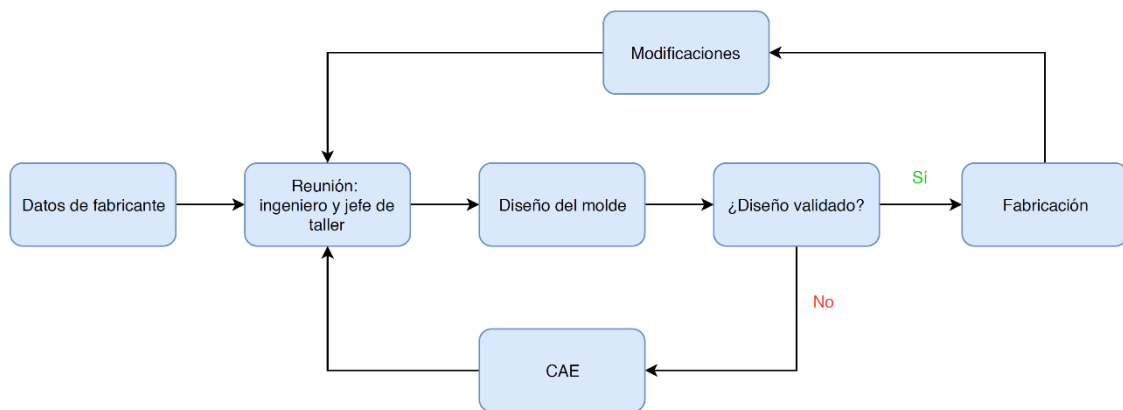


Fig. 1.1 Diagrama de flujo proceso de diseño propuesto



## 2. ALCANCE

### 2.1. ÁMBITO DE APLICACIÓN

El ámbito de aplicación del estudio que ha sido realizado depende de cómo se trate este. Se ha hecho pensando en un proyecto de un molde con pieza de tamaño mediano-pequeño con múltiples cavidades y cámara caliente. No obstante, el proceso de estudio del llenado del molde es similar en casos donde varían factores como el tamaño de pieza, el material a inyectar o la cámara caliente, en caso de disponer de esta última. Una vez se ha entendido la dinámica que rige las pautas a seguir a la hora de realizar el estudio, es sencillo definir los pasos necesarios para adaptarse a cada molde en concreto; ya sea modificando, añadiendo o suprimiendo estos.

Por otro lado, el proyecto se ha desarrollado para la empresa Moldes 2010 SL, pero es totalmente válido para todas de empresas del sector ya que las cosas a tener en cuenta en el diseño del molde no dependen de la empresa que lo realice.

Se puede afirmar pues, que es un estudio totalmente versátil y útil para todo tipo de proyectos y empresas que tengan como ocupación el diseño de moldes para la inyección de plástico.

### 2.2. LÍNEAS GENERALES

La forma en la que se aborda el proyecto es sencilla. Tras realizar un estudio y determinar los parámetros básicos y característicos del llenado del molde, se determinan unos pasos genéricos que se deberán seguir a la hora de diseñar el molde.

Se parte de un estado inicial del molde y a partir de este se crean versiones. En cada versión se realizan sucesivas modificaciones, alterando en cada una de ellas un único parámetro para observar en qué afecta cada cambio llevado a cabo. Cada versión puede repetirse tantas veces como sea necesario, variando el mismo parámetro de formas diferentes hasta encontrar la situación que más convenga. Puede haber casos en los que no se aprecie mejora entre algunas versiones, o bien casos que necesiten alguna modificación diferente; es por esto que se dice que se trata de un proyecto de índole genérica. El objetivo primordial es comprender la mecánica del sistema para ser capaz de evolucionarlo en función de las necesidades.

En el proyecto se expone claramente en qué consiste cada versión propuesta, explicando porqué modificamos el parámetro en cuestión y cómo hacerlo con el programa CAE elegido. En caso de trabajar con otra plataforma informática, será útil la parte teórica, en cambio el modo de proceder con el programa CAE obviamente variará. Se ofrecerán alternativas para la mejora del molde en función de los resultados obtenidos.

## 3. ANTECEDENTES

### 3.1. HISTORIA DE LA EMPRESA

Moldes 2010 SL, anteriormente llamada “Moldes Andrés González Cebrián”, se trata de una empresa originada en el año 1985, aunque fue en 2006 cuando cambiaron su razón social pasando a su denominación actual. Su dedicación es tanto a diseñar como fabricar el producto que ofrecen: los moldes; no solo de materiales termoplásticos sino de aleaciones metálicas no férreas. (Moldes 2010 S L, s.f.)

Se trata pues de una empresa con más de 30 años de experiencia en el sector que en 2015, cumpliendo con sus necesidades, adquiere una nave colindante pasando a tener más de 1000m<sup>2</sup> de superficie. Este crecimiento vino acompañado con la consecuente compra de maquinaria de última tecnología. Con ello, posee una capacidad productiva de más de 3000 horas mensuales y es capaz de producir moldes de hasta 7 toneladas.

Las principales áreas de su taller se dividen en: centros de mecanizado, erosión, torno y ajuste. Gran parte de la maquinaria es de última generación, proporcionando altas velocidades, gran calidad superficial y tolerancias dimensionales muy precisas. Concretamente, la maquinaria de la que se dispone es la siguiente:

Centros de mecanizado:

- DMC 1450 V DMG MORI
- Centro mecanizado 5 ejes DMC65 monoBlock DMG MORI SEIKI con cargador de 3 pallets
- Fresadora CMC correa CF-22
- DMU 50 (5 ejes)
- DMC 104 linear Deckel Maho

Erosión:

- Ona AV60 (Erosión hilo)
- Ona QX4 (Erosión por penetración)
- Ona NX6
- AgieCharmilles Drill11

Torno:

- Torno CNC Mori Siki DMC NL1500/2500
- Torno Pinacho S90/225
- Torno CNC DMG 320 GLIDEMEISTER

Ajuste:

- Prensa ajuste REIS TUS
- Prensa MILLUTENSIL

Por otro lado, en la oficina técnica se cuenta con cuatro estaciones de trabajo CAD/CAM con SIEMENS NX10. La ingeniería de Moldes 2010 ofrece un servicio completo comenzando con el diseño del molde, hasta el mecanizado o erosión. Toda la información generada se traslada al taller en formato papel gracias a un plotter CANON IPF785 de máximo tamaño A0

### 3.2. DISEÑO DE MOLDES

El proceso que se sigue actualmente en Moldes 2010 SL para llevar a cabo el proyecto es del estilo clásico. Una vez se sabe que hay que realizar una tarea concreta, se consigue el cuaderno de cargas del cliente. Se trata de un documento en el que aparecen todo tipo de condiciones a cumplir: dimensiones, tornillería, tolerancias, sistemas de colada caliente, sistemas de refrigeración, cableado etc. Por otro lado, se comienza a trabajar en crear la cavidad del molde a partir de la pieza proporcionada por el cliente, algo especialmente primordial en el diseño del molde y de lo que dependen muchas partes del mismo. A partir de este punto se diseñan el resto de partes combinando las exigencias del cliente reflejadas en el cuaderno de cargas, las necesidades de la pieza, y el criterio y experiencia tanto de la persona que lleva a cabo el diseño como del encargado de taller. Una vez el molde ha alcanzado cierta fase de diseño en oficina técnica, se considera que puede comenzar a fabricarse en taller. Cuando el molde está terminado se realizan pruebas de inyección, en las que el molde se pone en funcionamiento, para ver las piezas que se obtienen de este. En función de los resultados, el molde deberá volver a planta para realizar las modificaciones oportunas y conseguir cumplir con las especificaciones del cliente. Este proceso se repite hasta dar con la pieza perfecta; cuando se haya conseguido se dará por terminado el proyecto.

Todo esto se resume de forma gráfica en el diagrama de flujo mostrado en la figura 3.1.

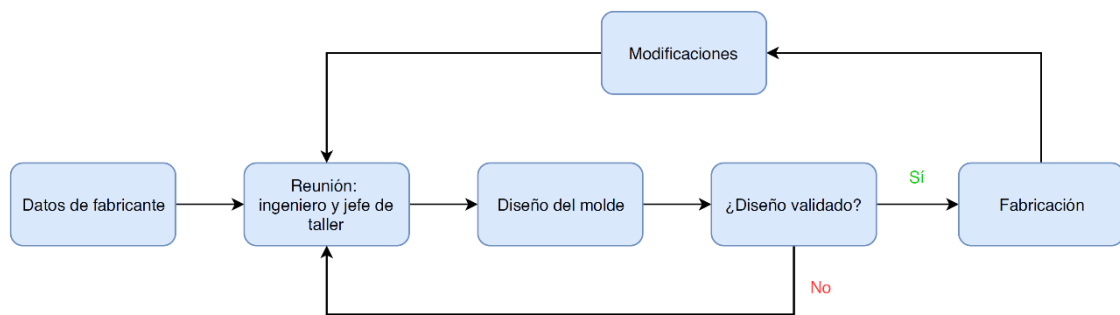


Fig. 3.1 Diagrama de flujo proceso de diseño actual

## 4. HERRAMIENTAS CAE

### 4.1. ELECCIÓN DE SOFTWARE

La elección del software con el que se realizan las simulaciones no es algo sencillo, depende de lo que se quiera obtener de la simulación. En el mundo de los polímeros se escoge en función de si se desea simular el diseño de la pieza, si se trata de un fabricante de moldes o de un productor de piezas de plástico.

En este caso, se elige el software para un fabricante de moldes. Conociendo este dato, se ha de determinar qué partes del molde se desean simular: conjuntos con insertos de molde o insertos de pieza, los sistemas de refrigeración, el canal caliente, o configuraciones con el molde completo. Se decide no simular el molde completo, teniendo en cuenta las partes más cercanas y las que más afectan a la cavidad.

Partiendo de la base de que una simulación será más realista cuanto más precisos y abundantes sean los datos introducidos, se realiza una comparación entre los software que encabezan la industria: Moldflow (Autodesk products Moldflow, s.f.) y Moldex3D (Comunicación personal, 26 de julio, 2018).

Moldflow:

- Un único programa para realizar la simulación.
- Costoso realizar el mallado.
- Sensible a la calidad de los archivos CAD (Recomendable tener CADdoctor).
- Muy buena base de datos de materiales.
- Precio de licencia Moldflow Insight Premium 2019 por un año: 27200 € IVA incluido.

Moldex3D:

- Dos programas: uno de diseño y preparación de mallado, otro de simulación.
- Muy bueno para la construcción de canales de refrigeración y canales calientes.
- Sencillo de configurar una simulación.
- Algo más lento a la hora de comprobar resultados.
- Precio de licencia Moldex3D Professional por un año: 12100€ IVA incluido.

Una vez conocidas características de ambos, se decide realizar el estudio con el software Moldex3D. Esto es debido a que su uso es considerablemente más sencillo e intuitivo, y se cree una cualidad de peso ya que el estudio va a ser llevado a cabo por personas que se presupone no han estado en contacto con este tipo de programas. A pesar de que sea menos rápido consultando resultados, puesto que esta plataforma no es la de uso principal de la empresa, se toma como un mal menor. Un factor decisivo es la diferencia de precio, siendo Moldex3D más económico. No obstante, cabe mencionar que cualquier otro software similar a ambos sería una buena elección y podría aplicarse el estudio de forma semejante.

### 4.2. MOLDEX3D

Moldex3D es un software de simulación especializado en la industria de la inyección de plástico en moldes. La empresa cuenta con muchas plataformas, en este caso se va a trabajar con dos programas complementarios: en uno se diseña y prepara el proyecto mientras que en el otro se

introducen las condiciones y se realizan las simulaciones. Además se cuenta con una plataforma gratuita y accesible para todo el mundo, ofrecida desde la página web oficial, llamada Moldex3D Viwer para poder visualizar los resultados de las simulaciones sin necesidad de disponer de una licencia. Se va a trabajar con la versión Moldex3D R15.0.

#### 4.2.1. MOLDEX3D DESIGNER

En el programa de diseño se puede apreciar una ventana en el lateral izquierdo con una numeración del 1 al 5, estos son todos los pasos que se deberán seguir a la hora de realizar el diseño en Moldex3D para la futura simulación. En la barra superior se encuentran accesos rápidos comunes a muchos programas de esta índole, como cambio de visualización o perspectiva, ocultar o mostrar partes del diseño (cavidad, canal caliente, insertos...), copiar, mover; además de guardar, abrir o crear nuevo documento. En el lateral derecho se encuentran accesos directos a comandos para crear elementos como puntos, líneas o arcos. Finalmente, en la barra inferior se pueden activar o desactivar las restricciones de rastreo del cursor en el área de trabajo. El programa de Moldex3D Designer trabaja con archivo con extensión .MDG.

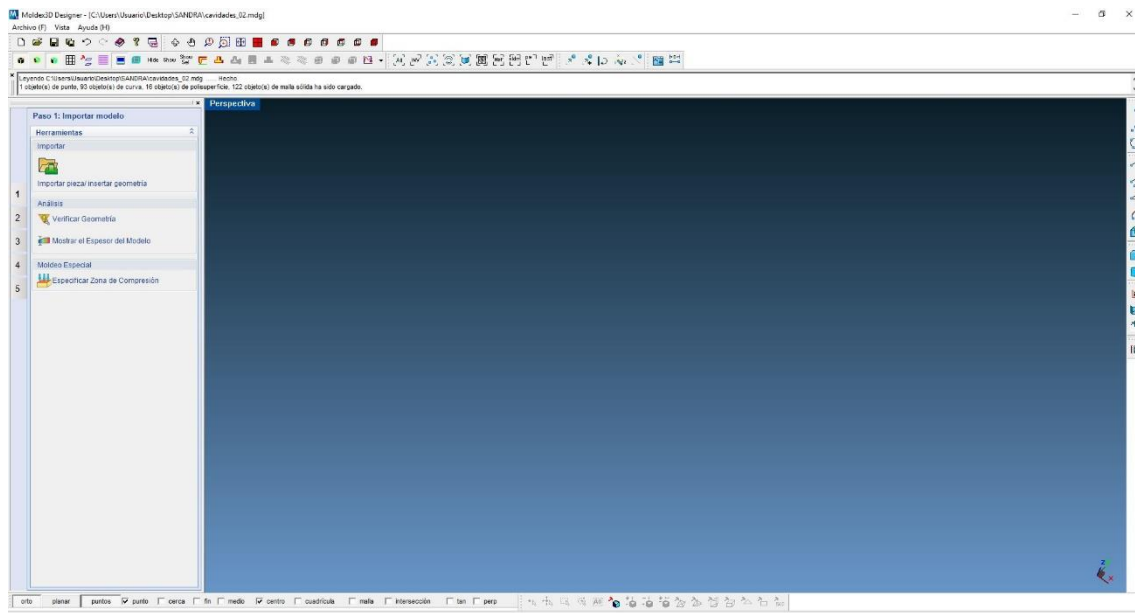


Fig. 4.1 Interfaz del usuario Moldex3D Designer

#### 4.2.2. MOLDEX3D PROJECT

En la parte del software de simulación de Moldex3D se entiende como proyecto cada archivo que abrimos con el programa, pudiendo tener éste múltiples ejecuciones diferentes; es decir, varios análisis con parámetros distintos dentro de un mismo proyecto. Conforme se vayan creando y analizando dichas ejecuciones, aparecerán en el lateral izquierdo a modo de árbol: cada ejecución tiene su propio desplegable con los resultados organizados según los análisis calculados en cada caso. El resto del entorno de Moldex3D Project es similar al de Moldex3D Designer. En la barra superior se tienen accesos directos para cambiar la perspectiva de la ventana de visualización, mostrar/ocultar componentes del sistema, elementos para controlar la reproducción de las animaciones creadas por el análisis; aparte de hacer/deshacer, guardar o abrir nuevo documento. En el lateral derecho se encuentran opciones de zoom y movimiento de la ventana de visualización, entre otras. El programa de Moldex3D Project trabaja con archivos que tienen extensión .MFE.

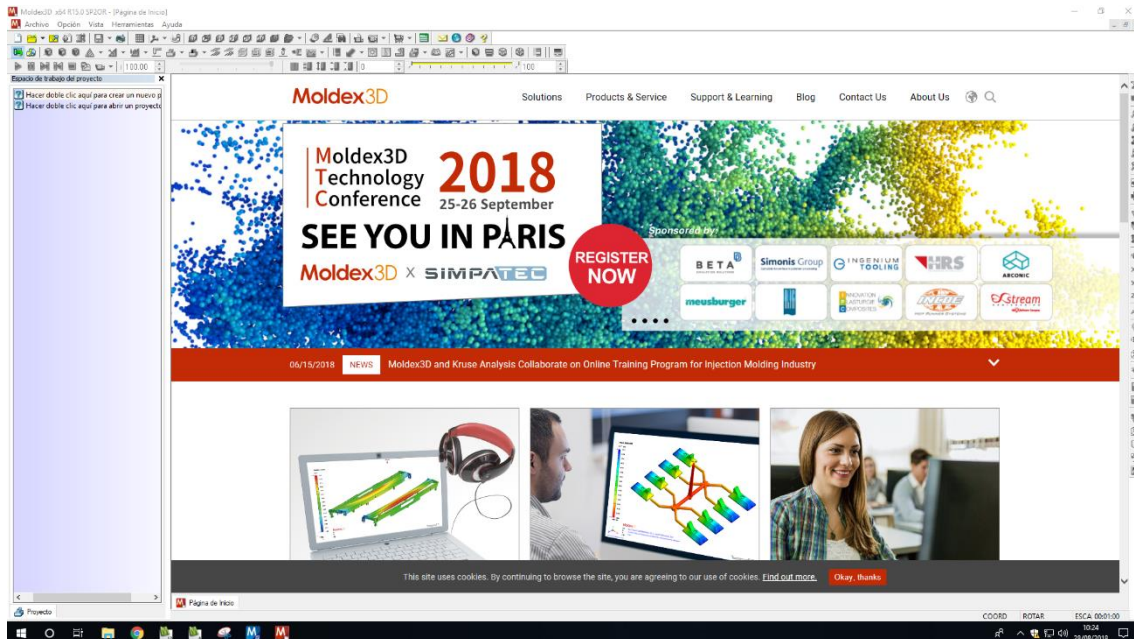


Fig. 4.2 Interfaz del usuario Moldex3D Project

#### 4.2.3. MOLDEX3D VIWER

Moldex3D Viwer es una herramienta gratuita de postprocesamiento que permite compartir análisis de resultados obtenidos en Moldex3D CAE. El tipo de formato que utiliza es .RSV, el cual se consigue exportando los análisis desde otras plataformas de Moldex3D.

En el caso de Moldex3D Project para exportar los resultados de las ejecuciones al tipo de archivo .RSV hay que ir a la barra superior y hacer clic en Archivo > Guardar > Guardar como archivo .RSV.

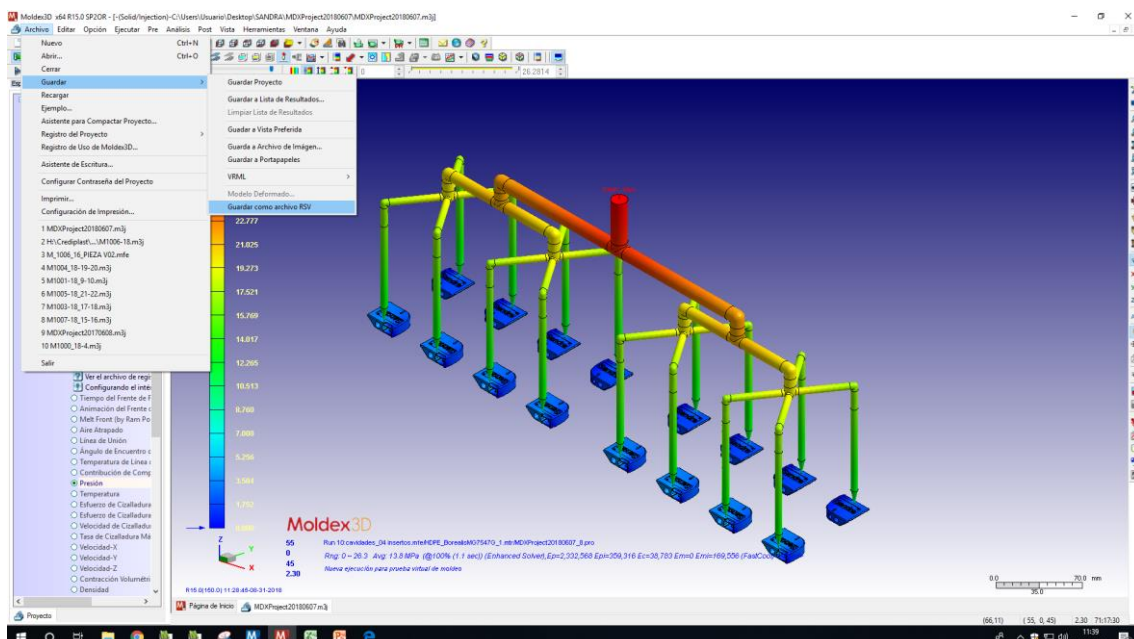


Fig. 4.3 Cómo exportar a archivo .RSV

A continuación aparece una ventana emergente en la que se debe especificar las ejecuciones o las partes de estas que se desean exportar, y la carpeta de destino. Una vez se tenga, se hace clic en guardar y el programa generará los archivos deseados. Esto puede llevar un tiempo.

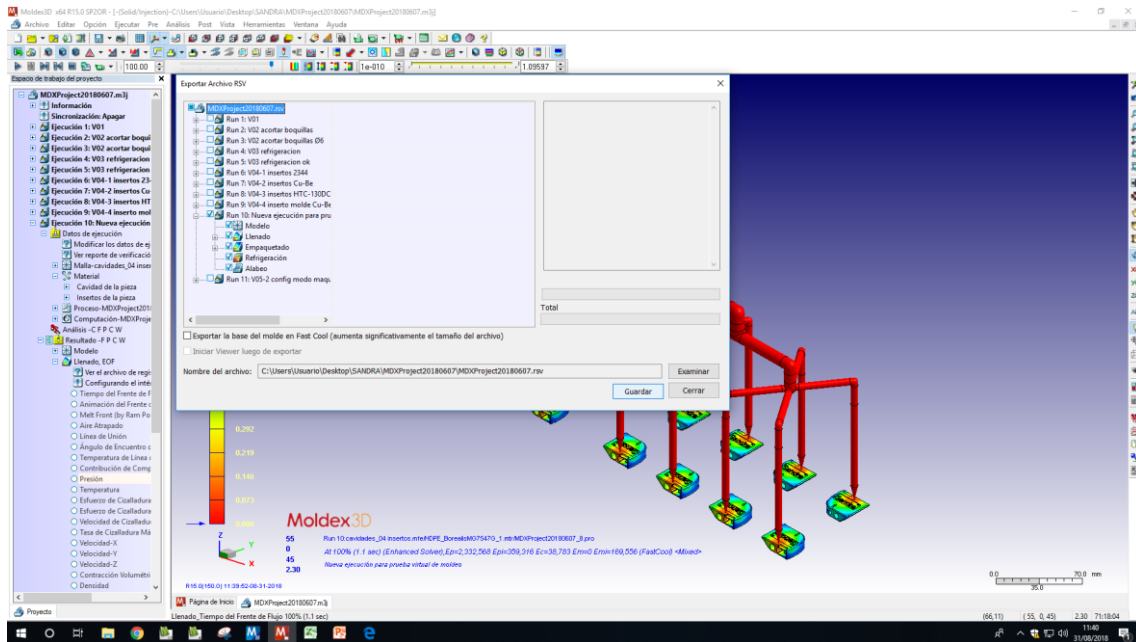


Fig. 4.4 Especificaciones de exportación a .RSV

La interfaz de Moldex3D Viwer es sencilla y completa a la vez. Se pueden consultar resultados, reproducir animaciones, realizar mediciones o crear secciones. En la barra superior se dispone de comandos para mostrar/ocultar objetos, manejar las animaciones y modificar la escala o leyenda. En el lateral derecho hay accesos directos para realizar ajustes o cambios en la ventana de visualización como la perspectiva o el zoom; también se dispone de una herramienta específica para realizar capturas de pantalla. En la ventana del lateral izquierdo se visualizan los resultados de las ejecuciones exportadas, organizadas de forma análoga al programa Moldex3D Project. En la parte inferior del programa se pueden ver los diferentes archivos que se tienen abiertos de forma simultánea. Finalmente, en la esquina inferior derecha, una vez abierto un archivo, aparece una rueda con accesos directos para manejar las simulaciones o crear secciones dinámicas.

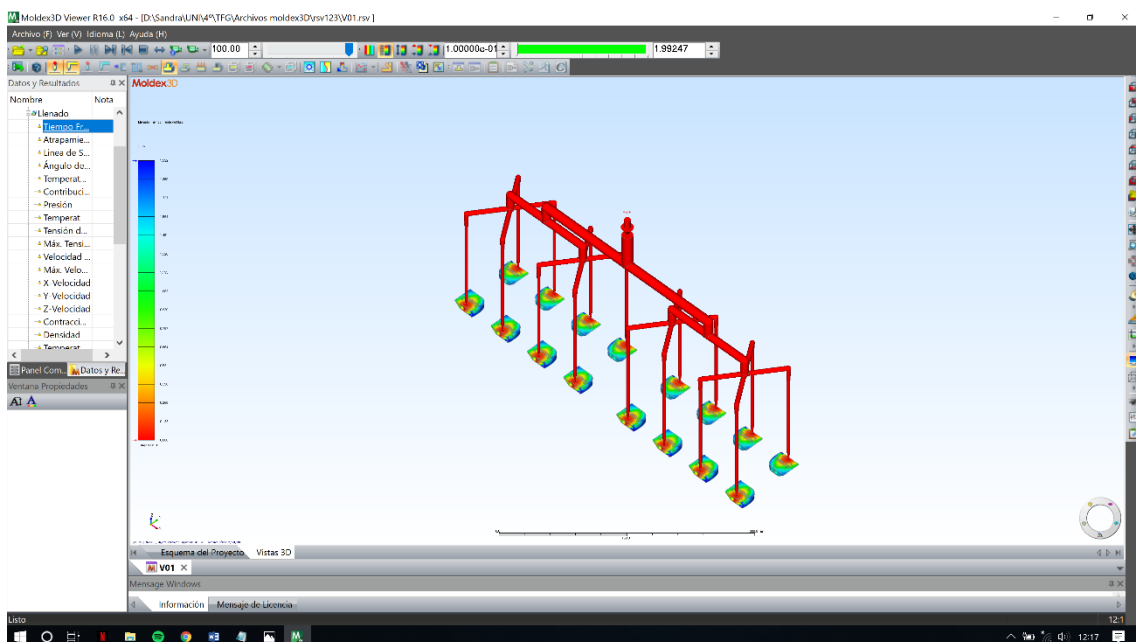


Fig. 4.5 Interfaz del usuario Moldex3D Viwer

## 5. ESTUDIO E IMPLANTACIÓN

Para poder dar comienzo al estudio se debe partir de una propuesta de diseño inicial del molde a grandes rasgos, esta irá sufriendo modificaciones y adiciones de nuevas partes en sucesivas versiones hasta lograr el diseño que más se adecue a las necesidades. En este estudio se tomará un proyecto de la empresa Moldes2010 SL para guiar los pasos y tomarlo a modo de ejemplo. Este modelo se expondrá de forma paralela a la teoría del proyecto, se espera conseguir con ello una mayor comprensión del guion.

Tal y como se ha dicho anteriormente, los puntos que se expondrán a continuación no son únicos e invariables; es más, la filosofía del proyecto es proporcionar una guía que ayude, a la vez que se comprenda la forma en la que se ha construido para poder realizar cambios y adaptarla lo máximo posible a cada caso, obteniendo así los mejores resultados.

Se tratará de exponer los puntos siguiendo un orden. Primeramente se explicará el principio o el motivo por el que se cree una buena opción realizar dicha versión del proyecto. A continuación se enseñará como hacerlo tanto en el programa de Moldex3D Designer como en el programa de Moldex3D Project. En este paso nos haremos servir del proyecto de ejemplo. Finalmente se comentarán los resultados obtenidos del análisis y las alternativas o modificaciones de diseño para mejorarlos, apoyándome en Moldex3D Help (s.f.).

### 5.1. DATOS INICIALES

Una vez conocido el proyecto y la pieza que se va a extraer del molde, se diseña una idea inicial del mismo contando con las exigencias del cliente como pueden ser el número y distribución de cavidades o el punto de inyección. Es a partir de este momento cuando se puede iniciar el estudio. En este estado ya se tiene una idea aproximada del tamaño del molde y de los postizos principales de las partes fija y móvil en caso de existir. Se puede estimar por tanto el canal caliente y las refrigeraciones.

Cuando se trabaja con programas de simulación de llenado de molde, obviamente se debe introducir la pieza que se va a obtener. Un análisis básico y rápido podría realizarse simulando únicamente una pieza y extrapolando los resultados al número de piezas con las que se cuenta realmente. En este caso, se realizan análisis teniendo en cuenta todas las cavidades que tiene el molde y su distribución exacta original en caso de ser un molde multicavidad, obteniendo de este modo resultados lo más próximos a la realidad posible. Para ello, se debe disponer de la pieza en cuestión en un formato de archivo de intercambio como son .STEP, .STP, .IGES, .XT\_PRT o similares, con los que trabajen tanto el programa con el que se realiza el diseño del molde, como el programa de simulación, que es en este caso Moldex3D.

La refrigeración y el canal caliente, al contrario que la pieza, no es algo dado por el cliente, si no elementos que se deben diseñar. A la hora de introducirlos en el programa de simulación, estos se pueden construir con las herramientas de diseño que proporciona el Moldex3D, o pueden diseñarse únicamente en el programa de diseño del molde e importarlos al programa de simulación del mismo modo que se hace con las piezas.

Otros datos a conocer para precisar el estudio son el material de la pieza a inyectar, o características de la máquina inyectora.



El proyecto que se va a utilizar como ayuda en las explicaciones es un molde multicavidad que inyecta piezas de tamaño pequeño. Las piezas que se extraen son tensores de cables fabricados con plástico, en concreto polietileno de alta densidad (HDPE High Density Polyethylene). El diseño de la pieza puede apreciarse en las figuras 5.3, 5.4 y 5.5. Nótese que logo del cliente ha sido modificado con el fin de preservar su identidad. En un ciclo se obtienen 16 piezas, situadas en dos postizos simétricos tal y como se aprecia en las figuras 5.1 y 5.2. Por exigencias del cliente, el molde va a disponer de cámara caliente con entrada cosmética en la pieza, además de refrigeración tanto en lado móvil como en lado fijo.

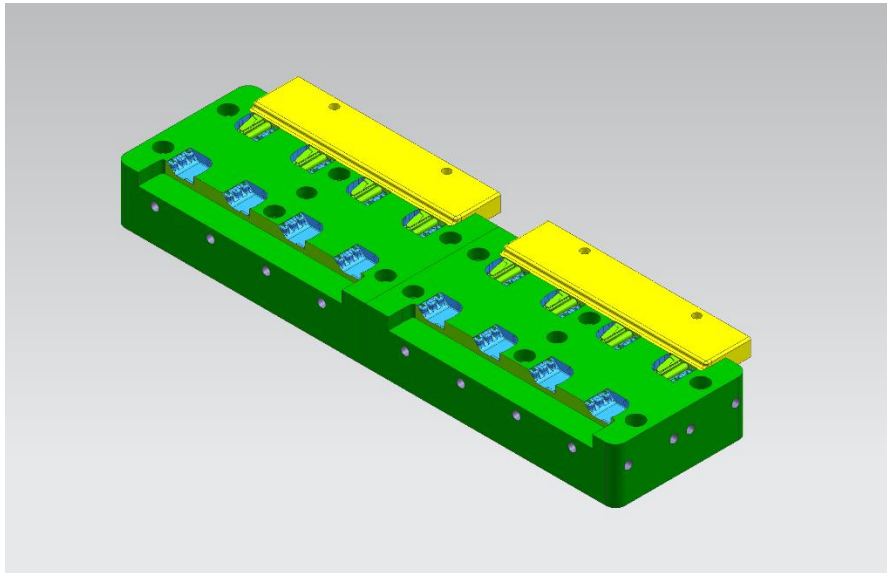


Fig. 5.1 Disposición de cavidades en postizos, vista isométrica

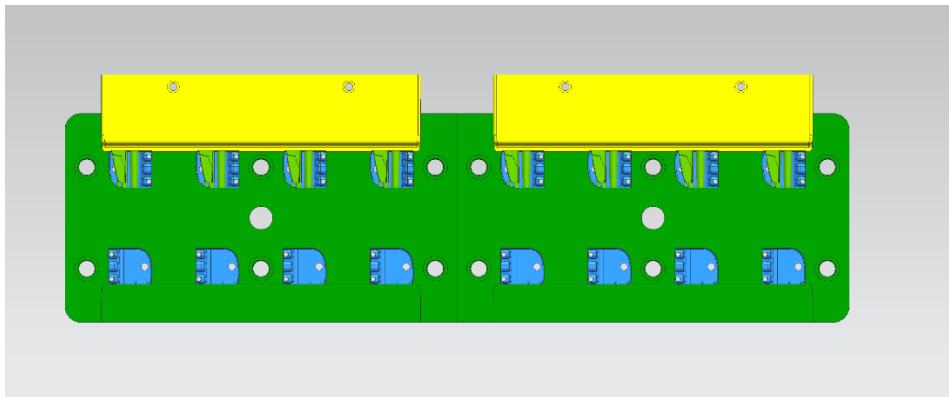


Fig. 5.2 Disposición de cavidades en postizos, vista en planta

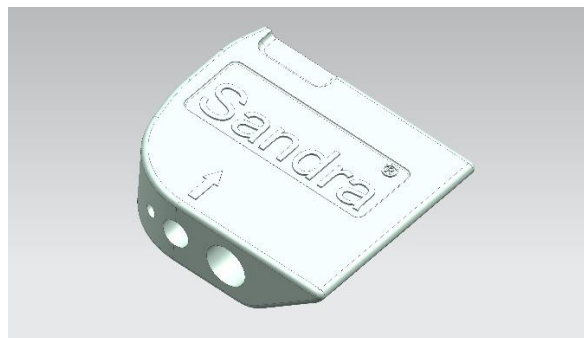


Fig. 5.3 Pieza en proyecto modelo, 1

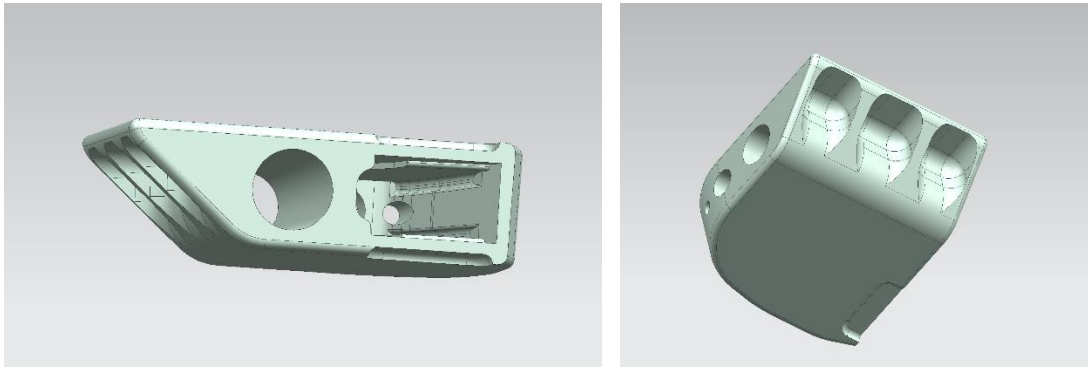


Fig. 5.4 Pieza en proyecto modelo, 2 (izquierda)

Fig. 5.5 Pieza en proyecto modelo, 3 (derecha)

## 5.2. V01 – INICIO

Una vez planteada la propuesta inicial del molde por parte de los ingenieros, comienza el trabajo con el programa CAE. Se crea la primera versión con el estado original y básico del molde, a partir de la cual se evolucionará hasta dar con la versión óptima.

### V01 MOLDEX3D DESIGNER

Se parte el estudio introduciendo en el programa de diseño de Moldex3D el estado inicial del molde. Para ello, es necesario iniciar el programa y crear un documento virgen.

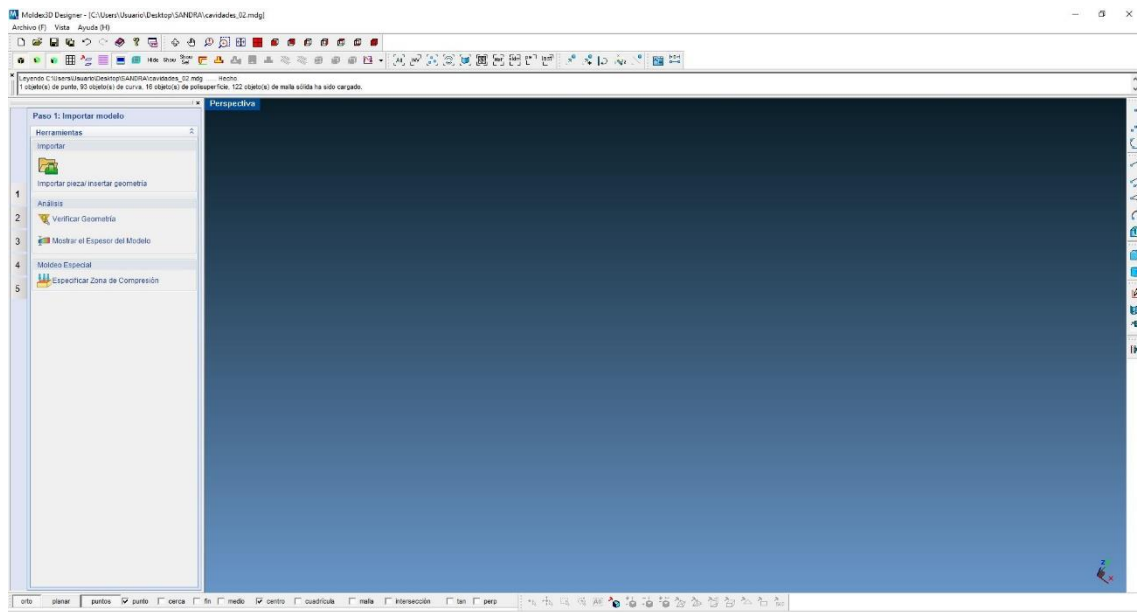


Fig. 5.6 Interfaz del usuario Moldex3D Designer

Siguiendo el paso 1, se importa la pieza. Para ello se hace clic en “Importar pieza/importar geometría” en el lateral izquierdo, aparece un cuadro de diálogo de explorador de Windows y se selecciona el archivo en formato de intercambio que anteriormente se había preparado con la pieza a analizar. Al realizar la importación de este modo, el programa reconoce automáticamente que el cuerpo importado se corresponde con la cavidad del molde. En caso de trabajar con más de una cavidad, existen dos posibilidades para importarlas al programa de simulación: o bien importar una única pieza y a continuación moverla y copiarla hasta conseguir

la distribución deseada, o bien importar un archivo con todas las piezas ya situadas correctamente. Se recomienda trabajar del segundo modo indicado porque se ahorra el trabajo de colocación de las piezas. En el proyecto modelo, al tratarse de un molde multicavidad se ha optado por seguir la recomendación e importar todas las piezas ya posicionadas.

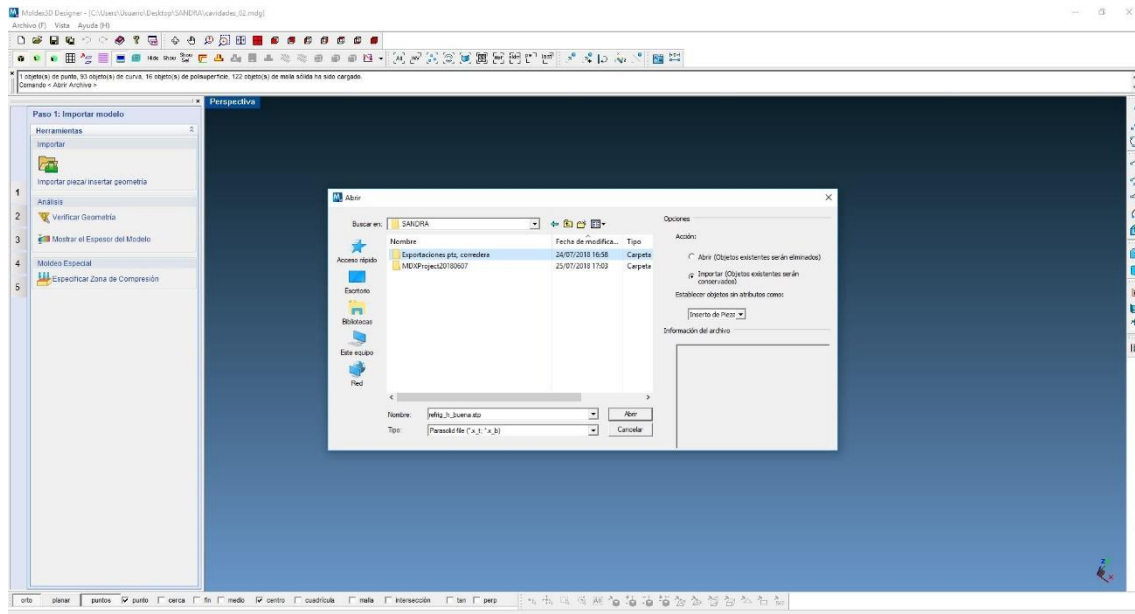


Fig. 5.7 Importar pieza a Moldex3D Designer

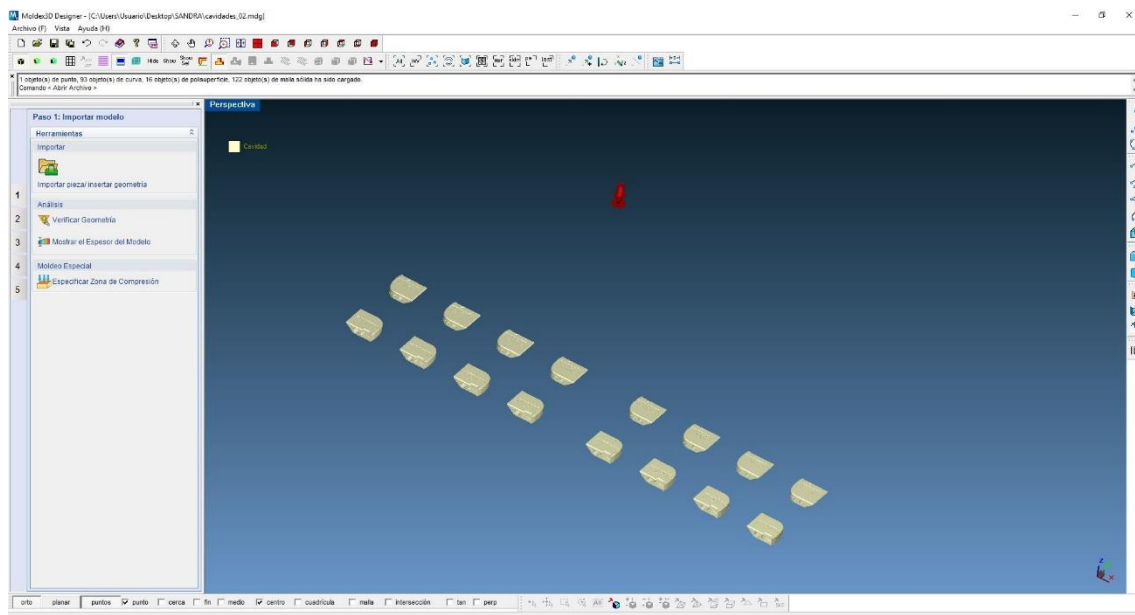


Fig. 5.8 Conjunto de cavidades importadas

Con esto, se termina el paso número 1.

En el paso número 2 se construirá el canal de alimentación de material, o cámara caliente. Se debe tener en cuenta que la cámara caliente es un sistema que mantiene a cierta temperatura el material que se va a inyectar mientras este corre por el interior del molde, y esto es posible gracias a unas resistencias que incorpora en el interior. A medida que los conductos se ramifican para pasar de un único canal de inyección en el exterior del molde a cada una de las entradas que existen en cada cavidad, estos reducen su diámetro y por tanto su tamaño. Existe un punto

muy cercano a la pieza a partir del cual, por cuestiones de espacio, no pueden emplazarse las resistencias que mantienen caliente el material, y este avanza sin ser calefactado. Con el fin de ser fiel a esta realidad, parte del tramo de cámara caliente que colinda con la pieza se va a tomar como colada fría en lugar de colada caliente, a diferencia del resto del conducto. También se debe tener en cuenta que cuando en la realidad haya estrangulación del canal, es decir, una variación pronunciada del diámetro del canal, se representará como un canal de diámetro variable; en el resto de casos como un canal de diámetro constante.

En este paso se debe tener en cuenta la petición del cliente respecto a cuál debe ser la posición del punto de inyección, por eso no se emplea la función de entrada aleatoria que ofrece el programa. Se comienza pues introduciendo las coordenadas de la entrada del canal de alimentación. Este paso se realiza en una única pieza y se copia en el resto de ellas, teniendo en cuenta la distancia que las separa.

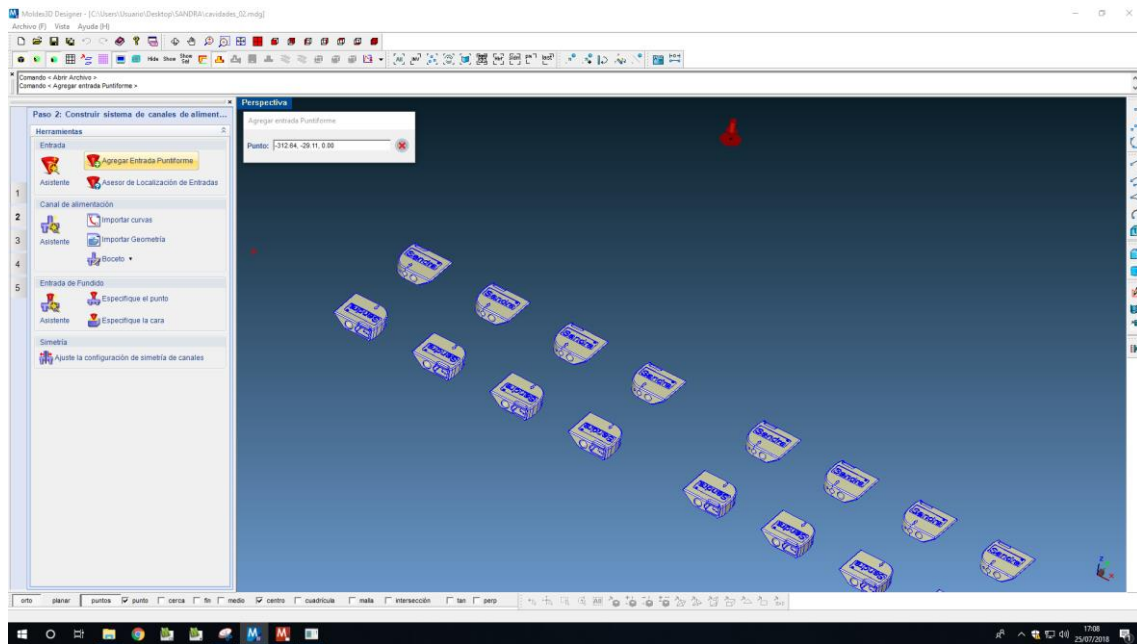


Fig. 5.9 Agregación entrada material

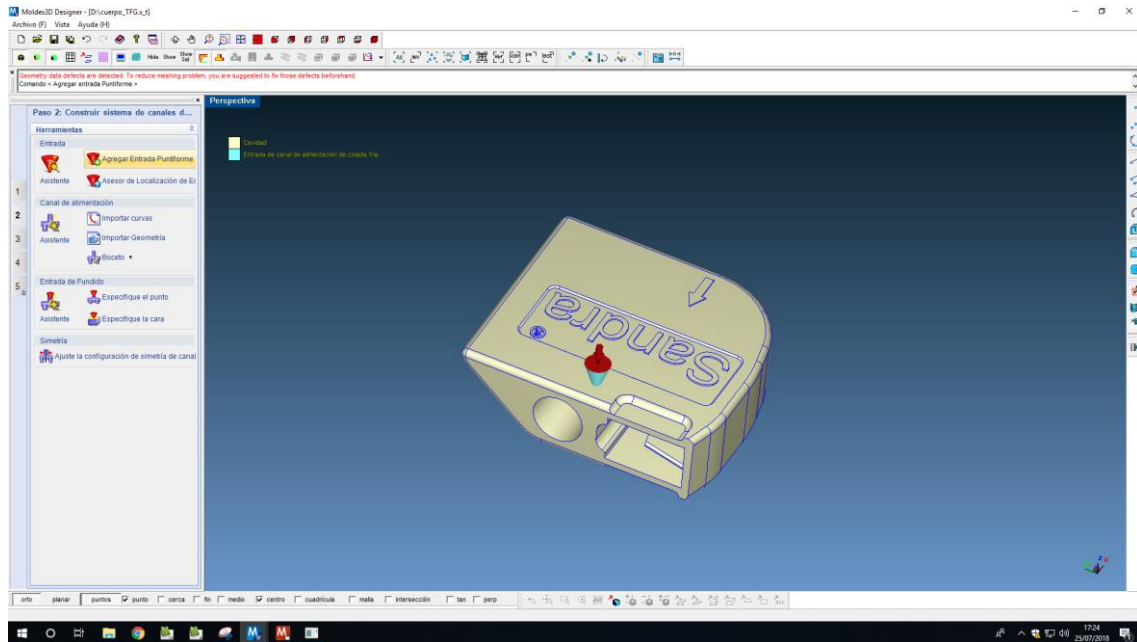


Fig. 5.10 Entrada de material agregada

Se observa en este paso la entrada en el punto especificado, y detectada por el programa como “entrada de canal de alimentación de colada fría”.

Una vez posicionada la entrada, comienza la construcción del canal de alimentación como tal. Para ello se hace clic en boceto > línea y se crea una línea rastreando como punto inicial el punto final de la entrada, e introduciendo las coordenadas del punto final teniendo en cuenta la altura que debe tener el tramo en cuestión.

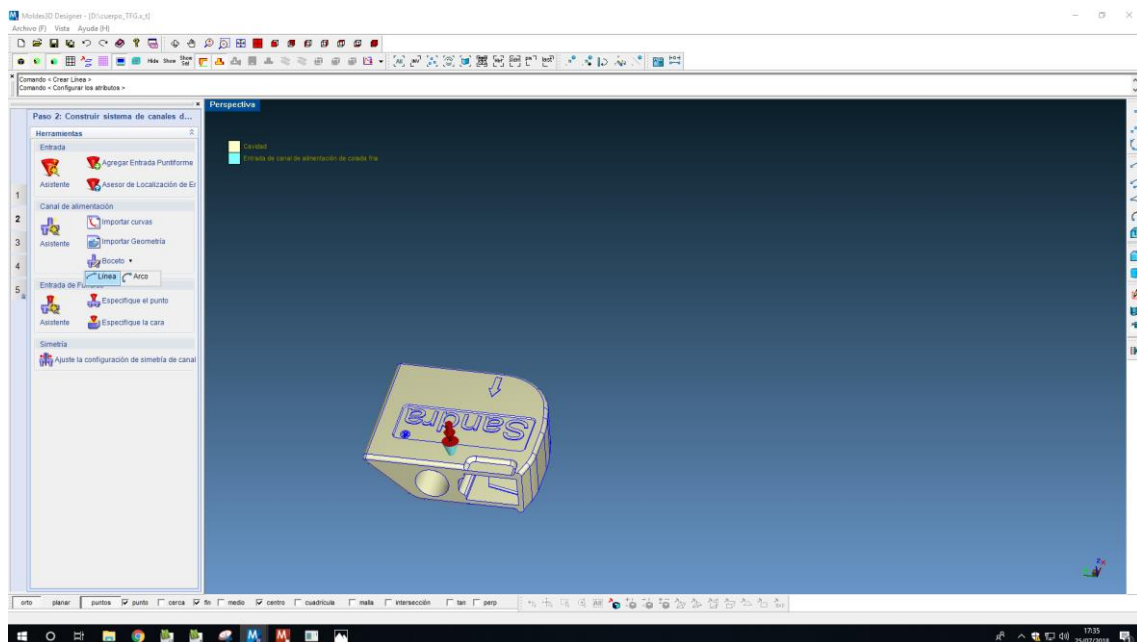


Fig. 5.11 En canal de alimentación: boceto > “Línea”

A continuación aparece una ventana de propiedades o atributos, donde se introducen las características que tiene el canal: de qué tipo de canal se trata, la geometría que tiene, y los diámetros en caso de ser circular. Todo esto puede ser posteriormente editado haciendo clic

derecho sobre el objeto que se desee modificar y seleccionando la opción de “Editando los atributos del moldeo por inyección”.

En el caso modelo, se ha determinado que se trata de un conducto de sección circular y de colada fría debido a su cercanía a la pieza, como se ha explicado anteriormente.

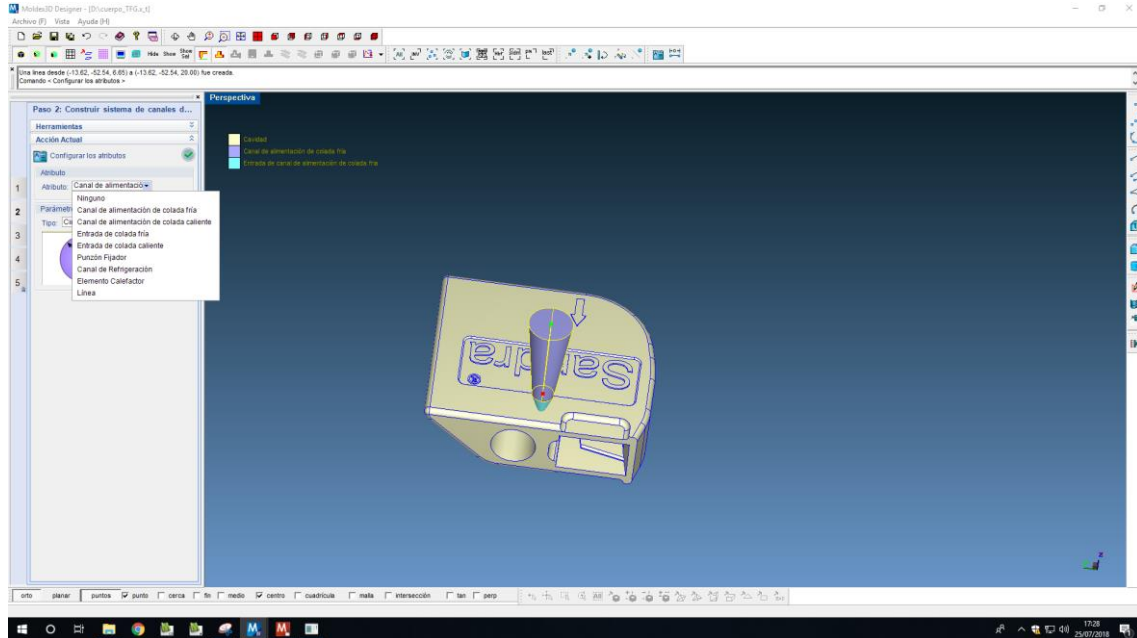


Fig. 5.12 Editando atributo colada caliente

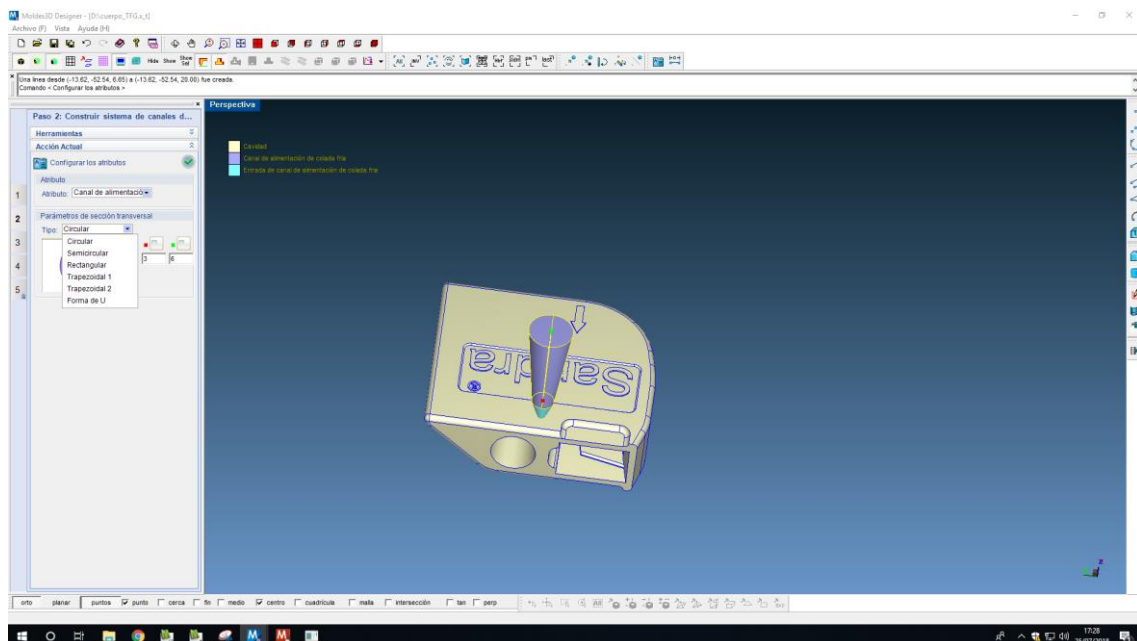


Fig. 5.13 Editando sección transversal colada caliente

Puesto que en la realidad existe un estrechamiento pronunciado del diámetro del canal de refrigeración, lo representamos como un canal con diámetro variable.

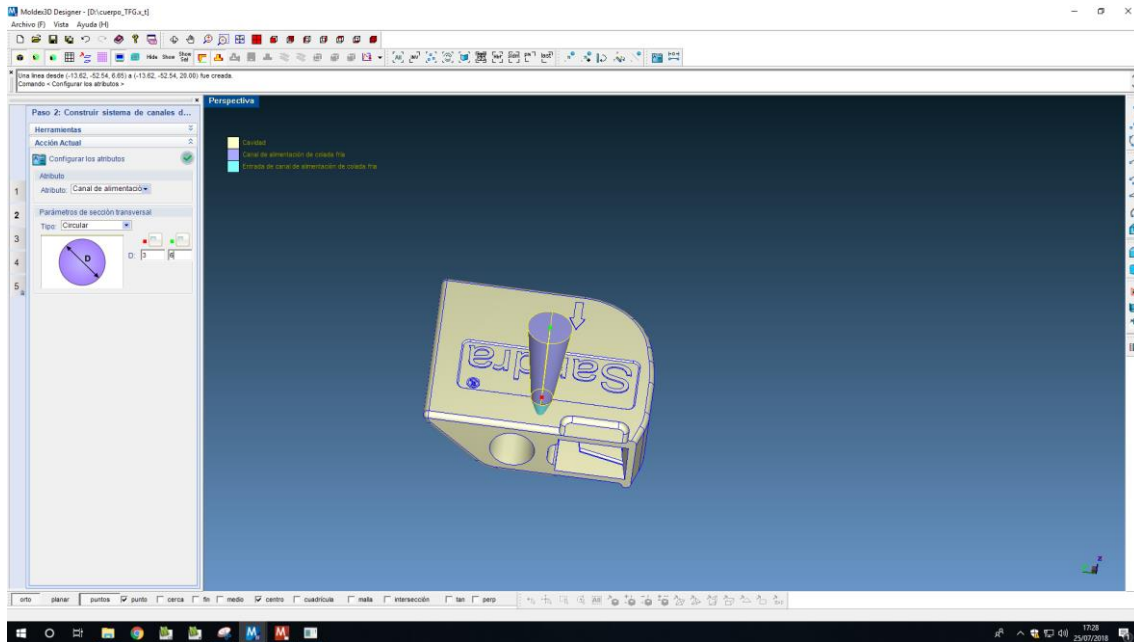


Fig. 5.14 Editando diámetro canal colada caliente

Se construye el resto de canal de cámara caliente tramo a tramo siguiendo el mismo procedimiento, con la salvedad de que se asignará como atributo “canal de alimentación de colada caliente”, debido a que sí existen resistencias en el resto de cámara caliente.

Se recomienda hacer la construcción del canal de alimentación por bloques, de forma que se construya un único tramo de cada tipo y se copie en el resto de posiciones que se necesite. De este modo es posible ahorrarse trabajo de repetición: en lugar de tener que crear 16 canales exactamente iguales cambiando la posición de estos, se crea uno solo que será copiado y emplazado donde corresponda.

El resultado obtenido del proyecto modelo una vez construido el sistema de canal caliente es el siguiente:

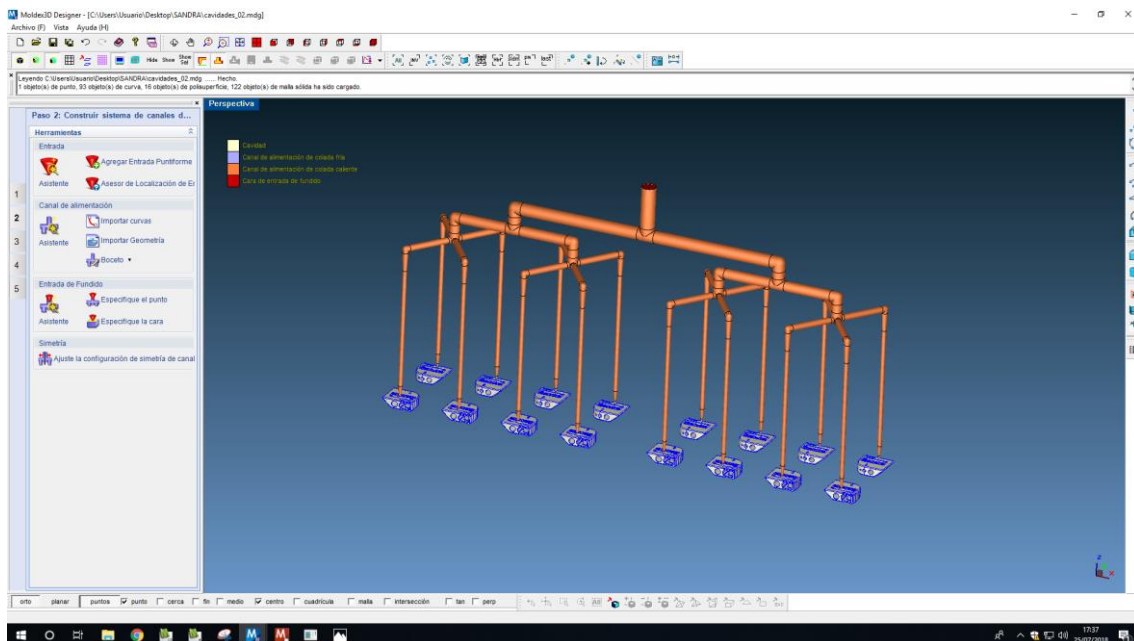


Fig. 5.15 Diseño sistema de colada caliente terminado

Continuando en el paso 2, se debe determinar el punto por el que entra el material a la cámara caliente. El único punto por el que se inyecta material al molde, y a partir del cual mediante los canales ramificados llega a cada una de las cavidades.

Este paso puede realizarse indicando manualmente la localización del punto en cuestión: ya sea rastreando este, o introduciendo las coordenadas. No obstante, en este caso sí se recomienda utilizar el asistente que ofrece el programa ya que en la mayoría de casos es preciso.

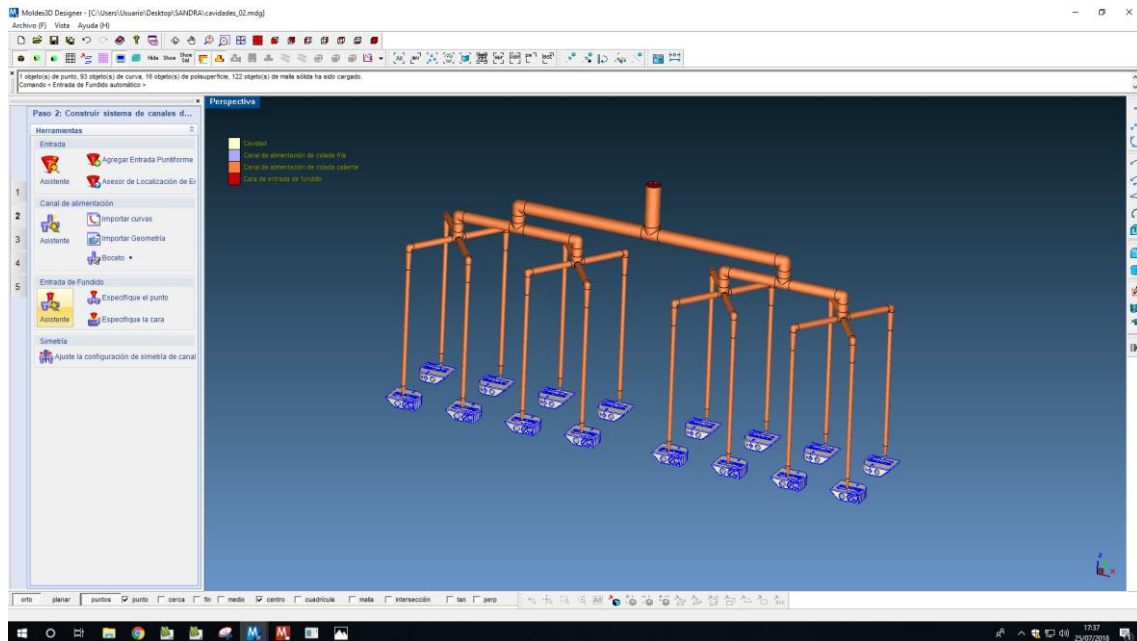


Fig. 5.16 En entrada de fundido, “Asistente” de entrada fundido

En el caso modelo, se ha utilizado el asistente, y el resultado obtenido ha sido el deseado. A continuación se muestra el punto de entrada del material al canal caliente.

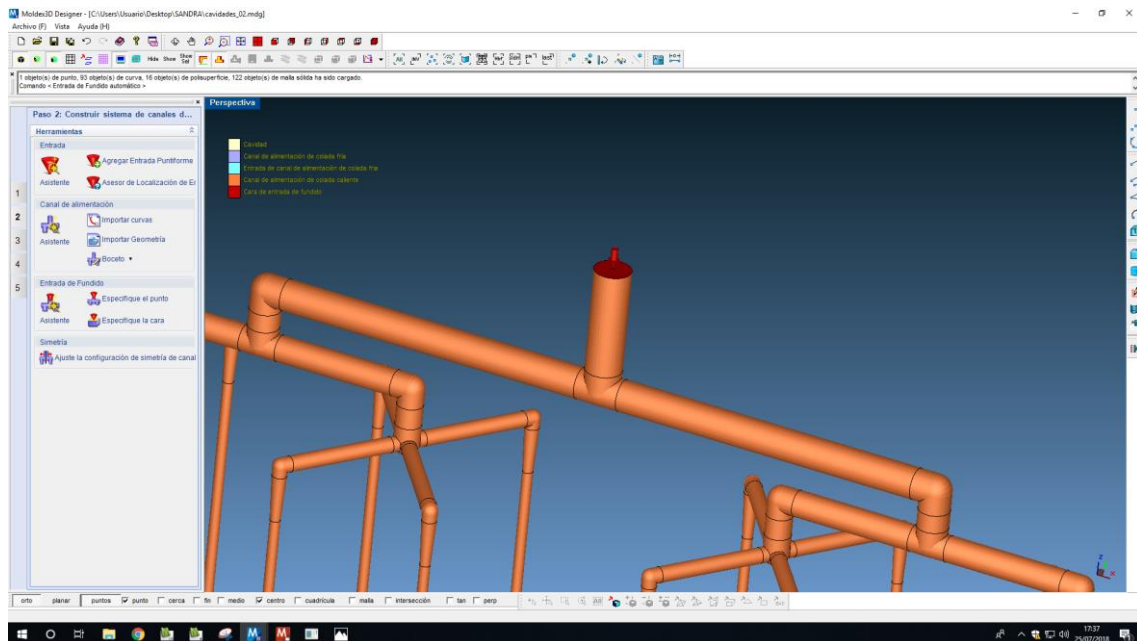


Fig. 5.17 Punto de entrada de fundido introducido



En este punto de la versión V01 – INICIO ya se tiene diseñado todo lo que se quería simular, por lo que el siguiente paso será realizar la malla, lo que en el programa se corresponde con el paso 4. Se conoce como malla a la división de la geometría a analizar en múltiples partes, generalmente con forma triangular o piramidal. Este sistema se emplea en los análisis que utilizan el método de elementos finitos, como es el caso de Moldex3D. El mallado es preparado en el programa de Moldex3D Designer y se utiliza para realizar el análisis en Moldex3D Project. El modelo de la malla varía en función del tamaño de la pieza y de lo preciso que se necesita que sea el análisis, entre otras cosas. A grandes rasgos, puede decirse que a mayor número de divisiones y con las formas geométricas obtenidas de la división lo más homogéneas posibles, mejores resultados se alcanzarán. También es cierto que a mayor número de divisiones de los cuerpos para crear la malla, mayor proceso de cálculo debe llevar a cabo el programa y más tardará en realizarlo. Es por esto que se debe encontrar el equilibrio entre los cuerpos que se tiene y el tipo de mallado. Se recomienda seguir el siguiente principio, según el tamaño de pieza:

	Tamaño normal (< 500mm)	Tamaño grande (> 500mm)
Tamaño malla	1/2 de por defecto	Por defecto
Elementos estimados	Menos de 0,3 millones	Menos de 0,3 millones
Tipo de malla	5 capas BLM	5 capas BLM
Relación de espesor	1 - 1,5	0,5 - 1
Elementos sólidos sugeridos	Menos de 2M	Cerca de 2M

Tabla 1 Parámetros de mallado

Se deberá generar mallado para toda la geometría introducida en el programa, no únicamente para la pieza. Un paso importante antes de generarla, es modificar el tipo de malla para construirla según las sugerencias indicadas. Se variará según se necesite en el apartado de “Mallando” en el paso 4.

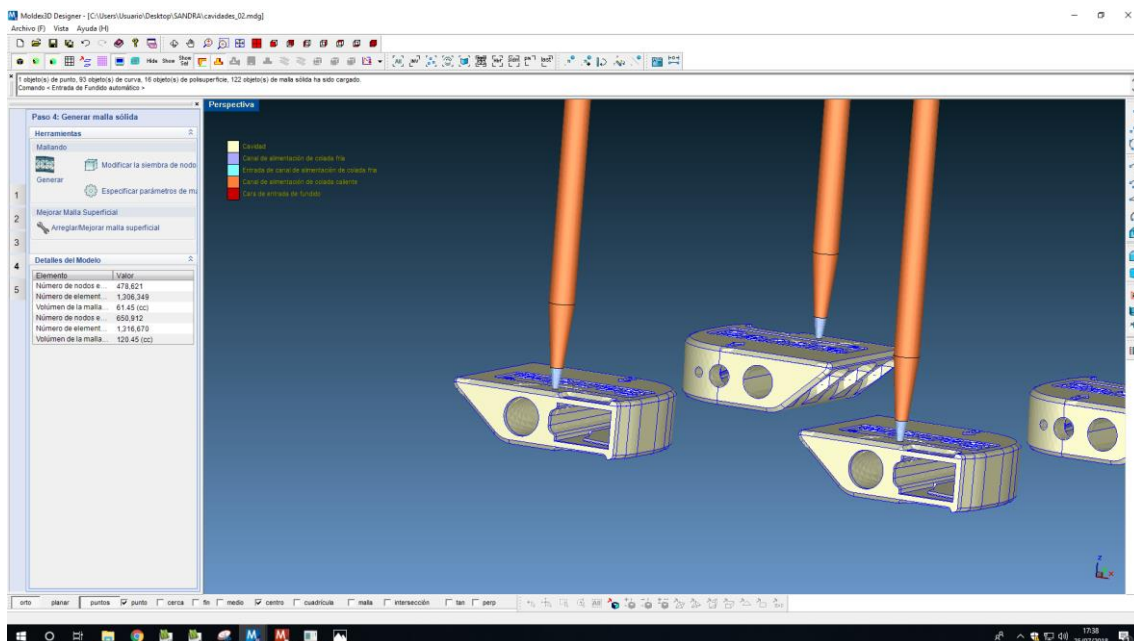


Fig. 5.18 Interfaz del paso 4

Haciendo clic en “Modificar la siembra de nodos” se puede modificar el tamaño de la malla. El programa estima un tamaño, el cual no se cambiará en el caso de piezas grandes y se reducirá a la mitad en piezas pequeñas, como se indica en la tabla 1. En el caso modelo se trata de una pieza pequeña, luego se deberá modificar el tamaño que aparece por defecto reduciéndolo a la mitad.

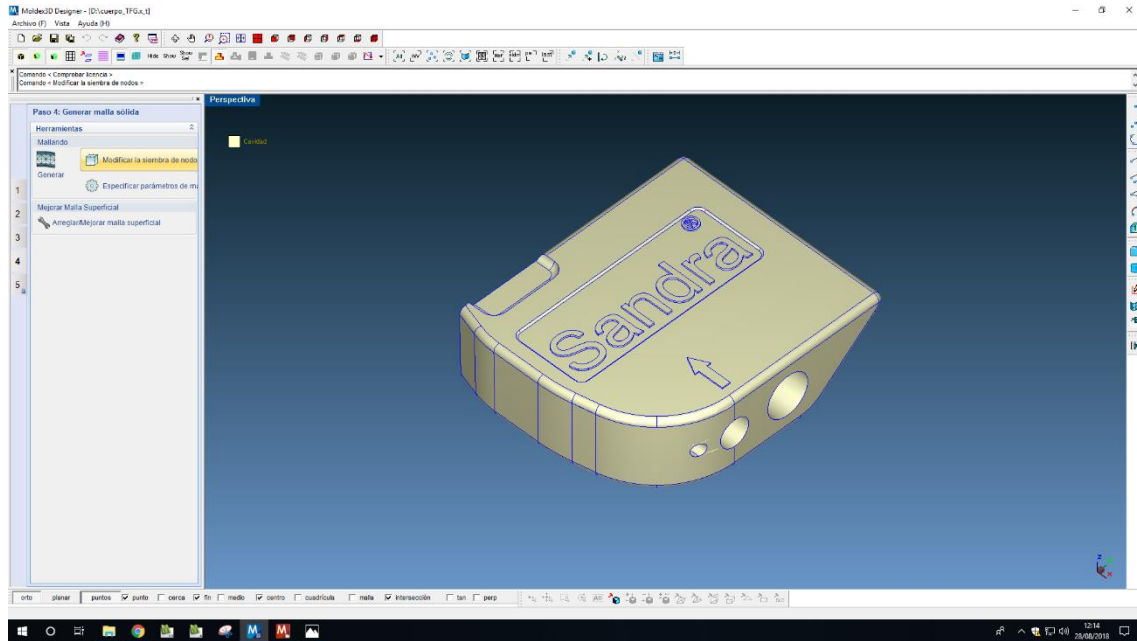


Fig. 5.19 En paso 4, “Modificar la siembra de nodos”

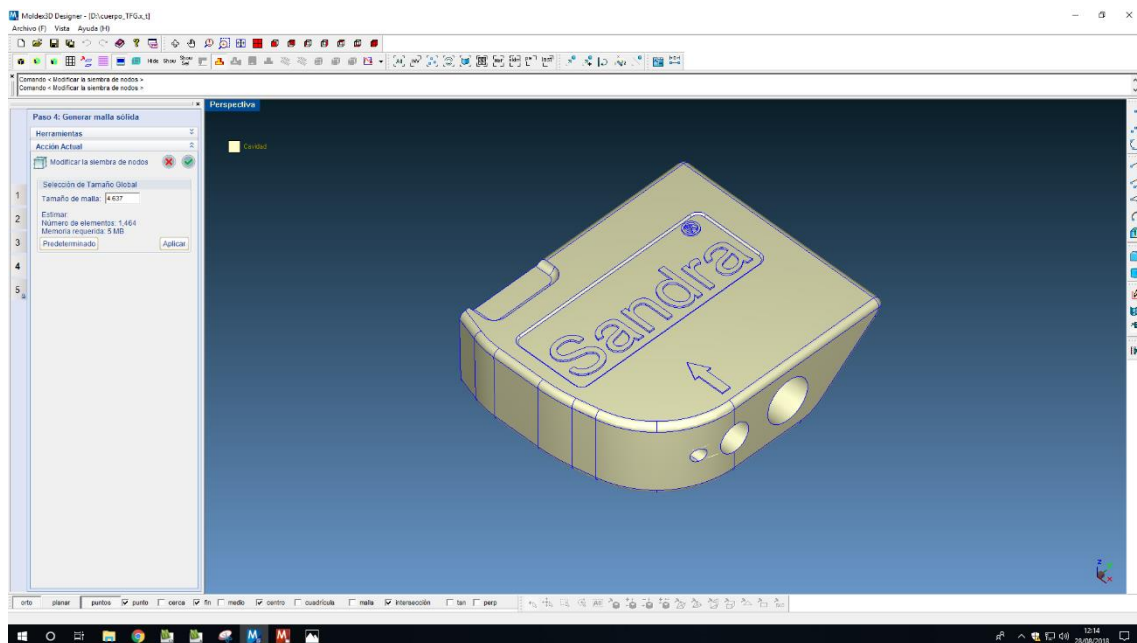


Fig. 5.20 Tamaño de malla por defecto

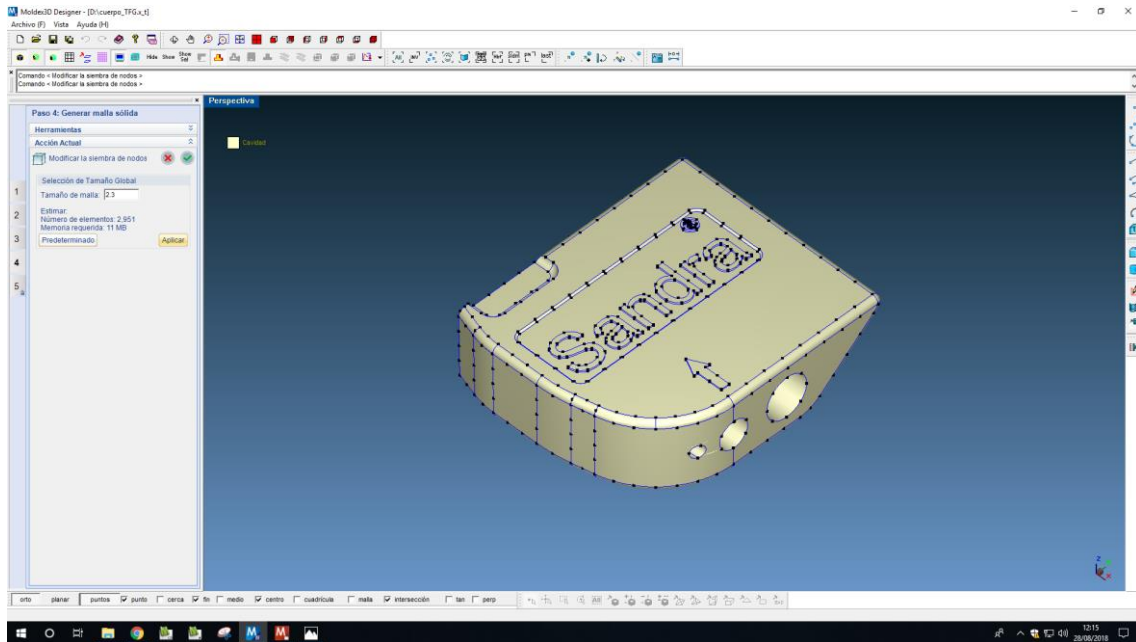


Fig. 5.21 Tamaño de malla modificado

Cuando se hace clic en “Aplicar” el programa ofrece la opción de modificar la posición de los nodos manualmente, en caso de no estar bien distribuidos. Para ello, se seleccionará la arista considerada y se aumentará o disminuirá el número de segmentos según se quieran más o menos nodos en esta. Estos pasos se repetirán en otras aristas tantas veces como sea necesario. Cuando se considere que los nodos son los adecuados se presionará la tecla Esc.

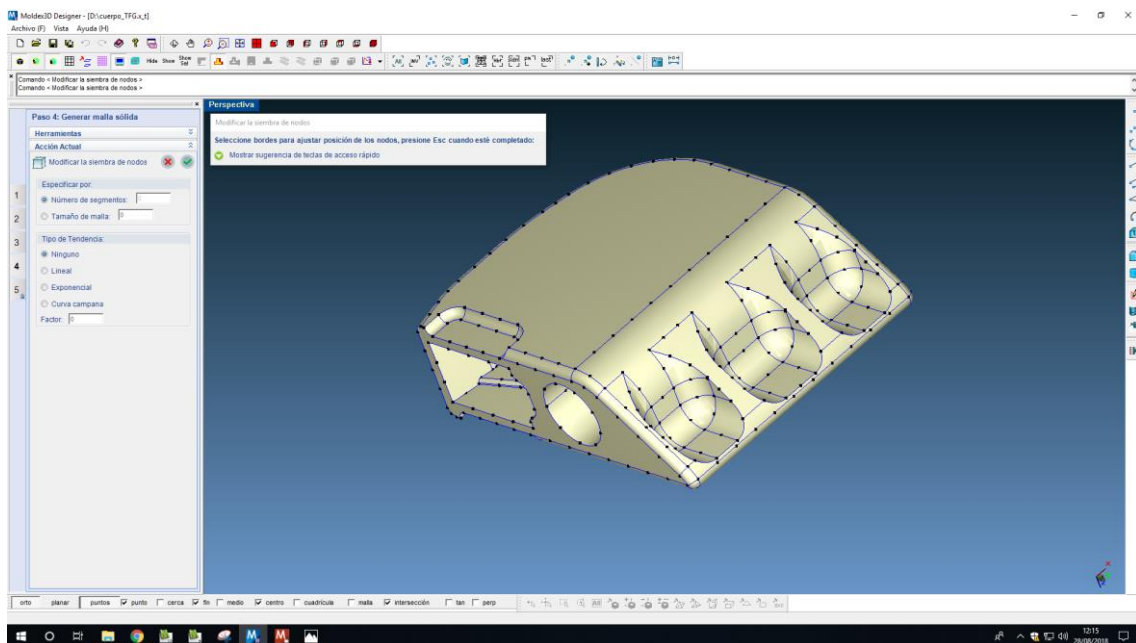


Fig. 5.22 Ajustar posición de nodos: seleccionar borde

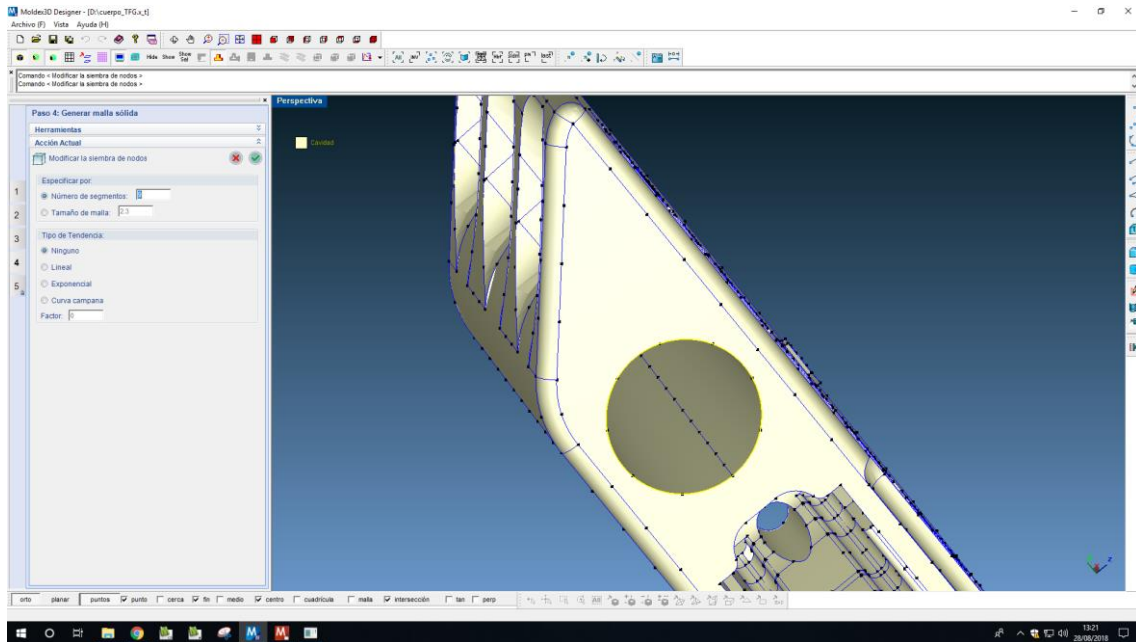


Fig. 5.23 Ajustar posición de nodos: borde seleccionado

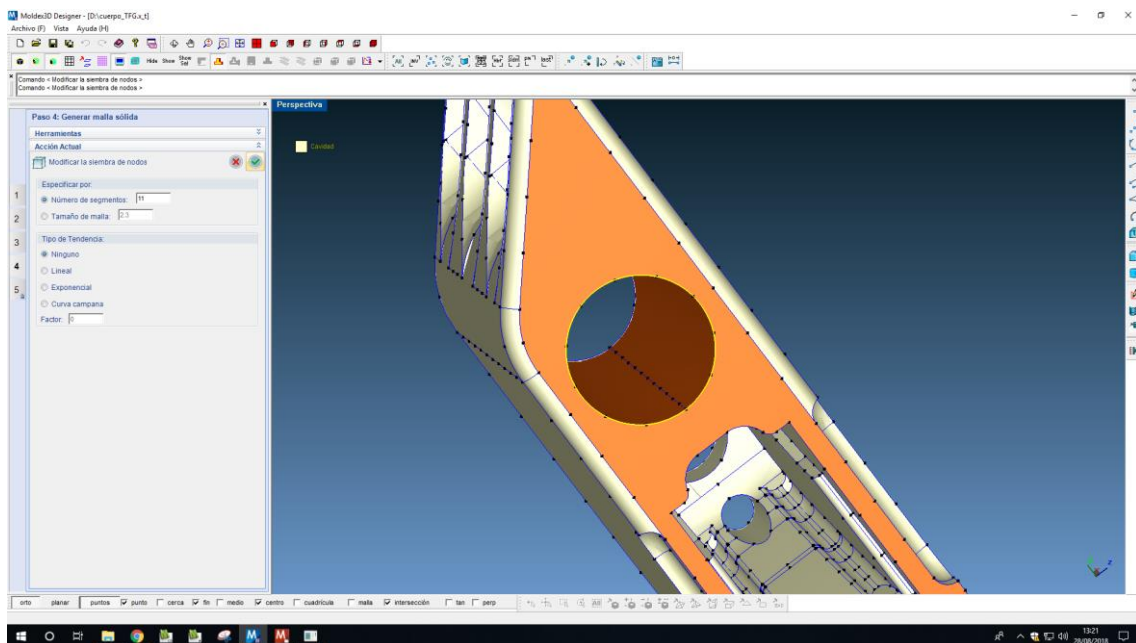


Fig. 5.24 Ajustar posición de nodos: número de segmentos modificado

El resto de parámetros a modificar del mallado como el tipo de malla o la relación de espesor, también se hace en el apartado “Mallado” del paso 4, haciendo clic en “Especificar parámetros de malla”.

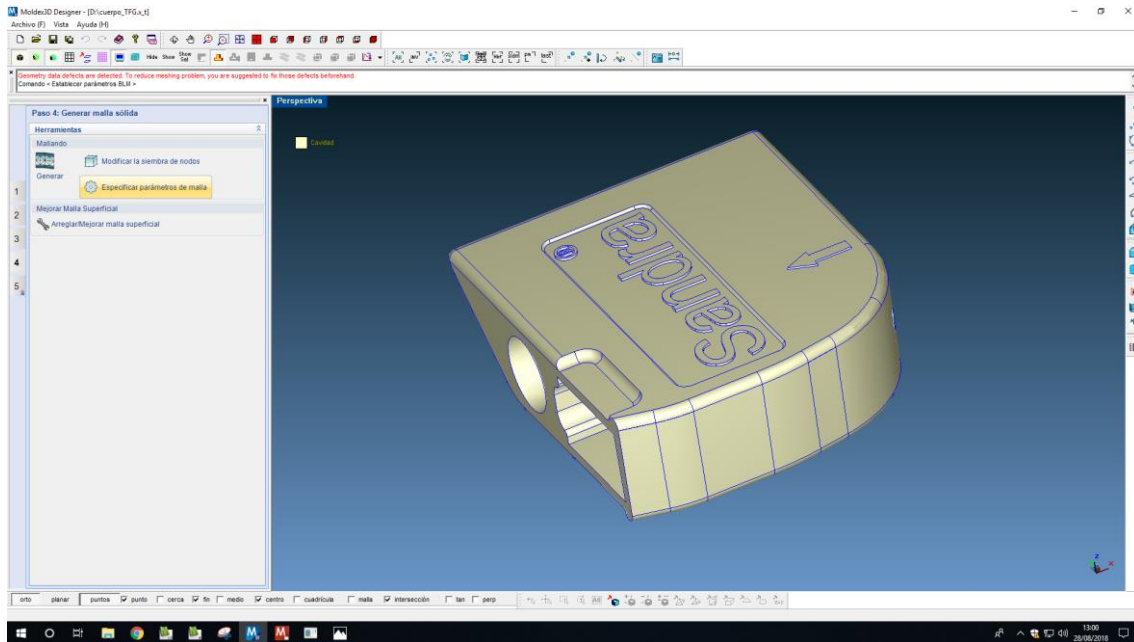


Fig. 5.25 En paso 4, "Especificar parámetros de malla"

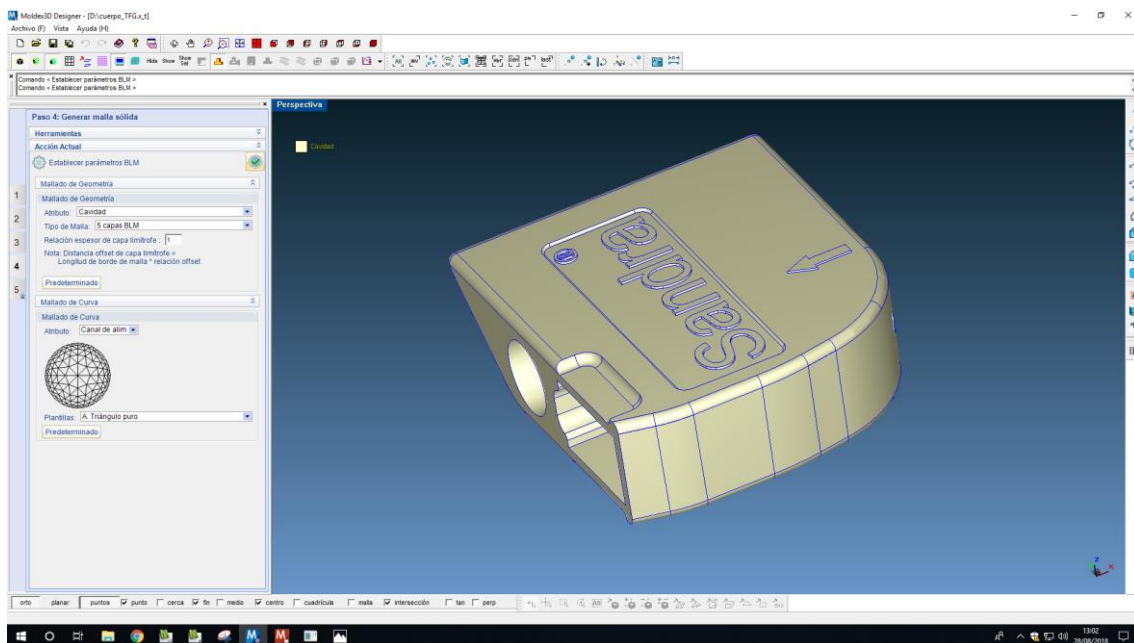


Fig. 5.26 Parámetros de malla modificados

Una vez se tiene la siembra de nodos configurada como corresponde, se puede comenzar con el mallado. Es un proceso costoso en el que empieza a trabajar el programa generando la malla automáticamente, pero existe una gran probabilidad de que por temas de geometría se creen sectores de malla corrompida y se deba arreglar de forma manual. Más adelante se explicará cómo.

Para iniciar el mallado se clic en "Generar" y aparece una lista de elementos que necesitan ser mallados. Se recomienda generar la malla de cada elemento que lo necesite de forma independiente, para tener más control sobre los errores e ir solucionando los problemas poco a poco. Para ello, se selecciona el elemento que se desea mallar en cada caso y se hace clic en

“Generar”. Este paso puede llevar un tiempo. Se repetirá el proceso para cada elemento hasta que surja un error y deba de solventarse, como se muestra a continuación.

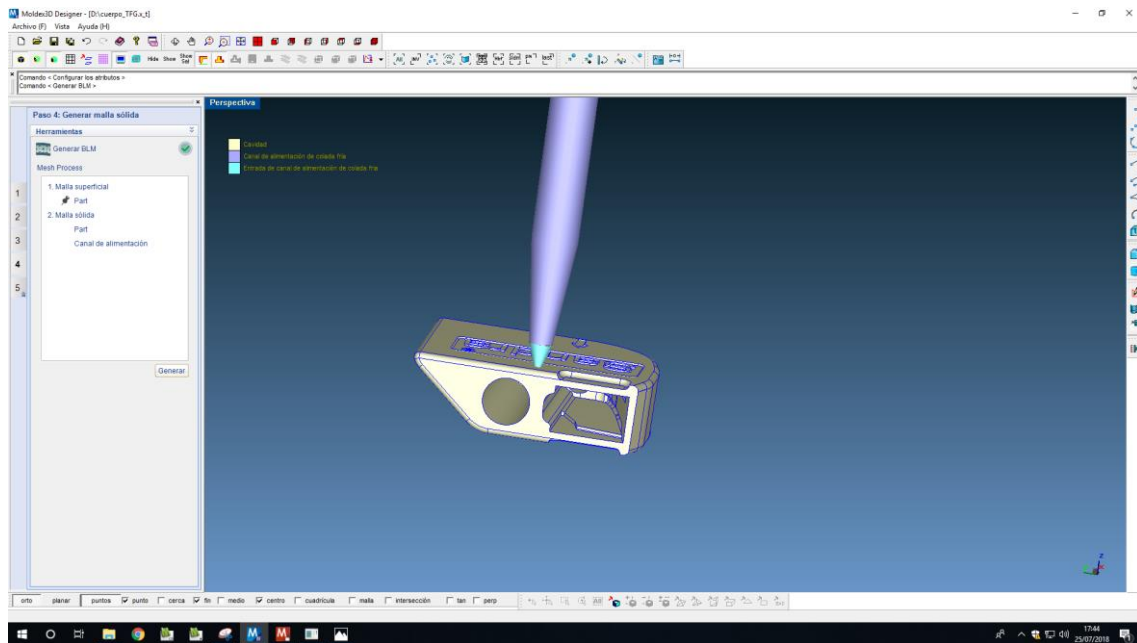


Fig. 5.27 En paso 4, “Generar” > selección de elemento a mallar

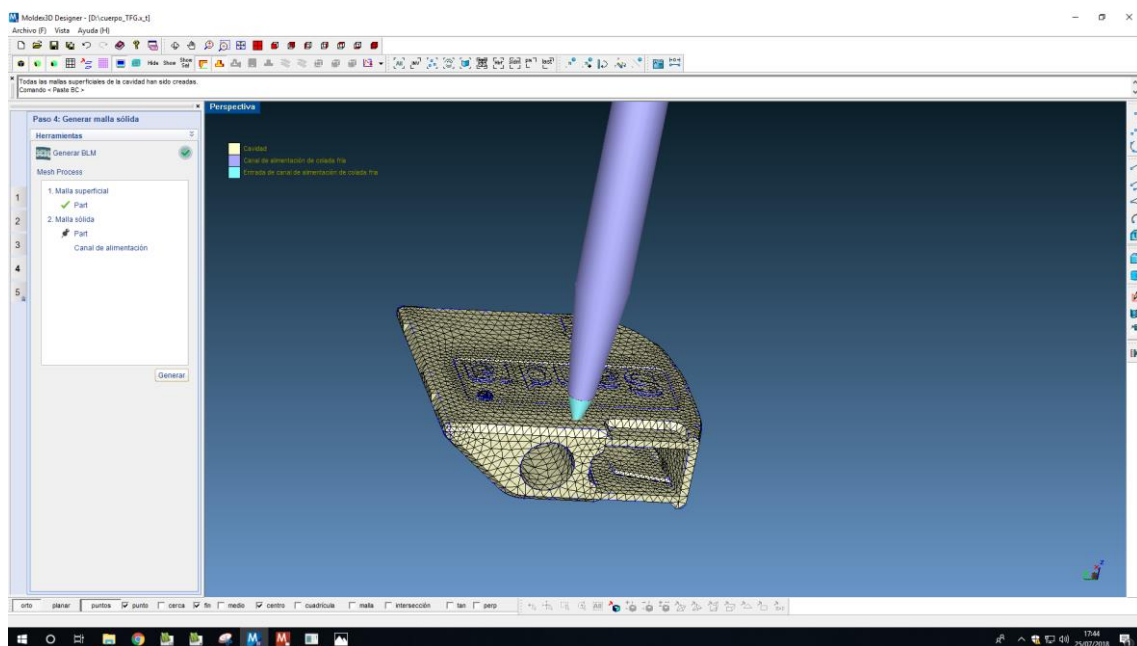


Fig. 5.28 En paso 4, “Generar” > selección de elemento a mallar

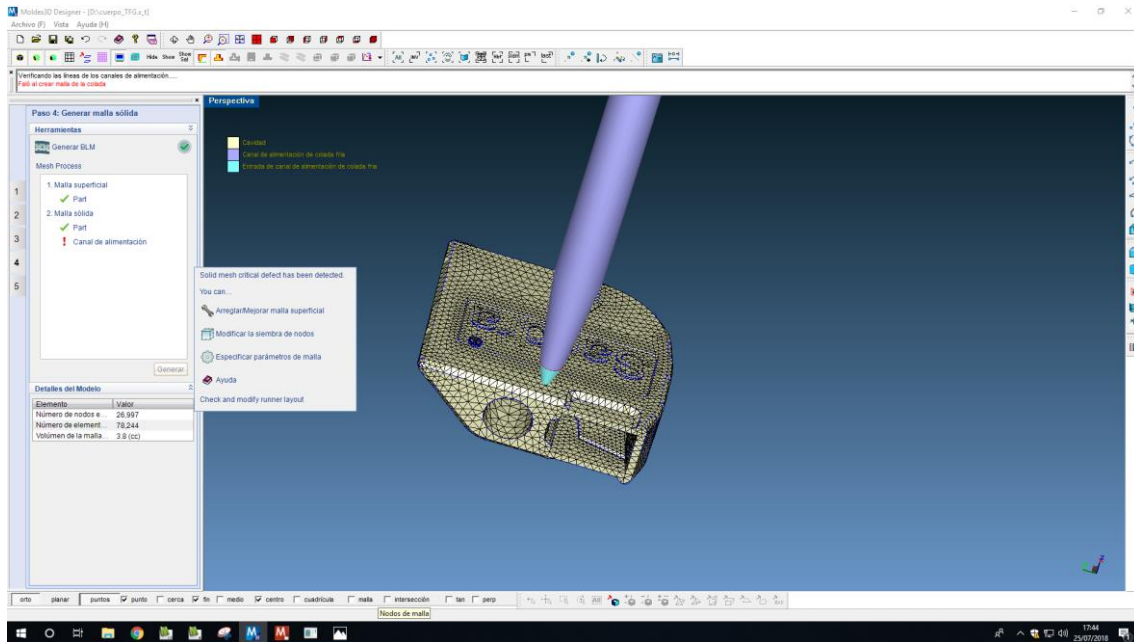


Fig. 5.29 Fallo en mado

Una vez ha salido el error con el mensaje de alerta que ofrece diferentes opciones, se selecciona “Arreglar/mejorar malla superficial”, aparece la siguiente ventana con diferentes comandos correctores de la malla, y comienza el proceso de repararla.

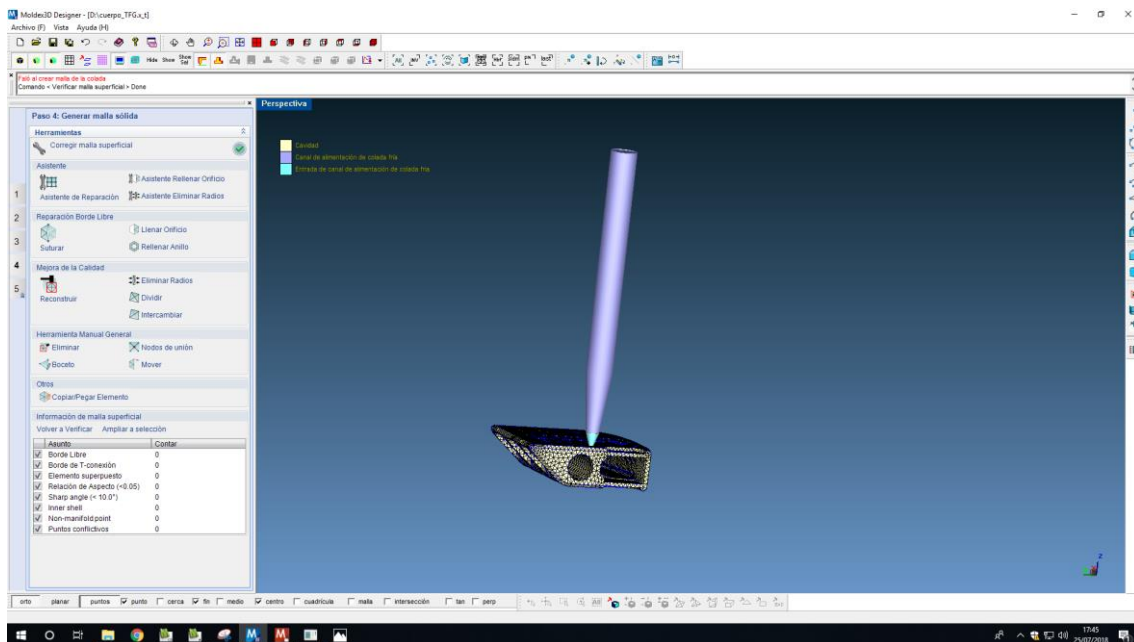


Fig. 5.30 Interfaz de “Arreglar/mejorar malla superficial”

Se va a mostrar cómo se repara la malla de la pieza, por ser un ejemplo más representativo.

Por lo general, el asistente de reparación de mallas genera errores similares a los que han surgido al generar la malla, por lo que se recomienda reparar la malla de forma manual. Se comienza buscando el sector de la malla dañado, el cual está resaltado con un tono rojizo. Una vez localizado se suprime para poder generar después una nueva, dejando así una parte de la geometría sin malla, a lo que el programa se refiere como “borde libre”.

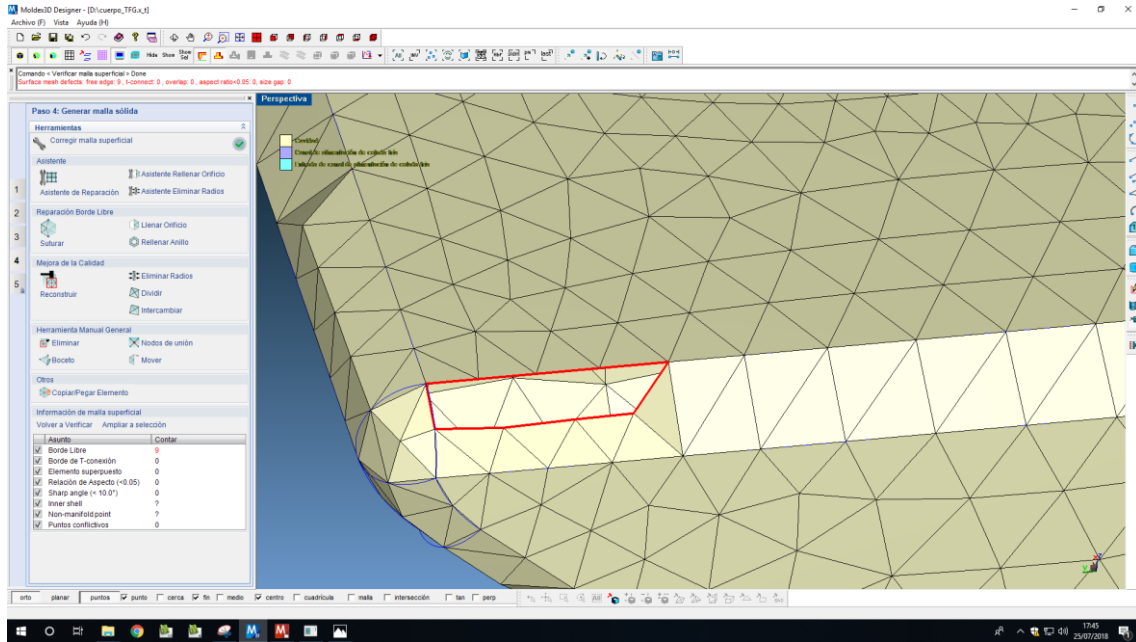


Fig. 5.31 Borde libre

Se procede a llenar el orificio que ha quedado sin mallar con el comando “Llenar orificio” en el apartado “Reparación de borde libre”. Hacemos clic en este y reclama que se indique qué borde libre se desea reparar.

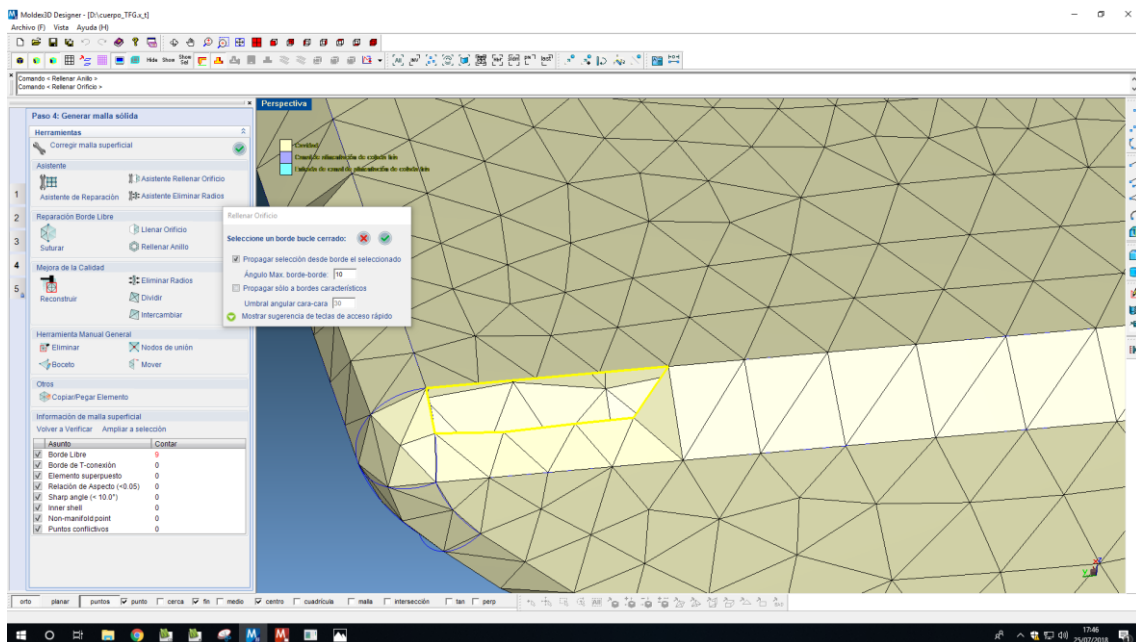


Fig. 5.32 En reparación de borde libre > “Llenar orificio” > selección del borde libre

Una vez seleccionado el borde libre a rellenar, aparecen los nodos situados en el borde libre que se deberán unir para generar la nueva geometría de la malla. Se entiende como nodos los vértices de las figuras geométricas que pertenecen a la malla. Los nodos se unen seleccionando los dos puntos con los que se desea formar una nueva superficie de malla y presionando Enter.



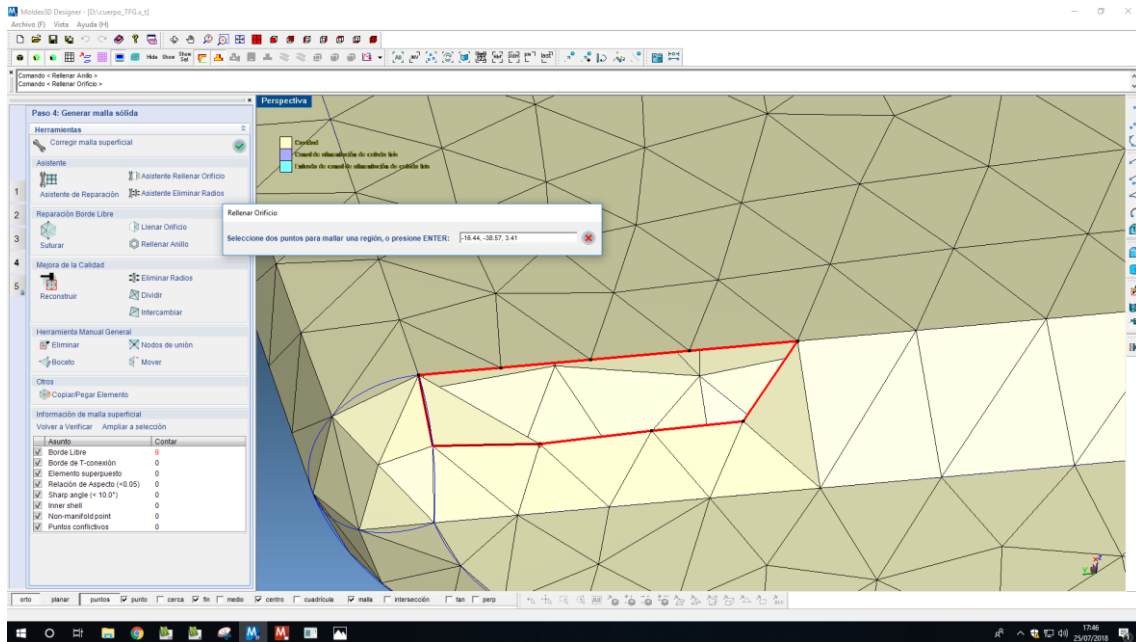


Fig. 5.33 Mallado de una región con “Rellenar orificio”

Es posible crear nuevos nodos de forma sencilla con la opción de “Dividir” que se ofrece en el apartado “Mejora de la calidad”. Hacemos clic en este comando y seleccionamos la celda que se desea dividir en dos. De este modo, se ha creado una nueva geometría con sus nuevos vértices, es decir, con nodos nuevos.

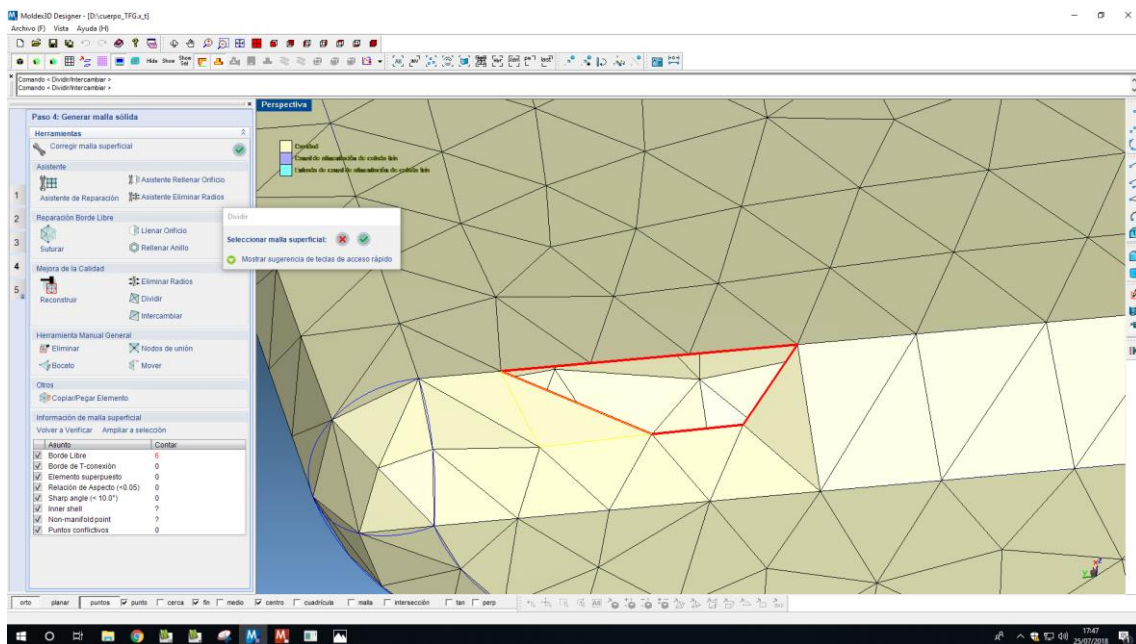


Fig. 5.34 En mejora de la calidad > “Dividir”> selección de superficie a dividir

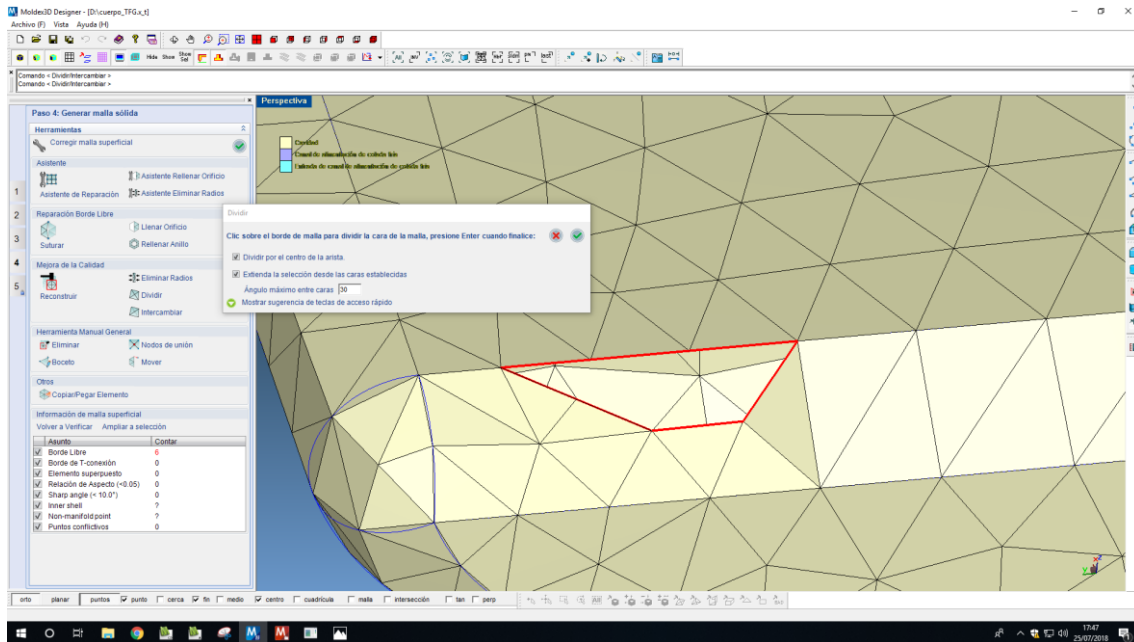


Fig. 5.35 En mejora de la calidad > “Dividir” > selección del borde a dividir

Una vez creados los nuevos nodos, se continua trabajando con el comando “Llenar orificio”, volviendo a utilizar comandos como el de “Dividir” tantas veces como sea preciso para conseguir una geometría uniforme, con celdas de aproximadamente el mismo tamaño y aspecto. Se sigue con esta dinámica hasta que únicamente quedan tres nodos por emparejar. En este punto se utiliza el comando “Asistente rellenar orificio” que completa el borde abierto restante, reparando el sector de la malla en el que se estaba trabajando por completo.

El procedimiento es el mismo para todos los sectores de malla corruptos. Cuando se hayan reparado todos ellos, se dará por finalizado el mallado de ese elemento y se volverá a comenzar el proceso con el mallado de otro de los elementos, hasta finalmente haberlos mallado todos.

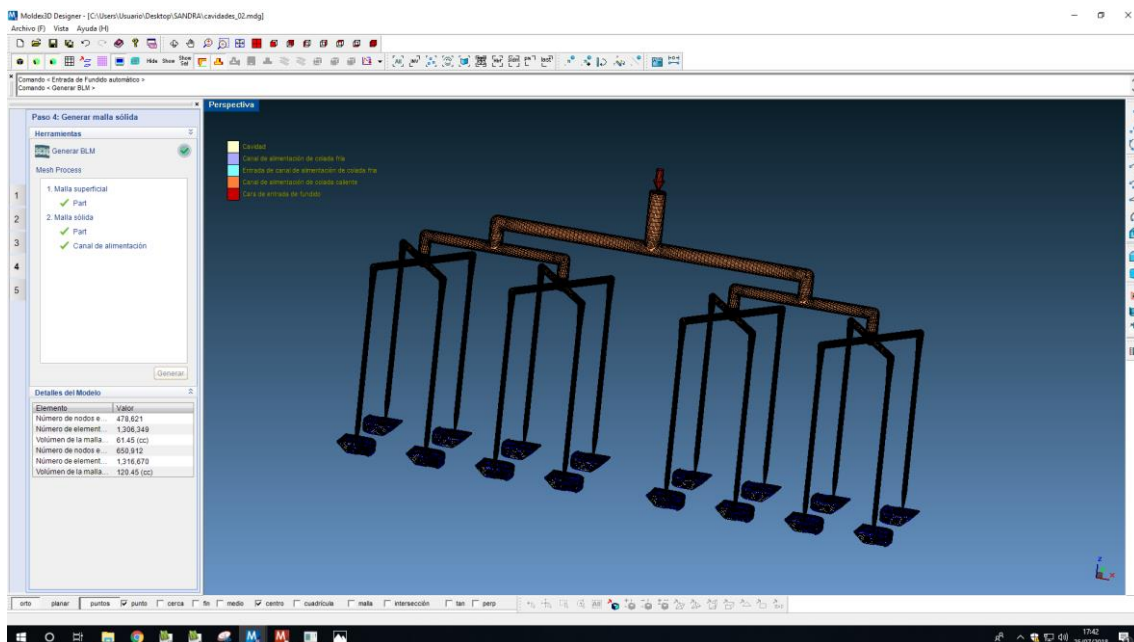


Fig. 5.36 Sistema totalmente mallado

En el momento en el que se tiene generada la malla de todos los elementos introducidos en Moldex3D Designer, se ha terminado con el paso 4. Se finaliza pues el proceso de diseño con el paso 5. En este se exporta la malla creada a un archivo con extensión .MFE, con el que trabaja el programa Moldex3D Project.

Se hace de forma sencilla, haciendo clic en “Guardar la malla como”. Automáticamente se abre un cuadro de diálogo de Windows donde se seleccionará la carpeta de destino del archivo a exportar, y donde se le podrá dar nombre a este.

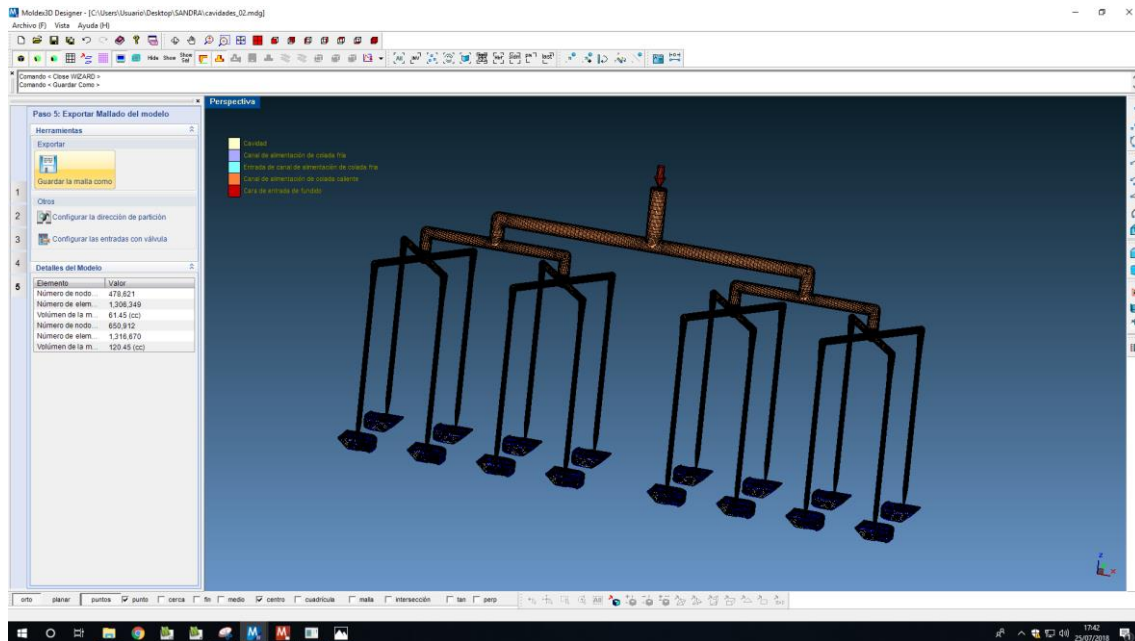


Fig. 5.37 En paso 5, “Guardar la malla como”

En este punto, se da por finalizado el trabajo con el programa de Moldex3D Designer.

#### V01 MOLDEX3D PROJECT

Comienza ahora el trabajo con el segundo módulo del programa Moldex3D, con el apartado de simulación. Se comenzará abriendo el programa y creando un nuevo proyecto, para ello se hace doble clic en la barra del lateral izquierdo seleccionando la opción de crear un nuevo proyecto.

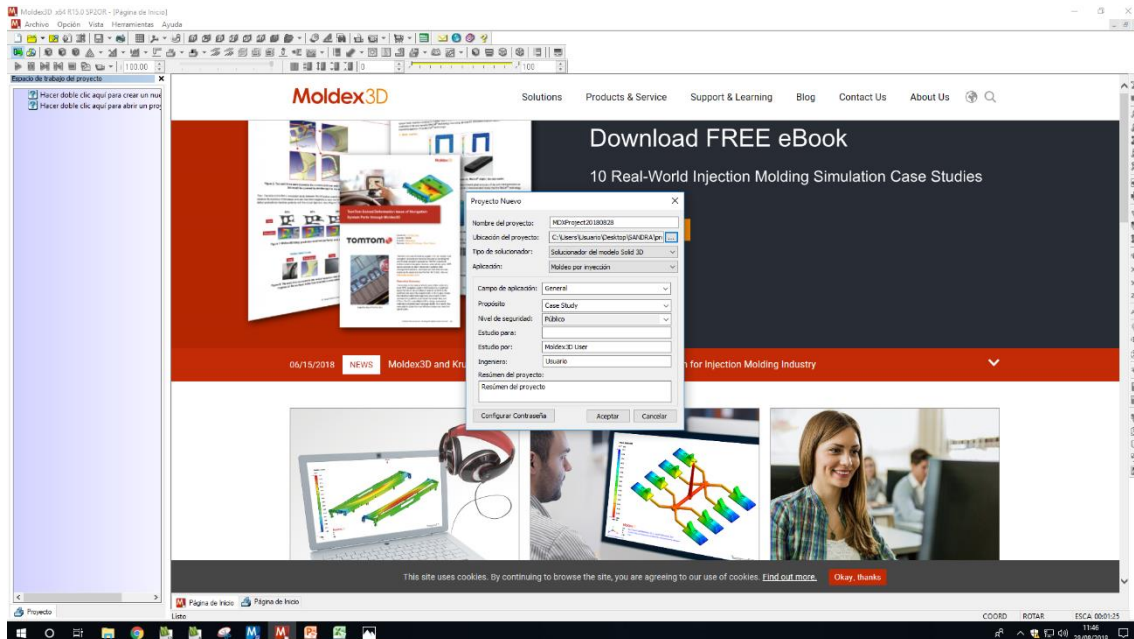


Fig. 5.38 Inicio de nuevo proyecto en Moldex3D Project

Se introducen los datos del proyecto que correspondan, y se clic en “Aceptar”. A continuación el programa indica automáticamente que se inicie la introducción de los datos para la primera ejecución. Dentro de un mismo proyecto se llevarán a cabo las simulaciones de las diferentes versiones que sea necesario realizar, cada una de ellas será una ejecución independiente. Por tanto, se crea ahora la ejecución número 1 correspondiente a la versión 01 – inicial. A la hora de crear nuevas ejecuciones aparece una ventana con múltiples pestañas que se completan sucesivamente: “opción”, “malla”, “material”, “proceso”, “computación”, “verificar” y “resumen”.

En “opción” se selecciona si se trata de una ejecución nueva o una que se desee importar, por lo general, se crean nuevas ejecuciones. También se introduce un texto identificativo de la ejecución, con el fin de reconocerlas y diferenciarlas entre ellas. En el caso modelo, se trata de una nueva ejecución. Su descripción es “Versión V01 – inicio”.

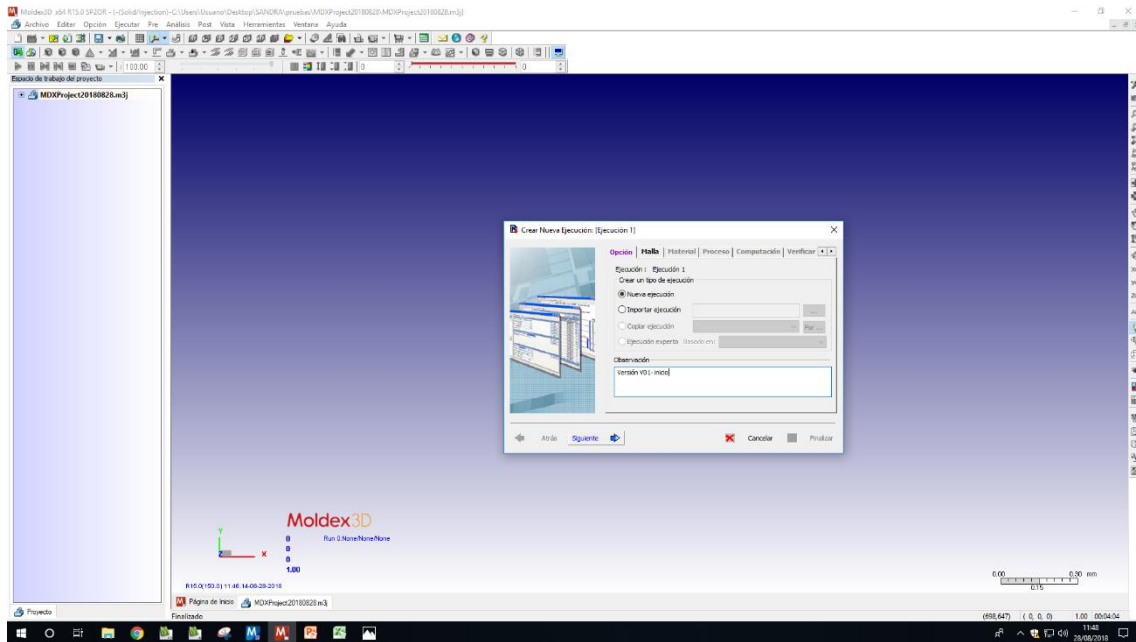


Fig. 5.39 Crear nueva ejecución > ventana de “opción”

En la pestaña de “malla” es donde se debe hacer referencia el archivo .MFE que se ha exportado anteriormente en el programa de Moldex3D Designer. A partir de este, el programa Moldex3D Project obtiene la malla a analizar. En caso de querer simular una misma malla más de una vez en diferentes ejecuciones dentro del mismo proyecto, dicha malla aparecerá en el desplegable a modo de acceso directo.

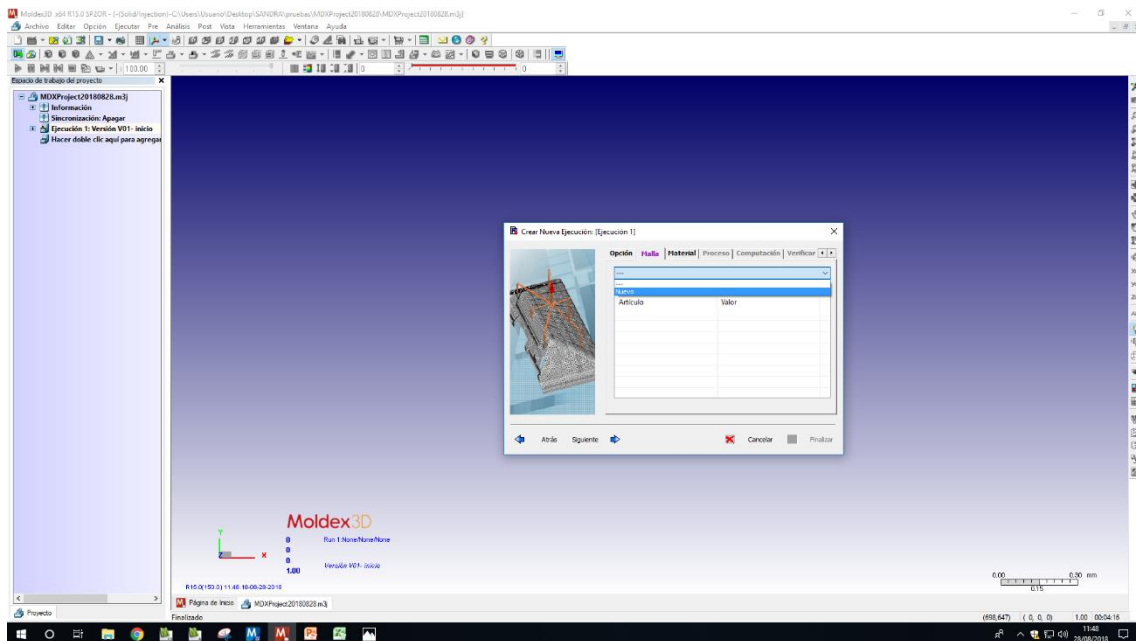


Fig. 5.40 Crear nueva ejecución > ventana de “malla”

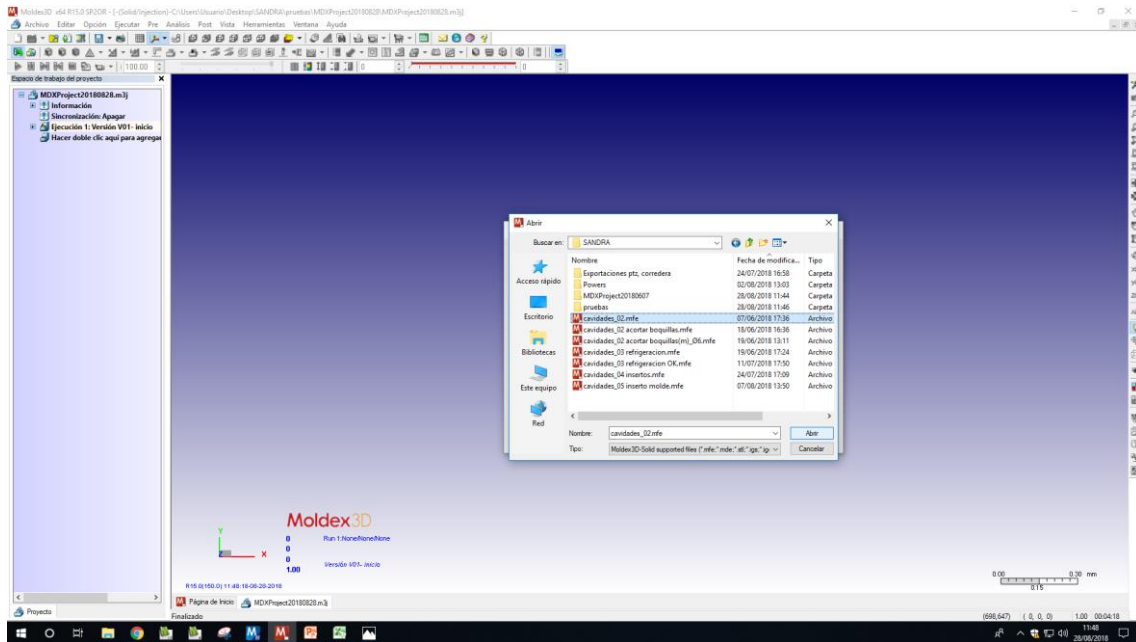


Fig. 5.41 Crear nueva ejecución > selección de la malla

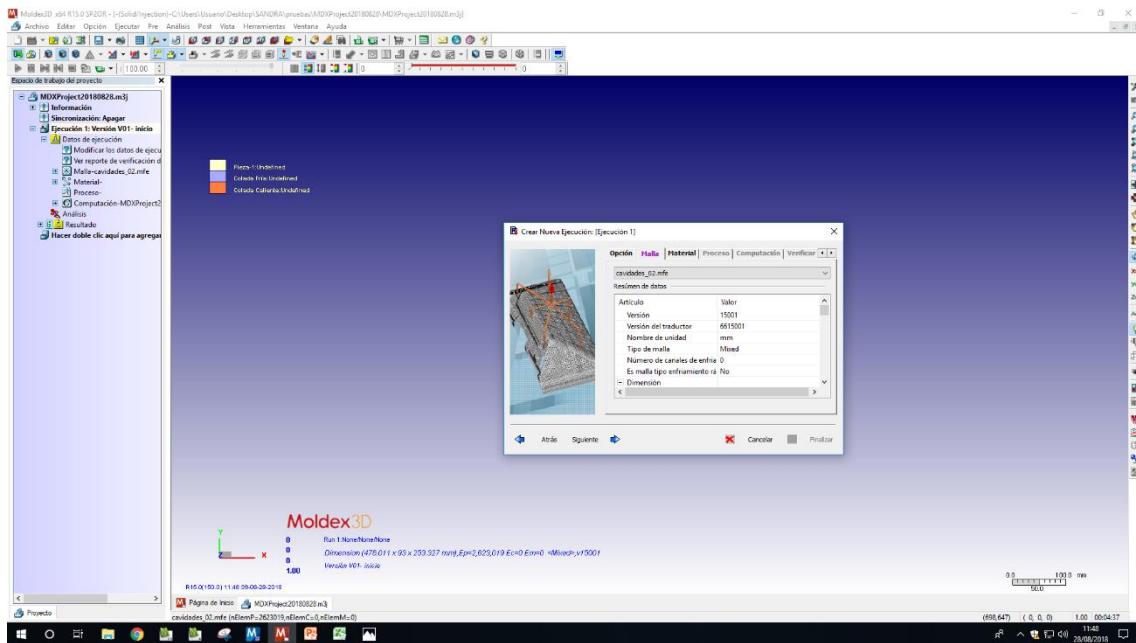


Fig. 5.42 Crear nueva ejecución > malla seleccionada

En el apartado de “material” se debe introducir el material con el que se inyecta el molde. Para ello, el propio programa cuenta con una biblioteca de materiales organizada según tipo y fabricantes. En caso de no disponer del material que se necesita se puede o bien seleccionar uno genérico, o bien introducir todos los datos técnicos de este. De forma análoga a la malla, si se desea seleccionar un material que se ha empleado en ejecuciones anteriores el programa lo ofrecerá como opción de acceso rápido haciendo clic en “materiales usados recientemente”. En el caso ejemplo, al tratarse de una nueva ejecución, se deberá seleccionar de la biblioteca.

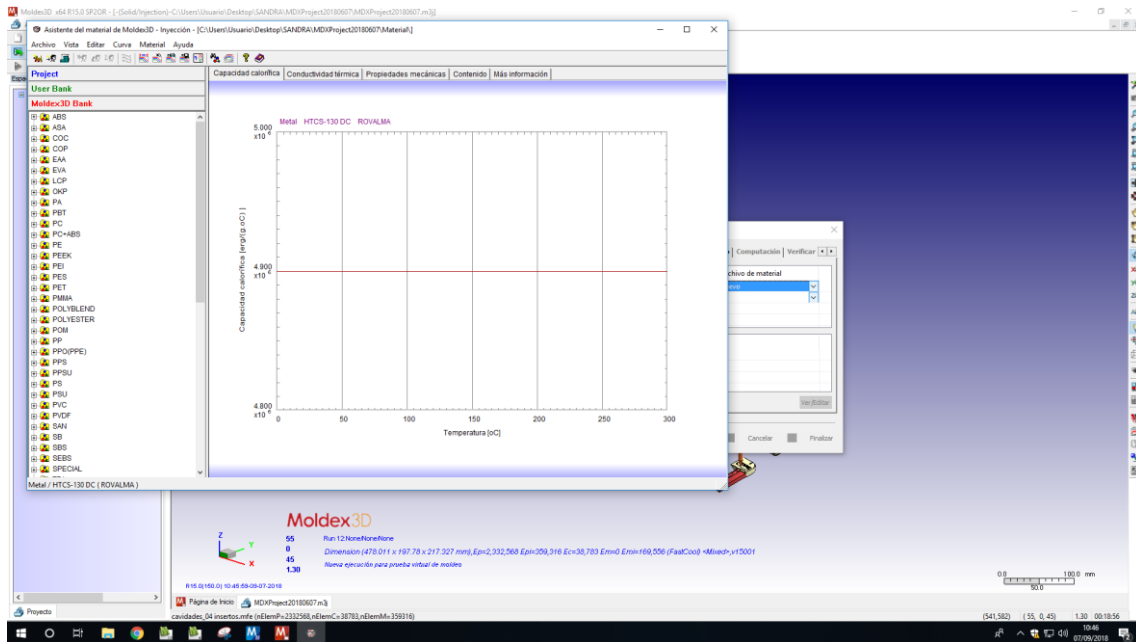


Fig. 5.43 Crear nueva ejecución > ventana de “material” > selección de material en biblioteca

A continuación se pasa al apartado “proceso”, donde se introducen las condiciones de este. Se puede crear un nuevo proceso, o si se trata de un proceso idéntico a uno ya utilizado, este puede importarse. En caso de crear un proceso nuevo, se abre una segunda ventana con sus correspondientes pestañas sucesivas, donde se introducen los datos. Para el ejemplo se crea un proceso nuevo. En la primera pestaña “configuración del proyecto” se selecciona el método de configuración “modo CAE” y se da nombre al proceso. En las pestañas de “configuración del llenado/empaquetado” y “configuración del enfriamiento” se introducen los datos que el sistema pide al usuario; en la última de ellas, “resumen”, se comprueban los datos introducidos, se clic en finalizar y ya se darían por introducidos todos los datos del proceso. En el caso ejemplo ha quedado como sigue.

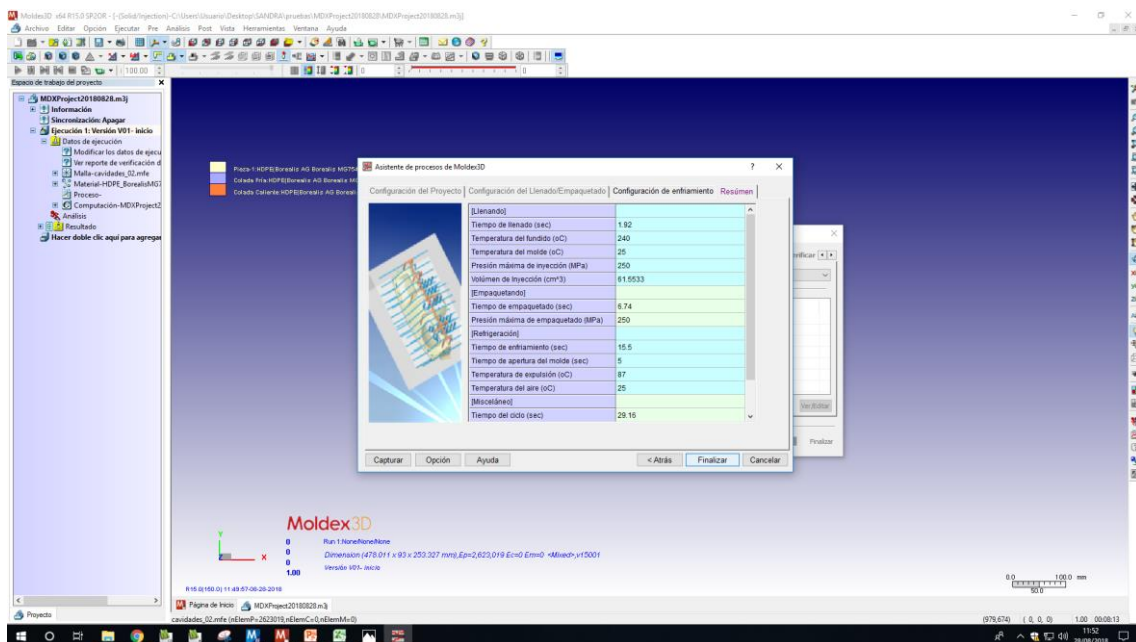


Fig. 5.44 Crear nueva ejecución > ventana de “proceso” > resumen de datos introducidos

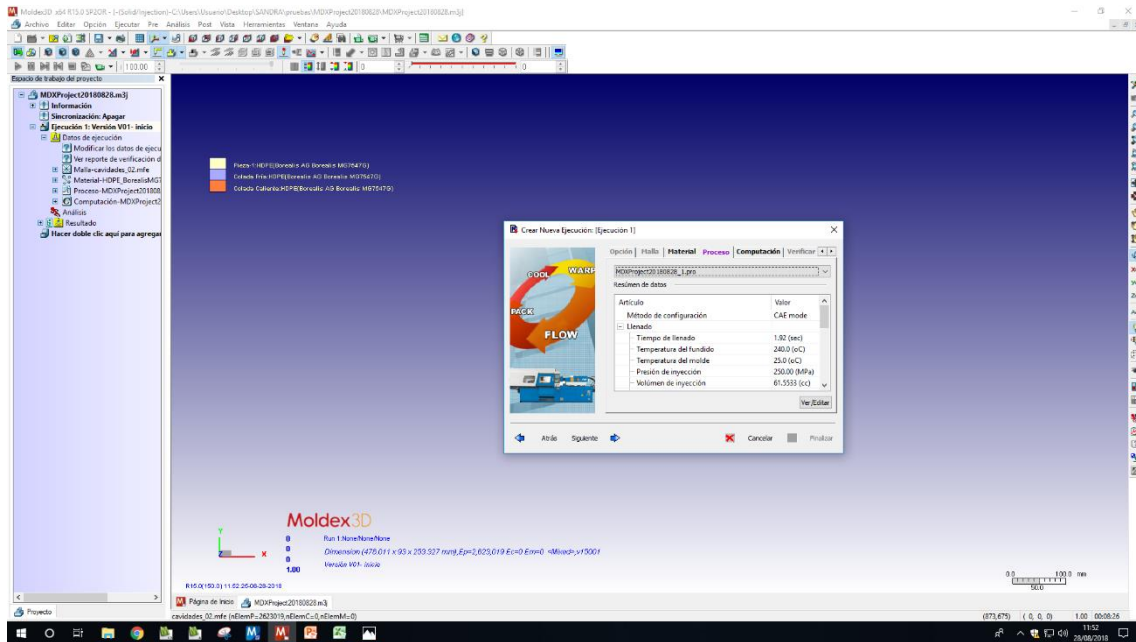


Fig. 5.45 Crear nueva ejecución > ventana de “proceso”

El siguiente apartado es el de “computación”, y es donde se resumen los datos que calculará el programa. Por lo general, en este apartado no se modifica nada.

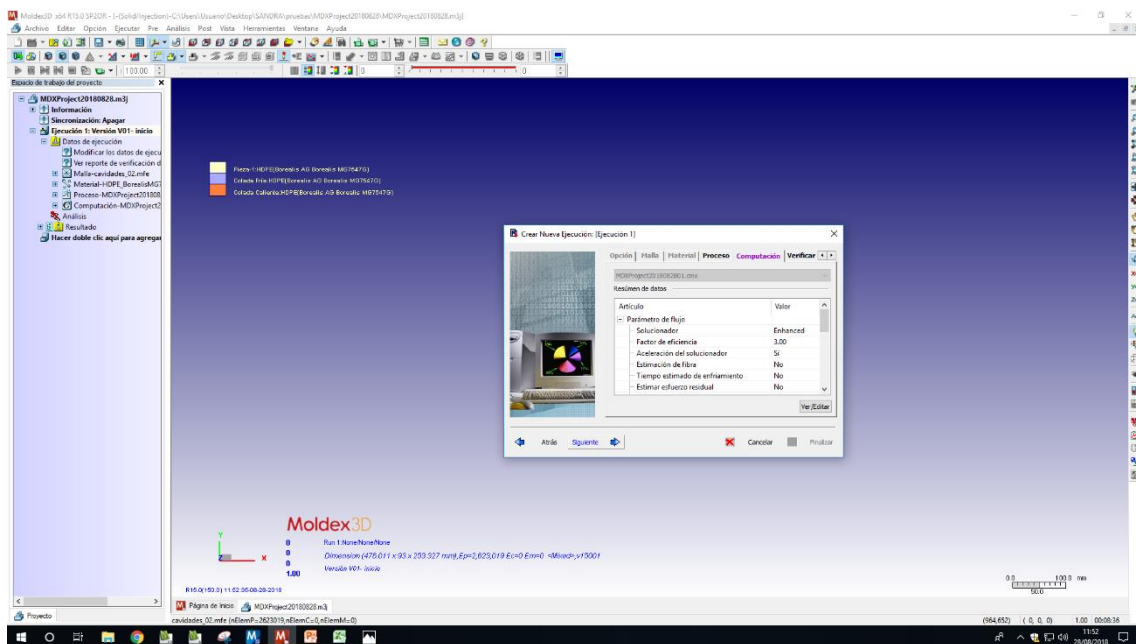


Fig. 5.46 Crear nueva ejecución > ventana de “computación”

Finalmente, en el apartado de “verificar datos de ejecución” se comprueba que todos los parámetros introducidos para la ejecución son correctos y se hace clic en finalizar.



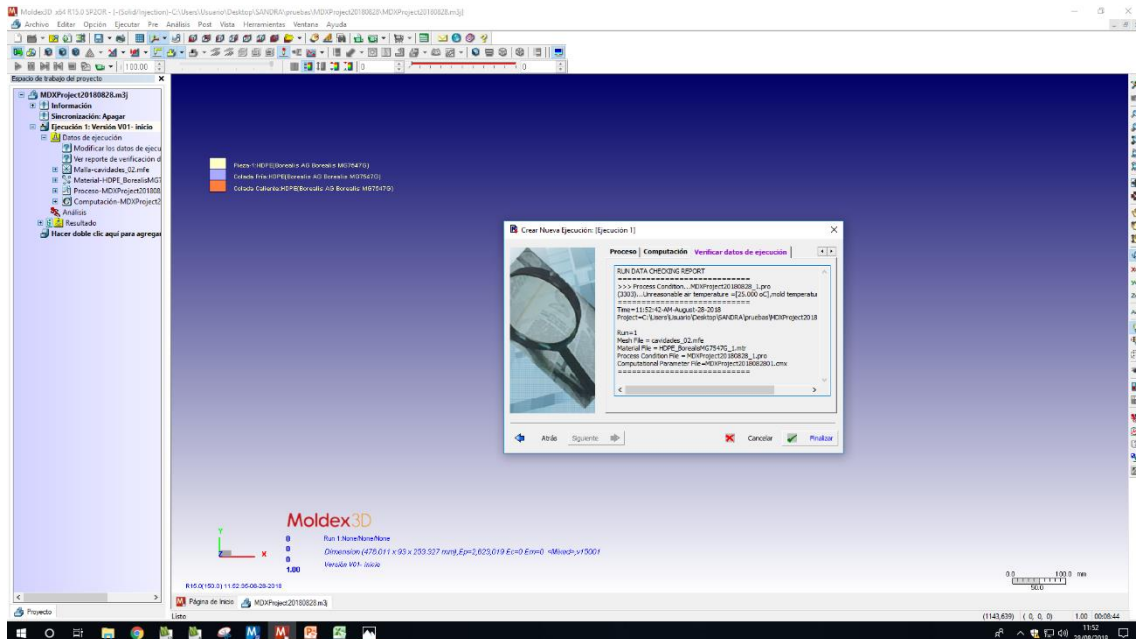


Fig. 5.47 Crear nueva ejecución > ventana de “verificar datos de ejecución”

Una vez se hayan introducido todas las condiciones de la ejecución, se puede iniciar el proceso de cálculo de esta. Se hace clicando doble en “Análisis”, en la ventana del lateral izquierdo, concretamente el árbol de la ejecución a analizar. Aparece una ventana en la que se debe determinar el modo de análisis, es decir, los módulos que se desean analizar. En este estudio realizará siempre un análisis completo para mostrar todas las opciones posibles, no obstante, cuando el usuario maneje el guion y desee modificarlo, puede analizar únicamente las partes en las que esté interesado.

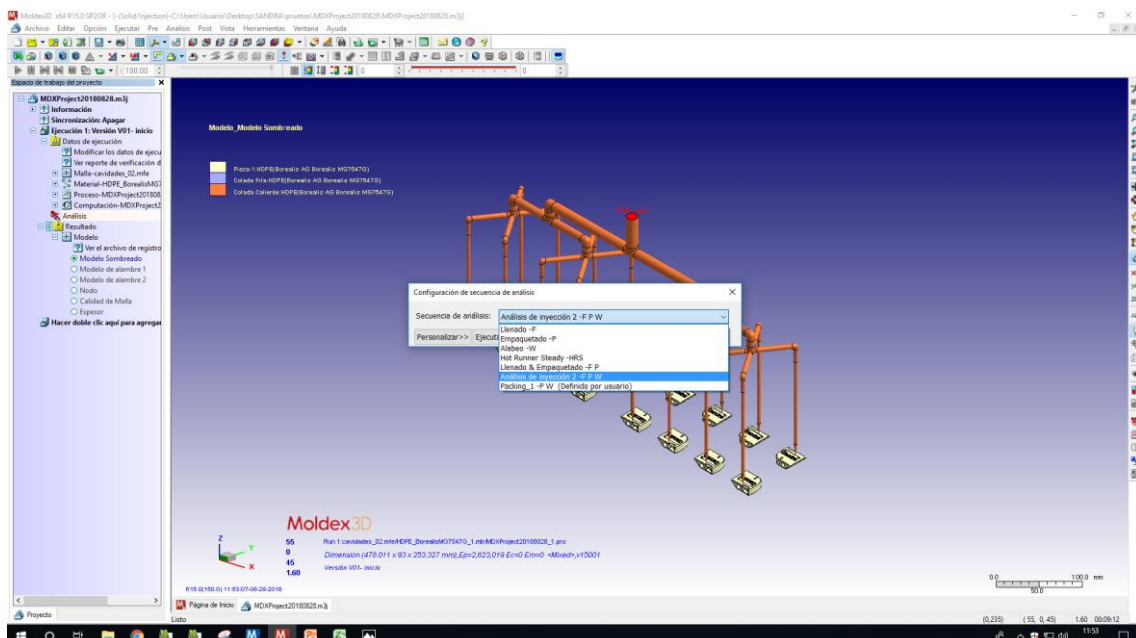


Fig. 5.48 Análisis > selección de tipo de análisis

Seleccionando “ejecutar ahora” el programa da inicio al análisis. El proceso de cálculo puede tardar un par de horas. Una vez finaliza se puede ver los resultados de forma sencilla en el mismo

árbol de la ejecución en cuestión. En cada ejecución aparece un desplegable por cada modo de análisis seleccionado y con los resultados organizados obtenidos en cada uno de ellos.

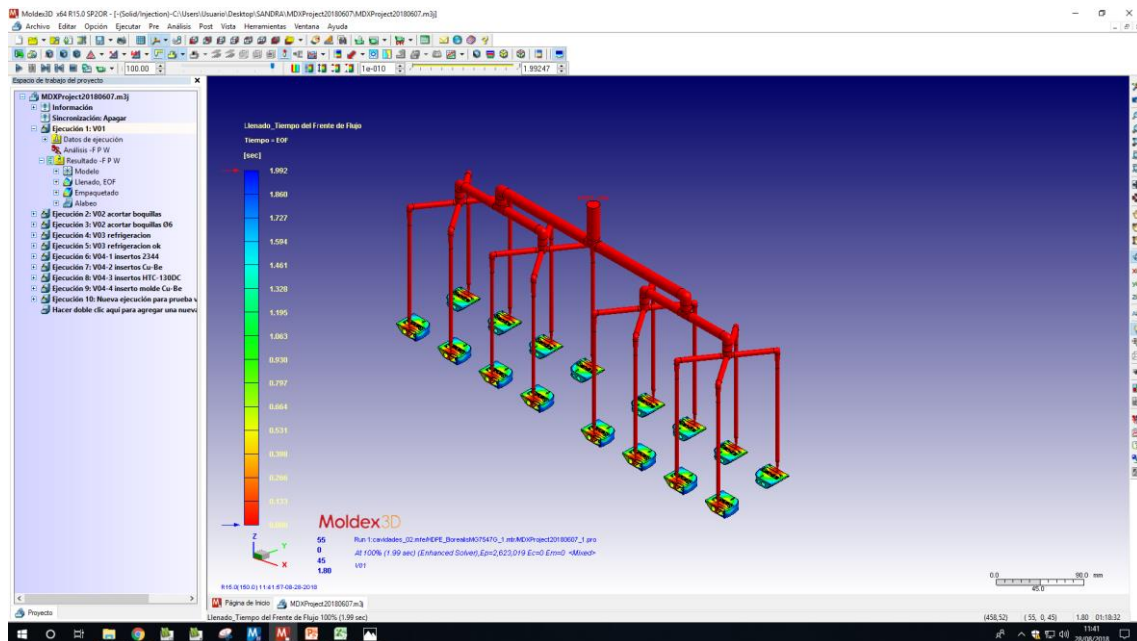


Fig. 5.49 Análisis finalizado, con árbol organizado

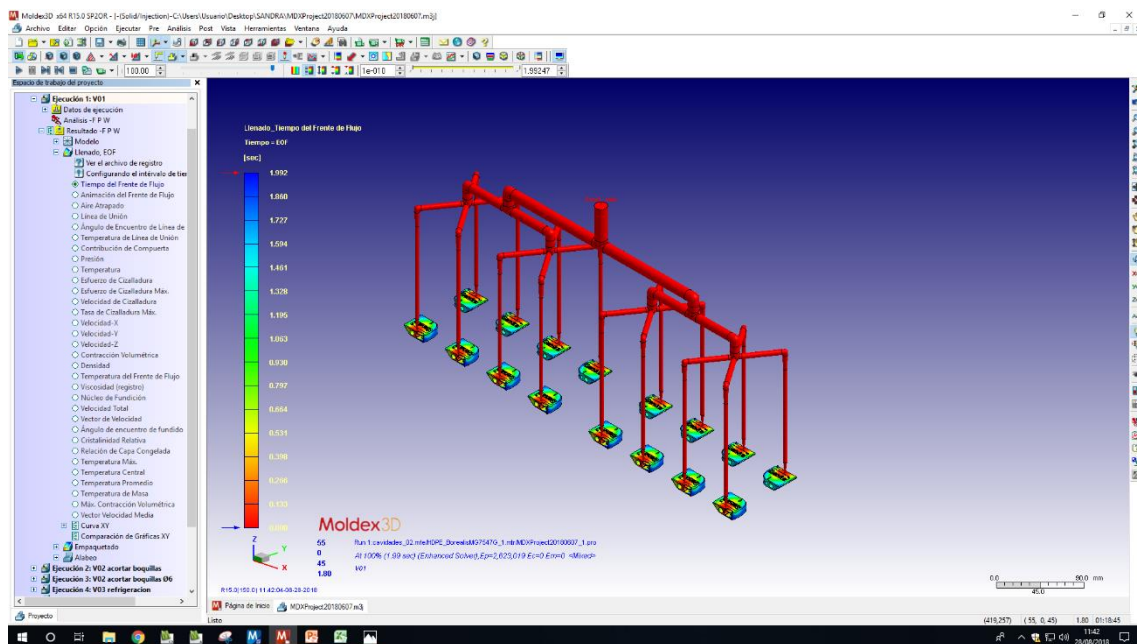


Fig. 5.50 Análisis finalizado, con árbol desplegado

También puede exportarse un documento en PDF o PowerPoint de la ejecución que genera el programa automáticamente. En este se indican los datos y condiciones introducidas en las ejecuciones, imágenes y animaciones de todos los resultados, así como breves explicaciones de los parámetros. Esto se hace clicando en “post > asistente de reporte” en la barra superior.

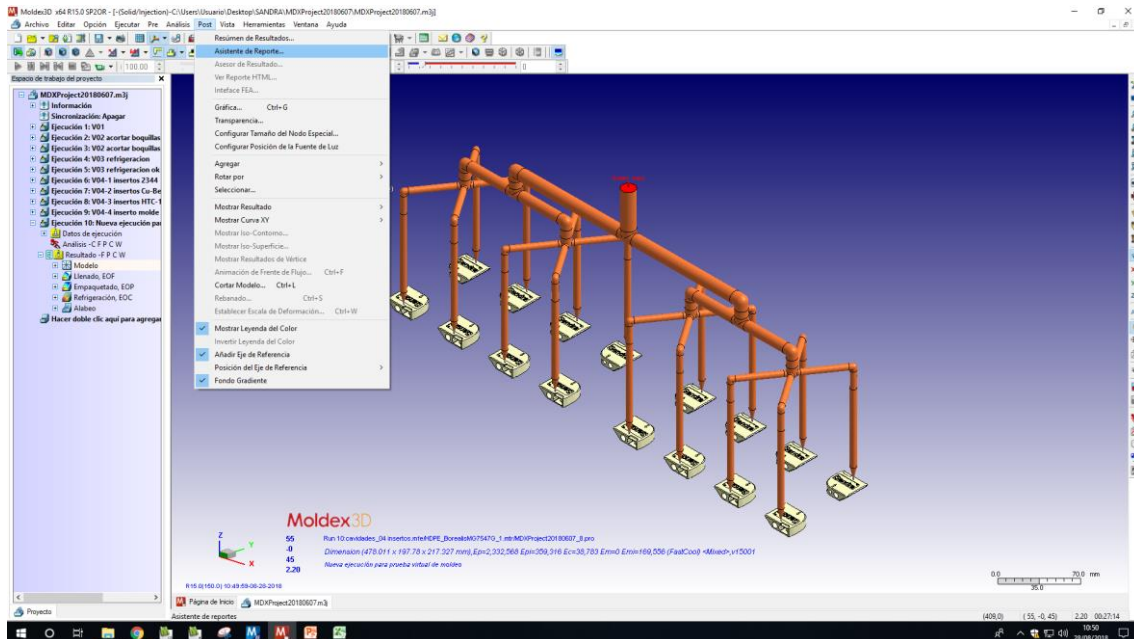


Fig. 5.51 Post > análisis de reporte

A continuación aparece una ventana emergente donde se selecciona la ejecución y las partes de esta que se desean exportar. También se determina el tipo de documento que se desea crear y si existe alguna plantilla para ello, la carpeta de destino o el nombre del archivo.

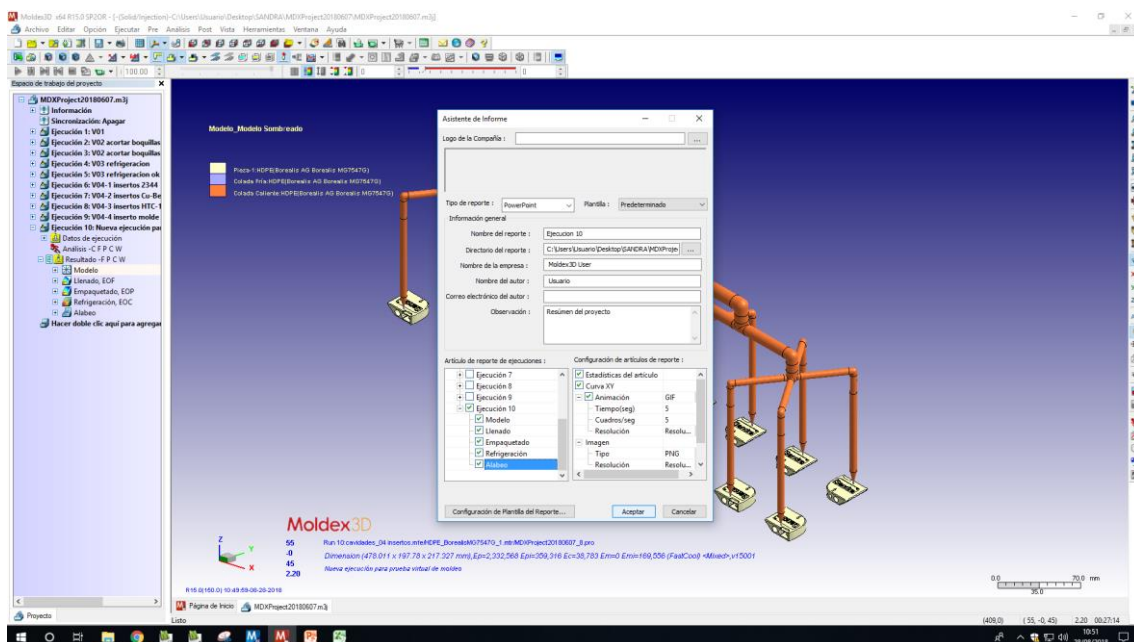


Fig. 5.52 Post > análisis de reporte > exportación de datos

## VO1 RESULTADOS

Se analiza ahora los resultados obtenidos con esta ejecución. Para ello se trabajará con los parámetros que se creen más relevantes del estudio: se explicará qué indica cada parámetro y posteriormente se comentará el resultado obtenido en el caso modelo. Se realizará el análisis en varios módulos: llenado, empaquetado y refrigeración cuando se disponga de este último; con la intención de organizar y condensar la información.

## ➤ LLENADO

El módulo o fase de llenado abarca desde que el material comienza a entrar a la pieza, hasta que esta queda toda llena (Autodesk knowledge network (s.f.)). Los parámetros que se van a comparar a continuación tienen lugar por tanto en este espacio temporal.

- Tiempo del frente de flujo.

Es un indicador de posición del frente de fundido en diferentes tiempos a lo largo del proceso de llenado. Gracias a este se puede examinar el patrón de llenado del molde e identificar un problema de llenado incompleto o líneas de soldadura. Se muestra a continuación una lista de los posibles problemas que se pueden encontrar gracias al frente de flujo:

### - “Hesitation”

Es la condición donde el frente de flujo se ralentiza en una sección concreta de la pieza. Se puede comprobar su aparición buscando movimientos lentos en las animaciones, sobre todo se debería buscar en los puntos críticos.

Para resolver el problema de *hesitation* se puede aumentar la temperatura del molde, cambiar la ubicación de la entrada, modificar la geometría de la pieza en la sección donde se produce este fenómeno, o cambiar a un material con mayor índice de flujo de fusión.

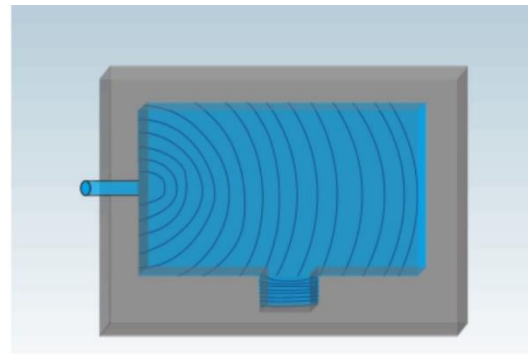


Fig. 5.53 Defecto de hesitation

### - “Short Shot” o tiro corto.

El tiro corto es un defecto común que sucede cuando la cavidad no tiene un llenado completo. Visualmente, es sencillo detectar este problema.

Aumentar el tiempo de llenado no será una solución válida. En cambio, si puede solucionar el problema aumentar el índice de flujo de inyección, la temperatura del molde o el índice de fusión del material; o mejorar la ventilación. También podría solventar el problema modificar la posición de la entrada de material o agregar más de una entrada.

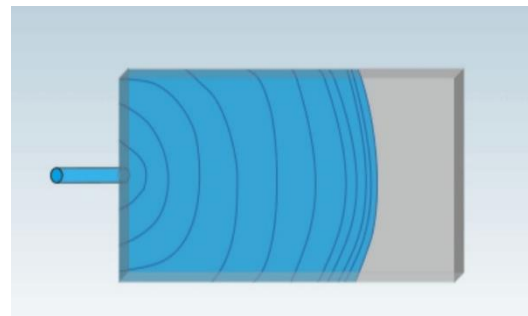


Fig. 5.54 Defecto de tiro corto o “short shot”

### - Líneas de soldadura

Las líneas de soldadura o *weld line* son las líneas formadas por la unión de dos frentes de fusión diferentes. Estas disminuirán la resistencia de la pieza y causaran un defecto cosmético. Se pueden detectar buscando en la animación del frente de flujo la unión de dos frentes de fusión. Además el propio programa ofrece un resultado del análisis específico donde se muestran las líneas de soldadura: cuanto más oscura sea la línea, más débil es la estructura.

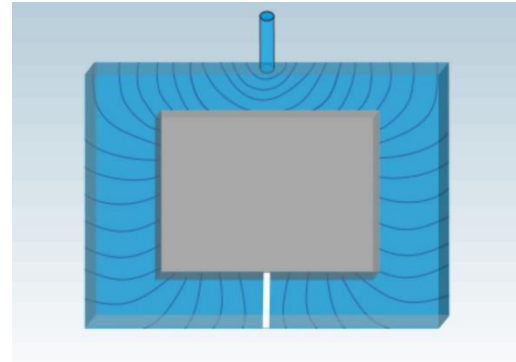


Fig. 5.55 Defecto de líneas de soldadura

Por lo general es complicado erradicar por completo las líneas de unión. Las opciones más comunes son o bien desplazarlas a zonas de la pieza que no se requiera tanta resistencia, o bien tratar de disminuir la intensidad de su aspecto. Para mover las líneas de soldadura se puede cambiar la posición de la entrada de material, o modificar el grosor de la pieza. Si la intención es disimular su apariencia se debe aumentar la temperatura del molde o la temperatura de fusión del material, o modificar el diseño de la cámara caliente.

- “*Overpacking*” o saturación.

Durante el llenado de la pieza, el plástico inyectado fluye en diferentes direcciones en función de la geometría de la pieza y la posición de la entrada de material. Normalmente, las direcciones del flujo no se dirigen hacia geometrías idénticas, luego habrá partes de la pieza que se llenen completamente antes que otras. Estas partes seguirán recibiendo material hasta que todo el conjunto de la pieza esté lleno. Se conoce como *overpacking* a situación de una pieza con partes sobreinyectadas, y esto conlleva el riesgo de causar alabeo debido a la distribución desigual de la densidad. Este efecto se puede detectar buscando áreas que tengan menor tiempo de llenado que otras.

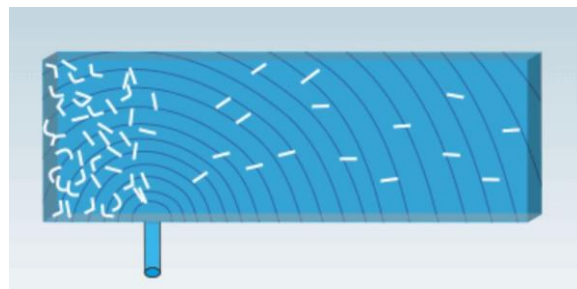


Fig. 5.56 Defecto de “overpacking” o saturación

Algunas formas disminuir el problema son moviendo la entrada de material a una zona donde el recorrido del flujo en distintas direcciones sea lo más equitativo posible, modificar la geometría de la pieza o instalando un sistema de inyección secuencial.

Se analiza ahora el resultado del tiempo de frente de flujo en el caso modelo.

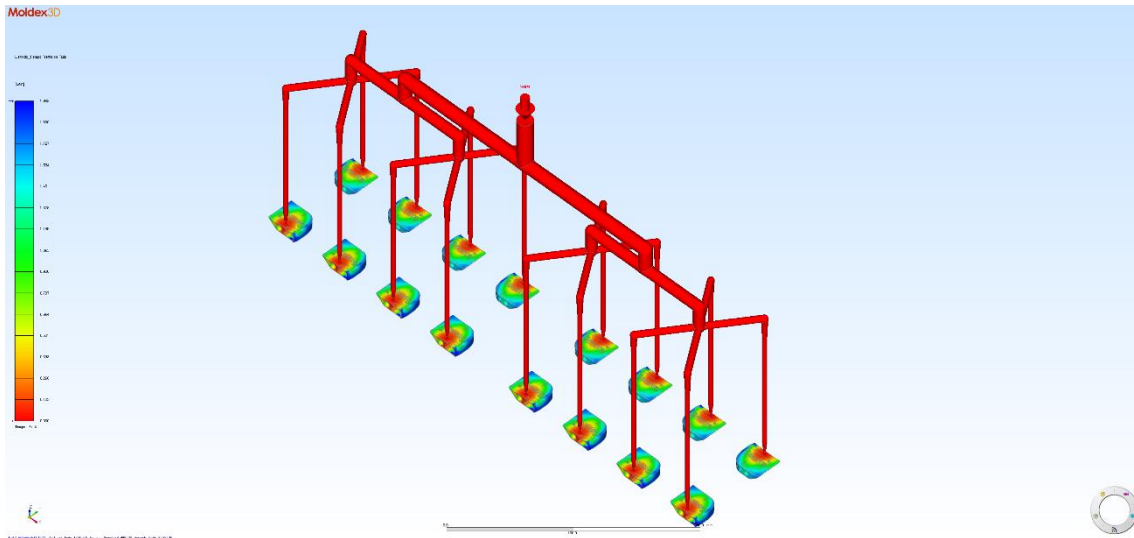


Fig. 5.57 Resultado llenado V01: tiempo de frente de flujo, vista general

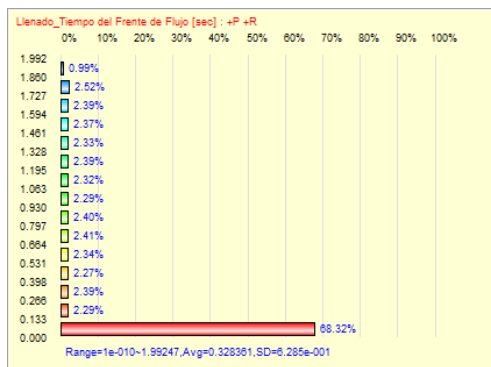


Fig. 5.58 Resultado llenado V01: estadísticas de tiempo de frente de flujo (izquierda)

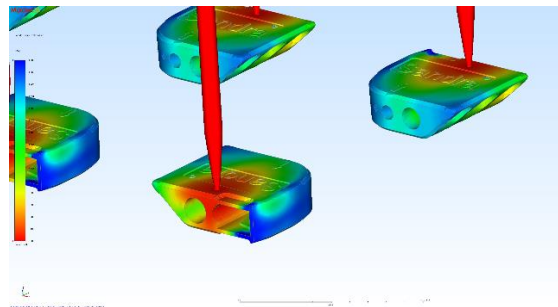


Fig. 5.59 Resultado llenado V01: tiempo de frente de flujo, vista cavidad (derecha)

Como se aprecia en el análisis, todas las piezas se llenan completamente, del mismo modo y al mismo tiempo. Es cierto que en los primeros segundos se llena un 68.32% del volumen total, pero pertenece en mayoritariamente al conducto de la cámara caliente luego no afectará a la pieza; la cavidad como tal se llena de forma constante. Es por esto que se descartan problemas de *overpacking*, *hesitation*, y tiro corto. En cambio, podrían aparecer líneas de soldadura en la zona coloreada con azul oscuro.

- Línea de unión

Las líneas de unión muestran las líneas de soldadura que indican puntos potenciales de debilidad en la estructura. Como se ha mencionado en tiempo del frente de flujo > líneas de soldadura, cuanto más oscura sea la línea de unión, más débil será la estructura.

Si se analiza el caso ejemplo, se obtiene el siguiente resultado:

Como se esperaba, se han hallado líneas de soldadura en las zonas que anteriormente estaban coloreadas con azul oscuro. Se recomienda tener en cuenta el ángulo de encuentro del fundido para saber si se trata de una línea de soldadura muy pronunciada, o si la unión de los dos frentes de fusión se puede considerar como uno único.

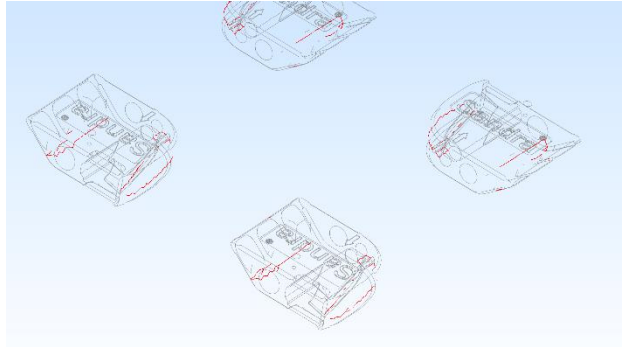


Fig. 5.60 Defecto de línea de unión

- Presión.

Los resultados de presión obtenidos tras el análisis muestran la distribución de presiones del plástico en el paso del tiempo. A partir del resultado obtenido y teniendo en cuenta los siguientes observaciones, se puede modificar el diseño y conseguir mejores rendimientos.

- Examinar la situación de transmisión de presiones.

Existen situaciones en las que se limita la transmisión de presión de inyección a la cavidad, dando lugar a la problemática explicada anteriormente de *short shot* o tiro corto. Esto es debido a que es la fuerza ejercida por la presión la que impulsa el plástico fundido hacia la cavidad. Esta limitación puede estar producida por cámaras calientes con tamaños incorrectos, o por el espesor de la cavidad.

- Calcular la caída de presión del sistema de cámara caliente.

Hay ocasiones en las que gran parte de la presión consumida por el sistema en conjunto puede ser absorbida por la cámara caliente. Pensando que el uso principal de la presión de inyección es la introducción del material en la cavidad, no debería consumirse la mayor parte de esta en la cámara caliente. Si se da el caso, es interesante reducir la absorción de la cámara caliente para hacerlo también en la totalidad del sistema.

Para calcular la caída de presión en la cámara caliente se deberá conocer la presión máxima absorbida por el sistema con y sin cámara caliente. Una vez se conocen estos datos se procederá con la siguiente fórmula para calcular dicha pérdida de presión:

$$P_{max_{con\ cc}} - P_{max_{sin\ cc}} = \text{caída de presión en cc} \quad (1)$$

Con Moldex3D Project es sencillo obtener estos valores de presiones máximas. Por defecto, la cámara caliente se muestra en la ventana de visualización; por lo tanto, la presión que se muestra en la leyenda de colores es la máxima correspondiente con dicha situación. Para obtener el valor de la presión máxima absorbida por la cavidad se deberá hacer clic en mostrar/ocultar la cámara caliente en la barra de herramientas superior para ocultarla. El valor de la presión máxima que marque la leyenda en este caso será el correspondiente a lo mostrado en la ventana de visualización: la cavidad.

- Evitar *overpacking* o saturación.

Tal y como se ha explicado anteriormente, se puede detectar una situación de saturación de material en la pieza gracias al tiempo del frente de flujo. No obstante, para conseguir un

resultado más preciso se recomienda tener en cuenta también el análisis de la presión. Para ello, se comprueba el valor de la presión en las áreas con alta probabilidad de sufrir este tipo de defecto. Si el valor de la presión en esta zona es alto en comparación con el resto, las posibilidades de que exista *overpacking* aumentan.

Se comprueban los resultados obtenidos del análisis para el caso de la presión. Para ello se capturan los valores de presión con y sin sistema de colada caliente.

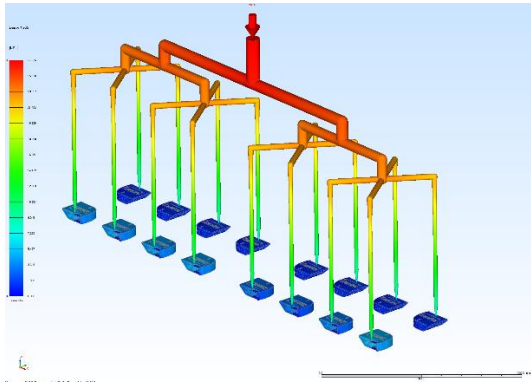


Fig. 5.61 Resultado llenado V01: presión conjunto cavidad y sistema colada caliente (izquierda)

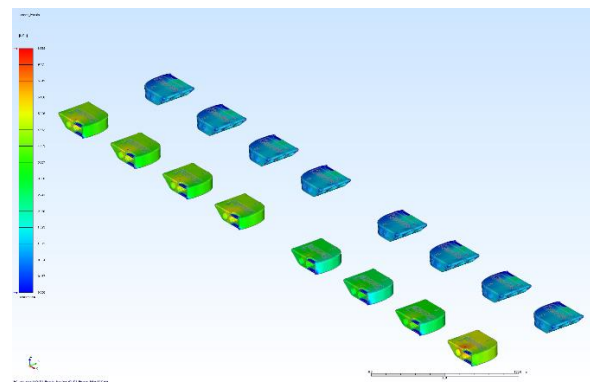


Fig. 5.62 Resultado llenado V01: presión cavidad (derecha)

Se corrobora que no existe riesgo de *overpacking* ya que la distribución de presiones en las cavidades es uniforme; salvo en el punto de inyección que se aprecia un valor de presión más alto que en el resto de áreas, algo lógico al ser el punto por el que se introduce el material. Por otro lado, sí se observa que la presión varía en el orden de 3 MPa entre las piezas situadas al lado del operario y las piezas situadas al lado contrario de este. Se justifica con la gravedad: se debe tener en cuenta que el sistema de cámara caliente, cuando el molde está preparado para inyectarse, está en posición horizontal. Este hecho produce que la mitad de los canales se vean favorecidos por esta fuerza y corra más material a través de ellos, aumentando así la presión con la que llega a las piezas. Se podría pensar que como resultado de esto se obtendrían dos tipos de pieza, pero lo cierto es que en la fase de compactación este problema es resuelto.

Se va a comprobar ahora la caída de presión que tiene la cámara caliente. Para ello se aplica la ecuación que corresponde:

$$\begin{aligned} \text{caída de presión en cc} &= P_{\text{max}_{\text{con cc}}} - P_{\text{max}_{\text{sin cc}}} = \\ &= 27.14 - 6.86 = 20.28 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (2)$$

Teniendo en cuenta que la presión consumida por el sistema en total son 27.14 MPa, que la caída de presión en la cámara caliente sean 20.28 MPa, es algo desproporcionado.

- Ángulo de encuentro de fundido

El resultado de este análisis muestra la distribución del ángulo de reunión de los frentes de fusión. En función del valor del ángulo se determinará la importancia de la línea de soldadura.

Se considerará como dos frentes de fusión convergentes aquellos en los que el grado del ángulo de unión esté entre 0° y 135°. Si el ángulo que une dos frentes de fusión es de 180° se los considerará como uno único y no existirá línea de soldadura, mientras que si el ángulo de



soldadura es de 0° se entenderá que los frentes de fusión convergen de frente. Por lo general, a menor ángulo de encuentro de fundido, mayor será la debilidad de la pieza y más obvia será la marca que resulte de la unión al expulsar la pieza.

Si se aplica esto al caso ejemplo se obtiene que gran parte de las líneas de unión tienen más de 100° como ángulo de encuentro de fundido, por lo que no se trata de una línea de soldadura muy marcada, y se descarta que puedan generar un problema significativo.

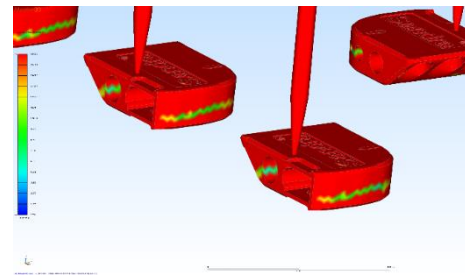


Fig. 5.63 Resultado llenado V01: ángulo de encuentro de fundido

○ Relación de capa congelada

Se entiende como capa congelada a la solidificación del material cerca de la superficie de la cavidad como resultado del enfriamiento de la pieza. A medida que el tiempo aumenta, también lo hace la relación de capa congelada.

El parámetro de la capa congelada muestra el porcentaje de plástico enfriado en relación con el grosor total de la pieza conforme avanza el tiempo, por lo que al final el valor alcanzará el 100%. El aumento de la relación no solo indica la reducción de la sección por la que fluye el material, si no que indica un incremento de la resistencia al flujo y de la presión del bebedero.

Con esto, una capa congelada gruesa resultará una menor probabilidad de obtener marcas de hundimiento en la superficie, pero también una mayor posibilidad de causar la problemática de tiro corto al existir mayor resistencia al paso del flujo.

Se muestra a continuación el modo de calcular la relación de capa congelada:

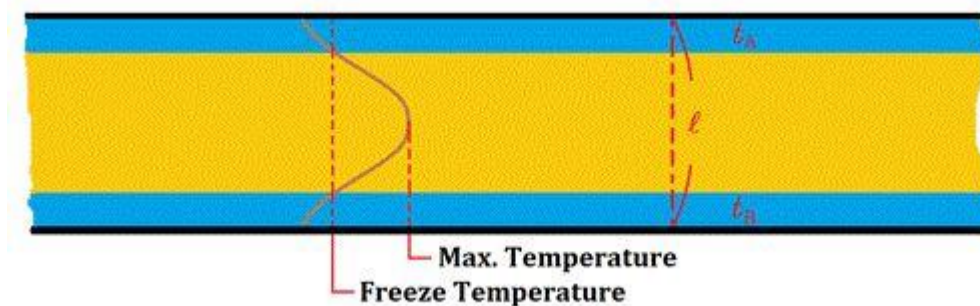


Fig. 5.64 Esquema cálculo relación capa congelada

Siendo la zona coloreada con azul el material congelado, y el coloreado con amarillo corresponde al material que está fluyendo.

$$\text{Relación capa congelada} = \frac{t_A + t_B}{l} * 100 \% \quad (3)$$

Donde  $t_A$  es el espesor de la capa congelada superior, y  $t_B$  es el espesor de la capa congelada inferior;  $l$  es el espesor total de la pieza.

- Temperatura central.

La temperatura central muestra la temperatura del material de la capa media en la dirección del espesor de la pieza. Gracias a ella se puede identificar un caso de *short shot* o tiro corto, en el caso de tener un valor de temperatura central muy bajo.

En el siguiente diagrama se muestra una línea de partición roja a lo largo del espesor de la pieza, con un punto rojo en el centro de dicha línea que se tomará como referencia para calcular la temperatura central. Los puntos azules denotan nodos alrededor del centro de temperatura, habiendo más en la dirección normal a la vista.

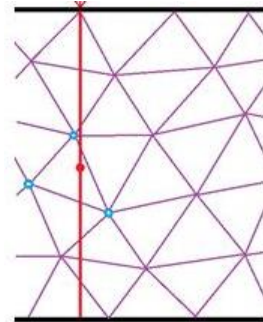


Fig. 5.65 Esquema cálculo temperatura central

La temperatura central se calcula mediante una interpolación de la temperatura que tienen los nodos mencionados.

Se analiza el resultado de la temperatura central en el caso ejemplo.

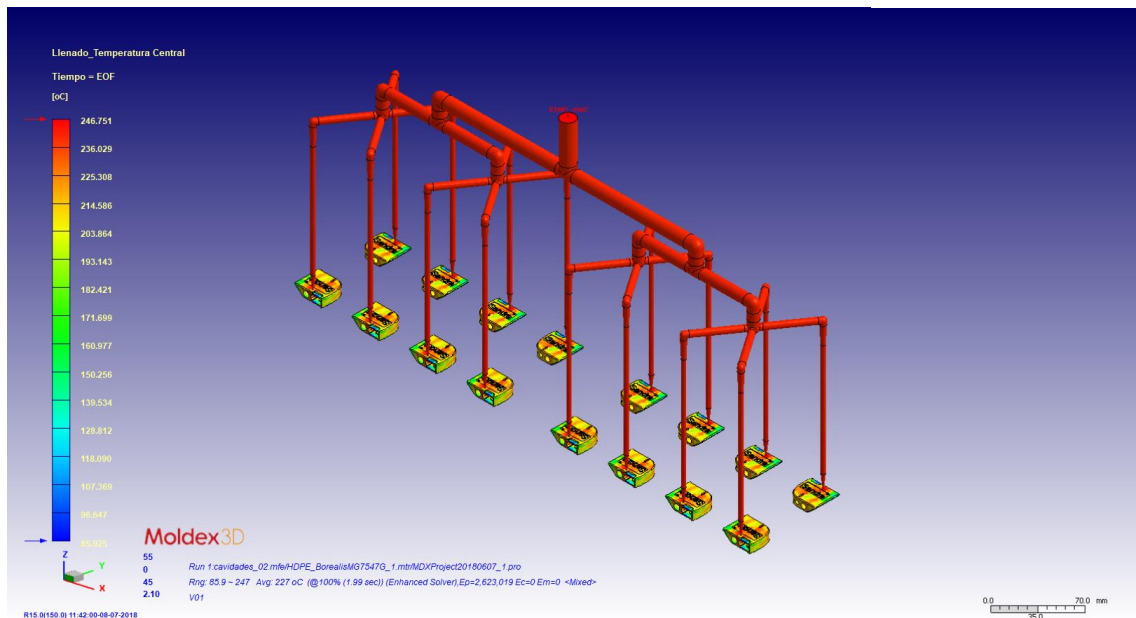


Fig. 5.66 Resultado llenado V01: temperatura central, vista general

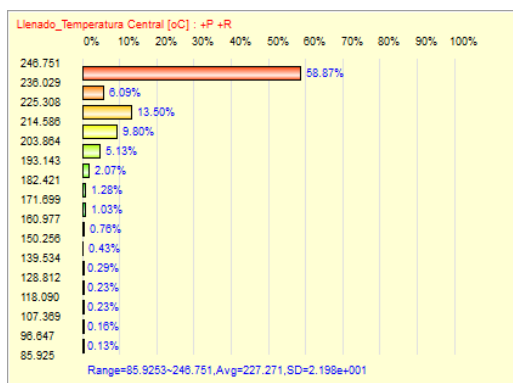


Fig. 5.67 Resultado llenado V01: estadísticas de temperatura central (izquierda)

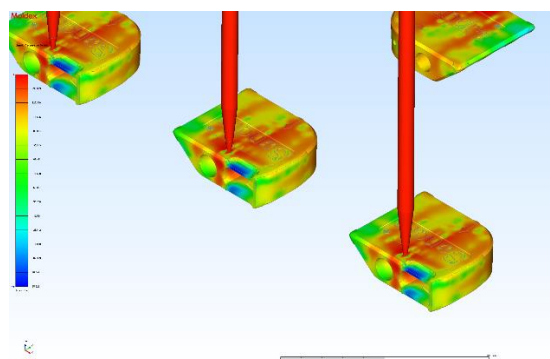


Fig. 5.68 Resultado llenado V01: temperatura central, vista cavidad (derecha)

Según el gráfico de estadísticas, el 93.39% del volumen de llenado está por encima de los 139.143 °C, mientras que el resto de áreas que están por debajo de esta temperatura son zonas externas con poco espesor. Es de lógica pensar que estas zonas tengan menor temperatura debido a su facilidad para refrigerarse. Se puede afirmar por tanto que no se corre riesgo de tiro corto según los resultados obtenidos con la temperatura central.

#### ➤ COMPACTACIÓN

Después de la fase de llenado, le sigue la compactación. Esta se da aproximadamente cuando el volumen de la cavidad ha alcanzado aproximadamente el 98% de su capacidad. A continuación se estudian los parámetros que se creen característicos e importantes en esta fase.

##### ○ Presión.

En la fase de compactación se aplica más presión que hasta el momento al material de inyección para tratar de compactarlo lo máximo posible en la cavidad. Puesto que la cavidad está completamente llena, el flujo del material va a estar regido por las diferencias de densidad, fluyendo hacia las zonas con menor densidad y tratando así de equilibrar todas las zonas. Es sabido que al extraer las piezas de la cavidad sufren una contracción debido a la variación de las características de  $pV_T$  (presión, volumen y temperatura), luego lo que se pretende conseguir con la fase de compactación es que este fenómeno se produzca de forma proporcional en toda la pieza al tener la misma densidad en toda ella.

Es recomendable pues verificar el valor de presión en la pieza, además de corroborar que la densidad sea lo más homogénea posible.

En el caso ejemplo, como se preveía, se ha aplicado mayor presión a la pieza. Ha pasado de absorber 6.86 MPa a 13.02 MPa.

Se puede apreciar también que ya no existe la diferencia de presiones entre las piezas que están en el lado del operario y las que están en el lado contrario, como ocurría en la fase de llenado.

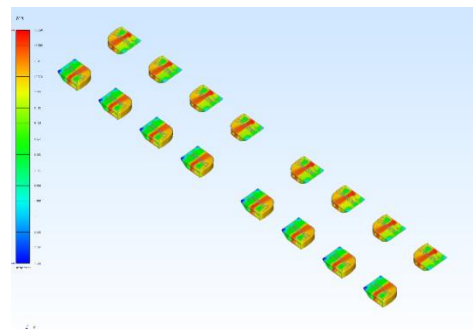


Fig. 5.69 Resultado compactación V01: presión

##### ○ Densidad

Se comprueba que la densidad de la pieza sea aproximadamente la misma en todas las áreas de la pieza. En el caso ejemplo lo es.

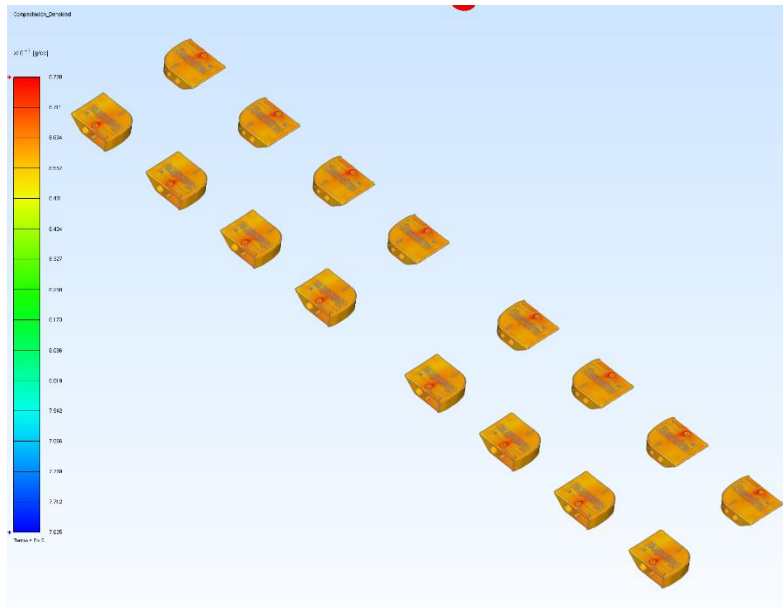


Fig. 5.70 Resultado compactación V01: densidad

o Indicador de rechupe

El indicador de rechupe es un parámetro que evalúa el efecto del empaquetado sobre la pieza. Si el valor del índice es positivo se entenderá que el empaquetado no es suficiente y se puede producir rechupe; mientras que si es negativo significará que está sobre empaquetado. Un empaquetado apropiado deberá tener un valor de indicador de rechupe que tienda a cero.

Se analiza el caso modelo, sabiendo que no hay que tener en cuenta el sistema de cámara caliente.

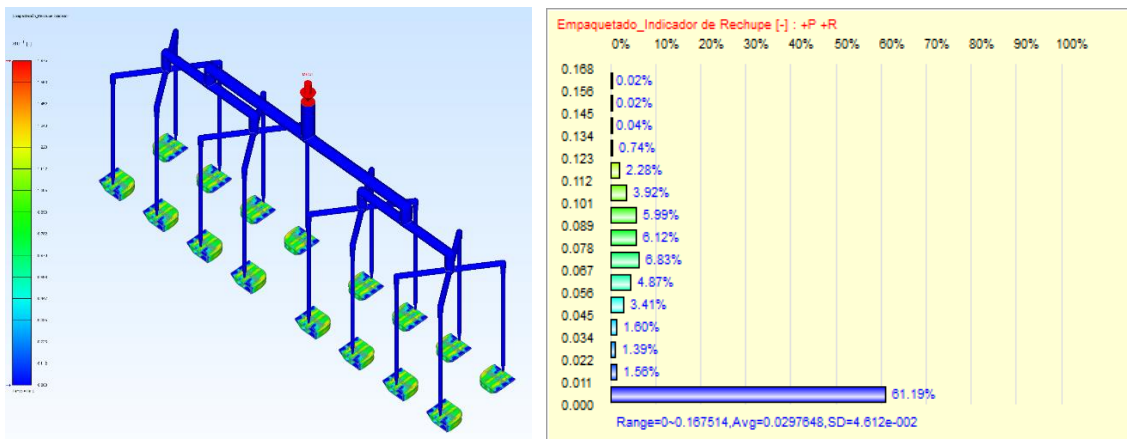


Fig. 5.71 Resultado compactación V01: indicador de rechupe (izquierda)

Fig. 5.72 Resultado compactación V01: estadísticas indicador de rechupe (derecha)

Puesto que no se debe tener en cuenta la cámara caliente, no es cierto que el 61.19% del volumen este entre los valores de índice de 0.000 y 0.011, como indica la gráfica de estadísticas. Sí se puede afirmar que el grueso del volumen está entre 0.123 y 0.045, es decir, valores muy cercanos a cero. Se concluye pues que se ha realizado un empaquetado correcto.

- Fuerza de cierre

El análisis ofrece una gráfica con curva XY en la que se muestra la fuerza de sujeción frente al tiempo de llenado. Se debe tener en cuenta que el valor de esta fuerza es la requerida calculada, no la que produce la máquina inyectora. Es un dato importante pues a la hora de determinar que máquinas son adecuadas o no para el molde diseñado.

En la gráfica también se puede apreciar que al finalizar la fase de llenado (en el caso ejemplo 2 segundos) la fuerza de cierre ejercida crece exponencialmente. Esto se debe a que se ha iniciado la fase de compactación, en la que la presión ejercida sobre las piezas aumenta.

En el caso ejemplo se necesita una fuerza de cierre de 26.22 toneladas, que a pesar de parecer un valor reducido, al tratarse de una pieza de tamaño tan pequeño se considera adecuado.

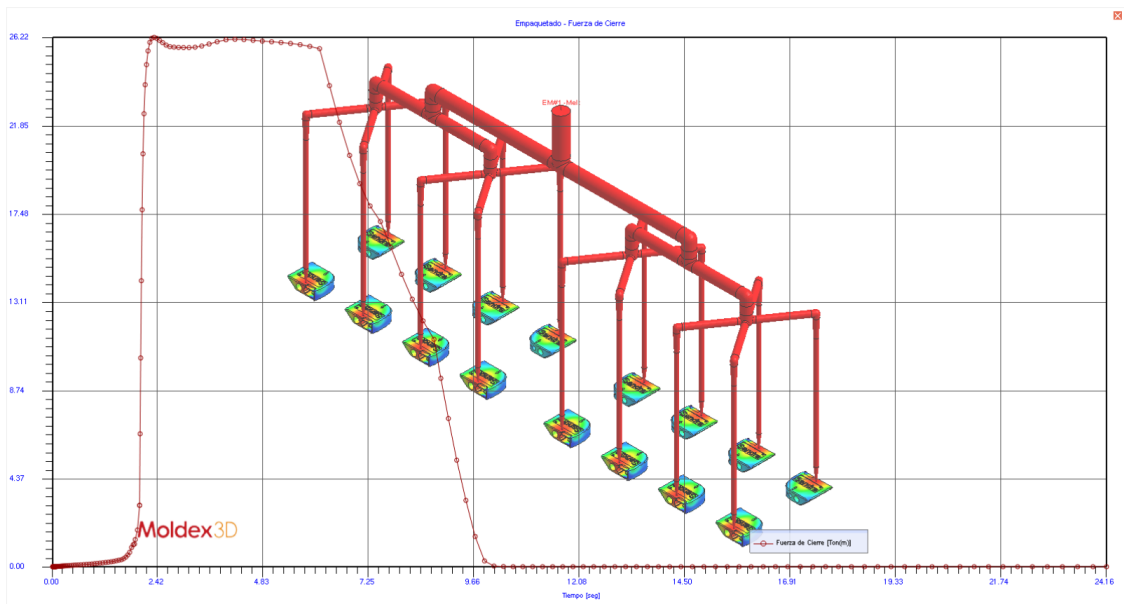


Fig. 5.73 Resultado compactación V01: fuerza de cierre

### 5.3. V02 MODIFICACIÓN SISTEMA COLADA CALIENTE

Ante los resultados obtenidos para el caso modelo en la versión anterior V01, se ha concluido que se debe reducir la presión absorbida por la cámara caliente; es por esto que la versión V02 será dedicada a realizar estas modificaciones. Para saber qué cambios son necesarios, se aplican conocimientos de física el campo de la dinámica de fluidos.

Según Gómez (2017) y Sotelo (1999), en dinámica de fluidos, la ecuación de Darcy-Weisbach permite calcular la pérdida de carga dentro de una tubería debida a la fricción. Su fórmula general puede expresarse como:

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

Siendo:

$H_f$  = pérdida de carga (metros de columna de líquido)

$f$  = factor de fricción de Darcy (adimensional)

$L$  = longitud tubería (m)

$D$  = diámetro de la tubería (m)

$V$  = velocidad media del fluido (m/s)

$g$  = aceleración de la gravedad

Por otro lado, se tiene la ecuación de la continuidad, en la que suponiendo que la densidad no varía  $\rho_1 = \rho_2$ , la ecuación queda como sigue:

$$A_1V_1 = A_2V_2 \rightarrow Q_1 = Q_2 \quad (5)$$

Donde:

$V$  = velocidad (m/s)

$A$  = área transversal del tubo (m<sup>2</sup>)

$Q$  = caudal. (m<sup>3</sup>/s)

Se deduce de estas ecuaciones que si la sección o diámetro de la tubería aumenta, la pérdida de carga disminuye (4); además si la sección aumenta, la velocidad disminuye (5), y si la velocidad disminuye también lo hace la pérdida de carga (25). Se concluye que aumentando el área transversal se conseguirá una disminución significativa de la pérdida de carga en el sistema de colada caliente.

También se deduce que, al ser la longitud de la tubería proporcional a las pérdidas de carga (4), disminuyendo la altura de la cámara caliente se conseguirá disminuir la pérdida de presión en esta.

Se realizarán pues dos modificaciones por separado para identificar las variaciones debidas a cada uno de los parámetros: longitud y diámetro.

#### *V02.1 – VARIACIÓN LONGITUD*

Se va a realizar un cambio en el diseño del molde, por lo que se deberá modificar el archivo realizado en Moldex3D Designer, crear su correspondiente mallado y simularlo con Moldex3D Project. Se partirá del archivo creado en la versión V01 – inicio para tratar de ahorrar trabajo. Con el fin de evitar la redundancia, los pasos ya explicados anteriormente se darán por sabidos, exponiendo de forma detallada únicamente las partes variantes.

#### *V02.1 MOLDEX3D DESIGNER*

Se comienza creando una copia del archivo .MDG correspondiente a la versión V01 y renombrándolo como V02.1. De esta forma, se trabajará con el archivo V02.1.MDG, conservando una copia del estado original de la versión V01.

Se inicia el programa Moldex3D Designer y se abre el archivo V02.1.MDG. Puesto que es una copia del archivo V01.MDG aparecerá el diseño tal y como se dejó en la versión inicial.

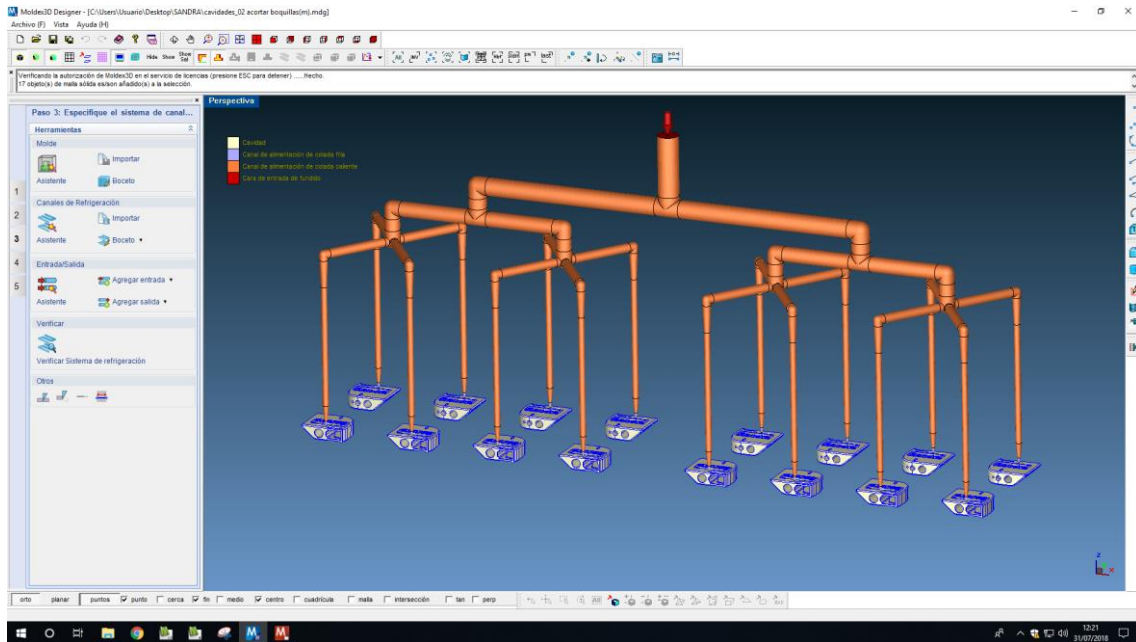


Fig. 5.74 Apertura archivo V02.MDG

Se desea modificar la longitud de los tubos de la cámara caliente. Para ello se eliminarán únicamente los canales a modificar y se crearán de nuevo. Se realiza una selección de todos ellos, o bien capturándolos, o bien seleccionando el primer canal y presionando la tecla Ctrl se seleccionan el resto uno tras otro. Una vez se tienen todos seleccionados se pulsa la tecla Supr e inmediatamente se eliminan.

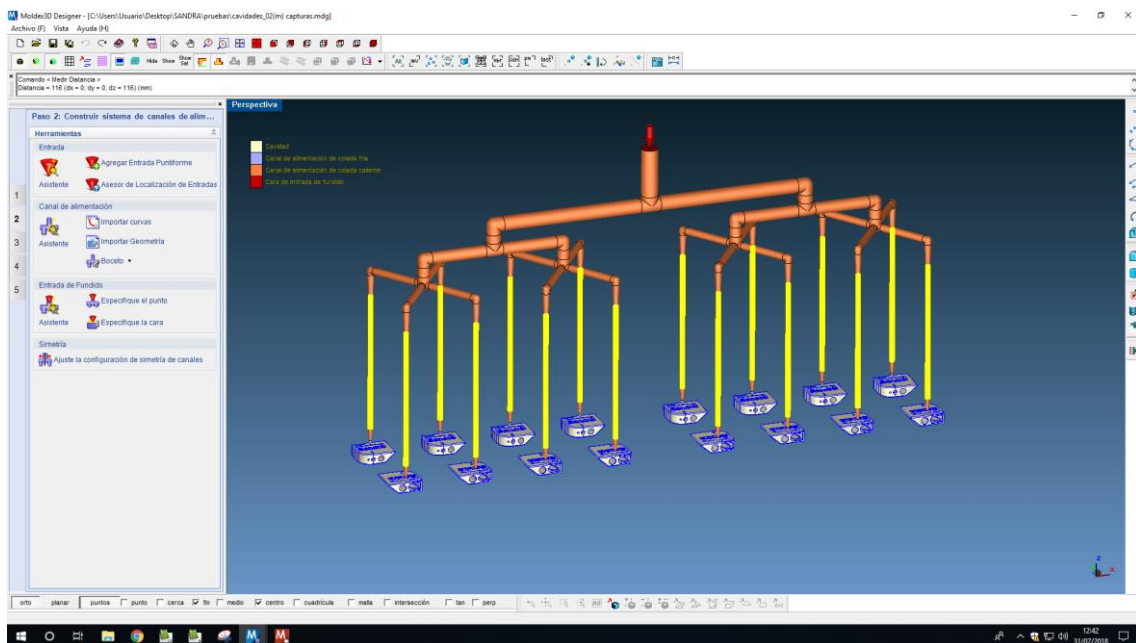


Fig. 5.75 Selección de los canales a eliminar

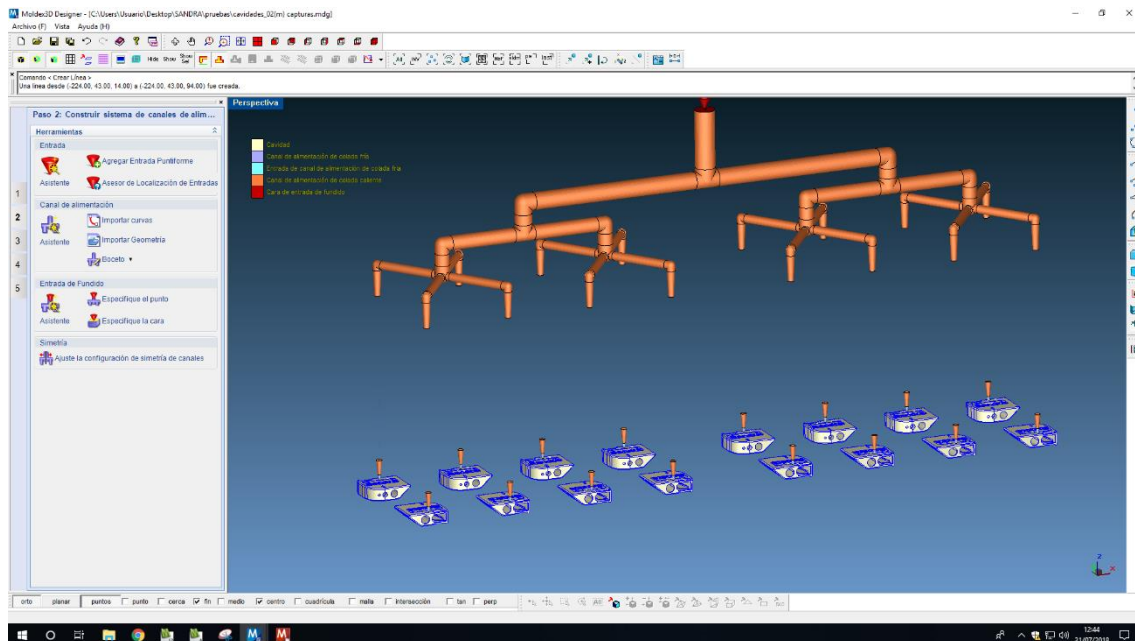


Fig. 5.76 Supresión de canales a modificar

Se deben crear ahora los canales con la nueva longitud y con el mismo diámetro que en la versión V01. En el proyecto modelo, la longitud estimada en la versión inicial era 116 cm, aunque sabiendo que la reducción de esta es una necesidad, se consigue poder acortarla hasta el valor de 80 cm. Se creará una línea vertical con el nuevo valor de longitud a continuación del canal de cámara caliente que esté en contacto con la pieza. Esto es así para posteriormente unir la parte superior de la cámara caliente a los conductos nuevos; si esto se hiciese al contrario, es decir, desplazando la parte inferior junto a la pieza, se estaría moviendo el cero del molde, cosa que no es recomendable hacer.

Se procede con los comandos de la barra lateral derecha para crear una línea que tendrá como punto inicial el punto final del canal caliente, con dirección vertical en el eje Z, y una longitud de 80cm.



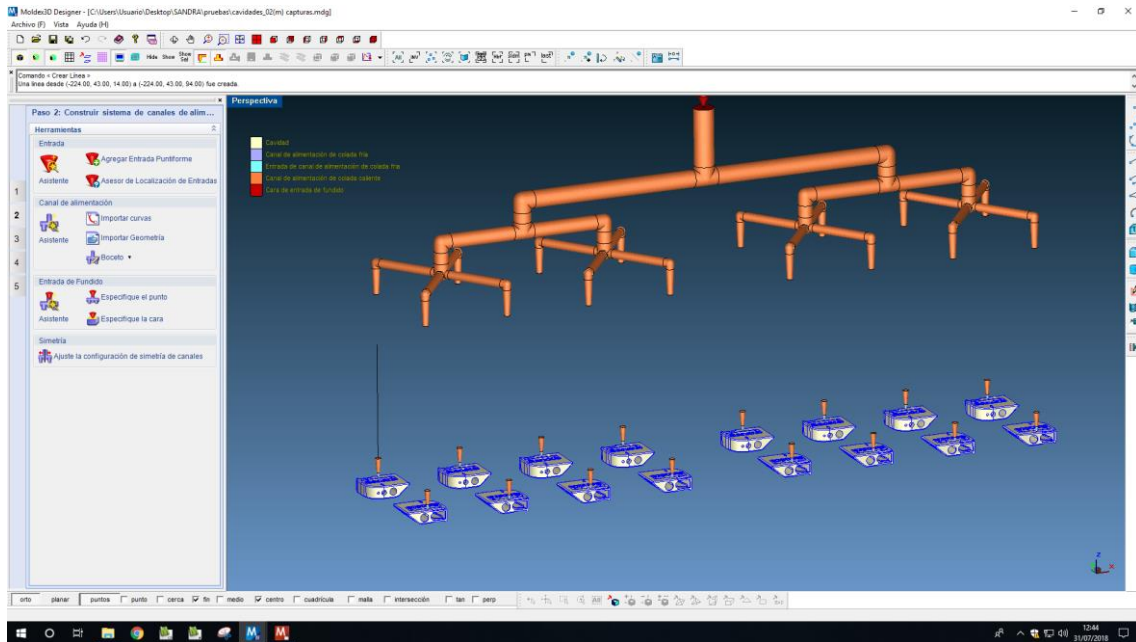


Fig. 5.77 Línea de canal con nueva longitud

Se le deben asignar características al conducto como el valor del diámetro y el tipo de canal. Para ello se hace clic derecho sobre la línea, y se selecciona la opción de “Editando los atributos del moldeo por inyección”.

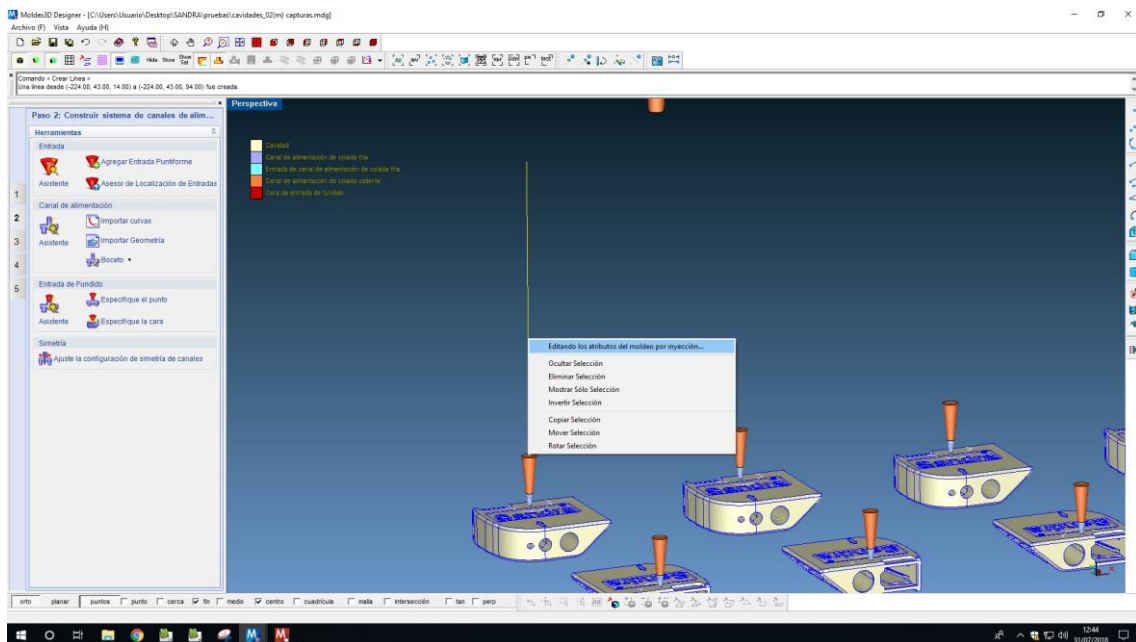


Fig. 5.78 Sobre la línea, clic derecho > “Editando los atributos del moldeo por inyección”

Aparece una ventana en la que se deben introducir los datos. En el caso modelo se trata de un canal de alimentación de colada caliente, con un diámetro constante de valor 4cm.

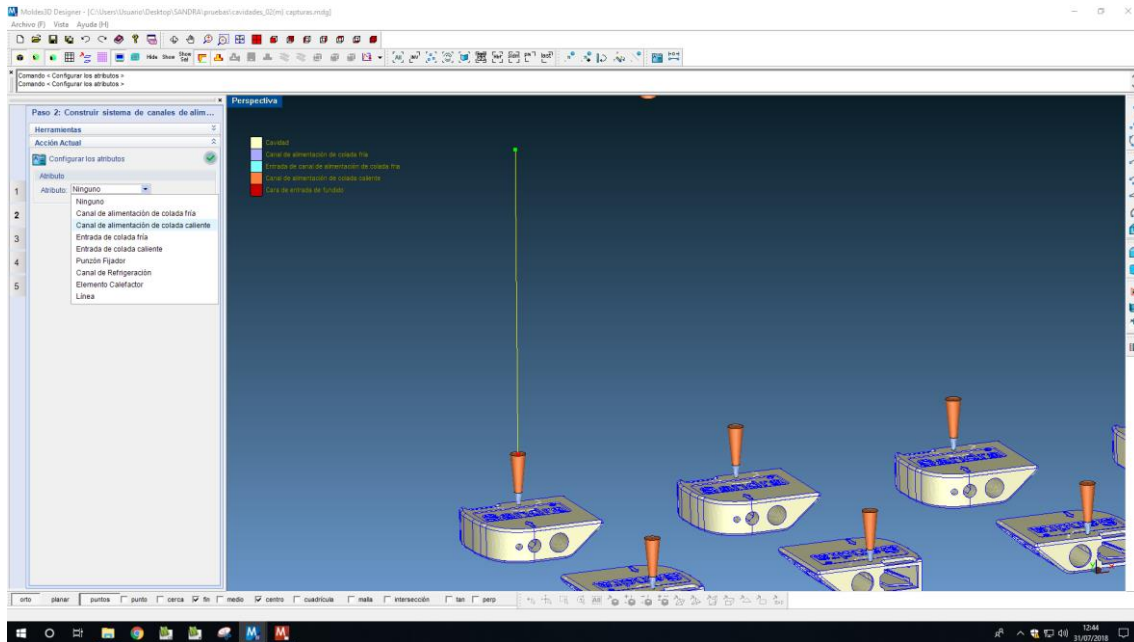


Fig. 5.79 Asignación atributo

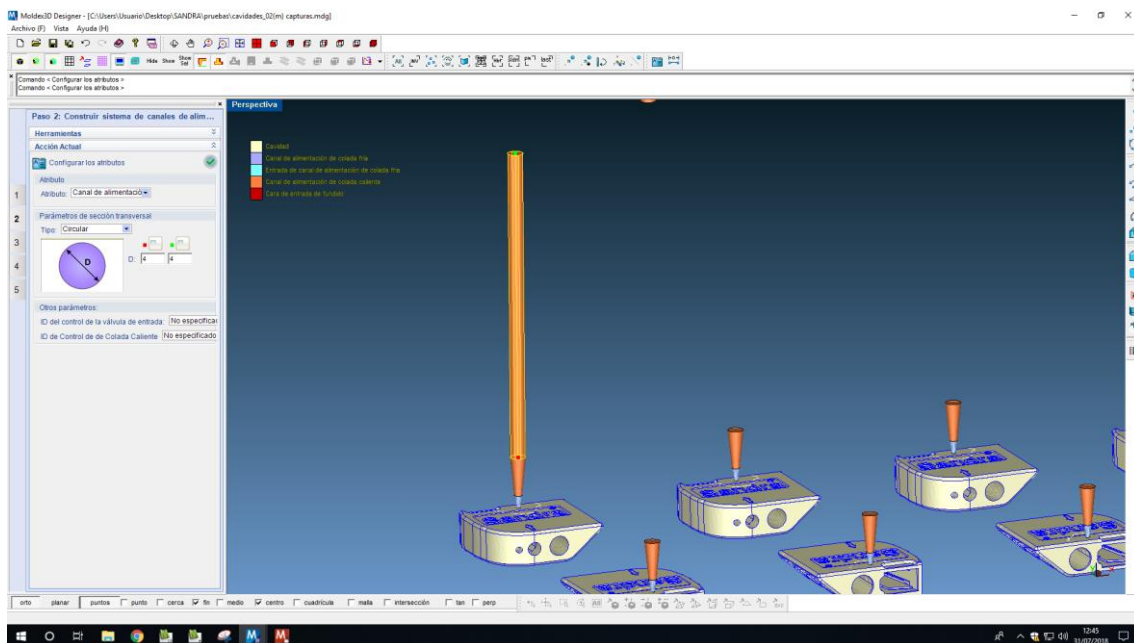


Fig. 5.80 Asignación diámetro

Ya se tiene creado el nuevo tubo del canal caliente de una de las piezas. En lugar de repetir el proceso para cada de ellas, se agilizará el proceso copiando y pegando el canal ya creado. Se selecciona el comando “Copiar objetos” de la barra superior, y a continuación aparecerá una ventana emergente que indica se seleccione los elementos a copiar. Se selecciona el tubo creado con la nueva longitud, el punto de referencia o de origen y el punto de destino donde se copiará el elemento; esto es sencillo hacerlo mediante rastreo del cursor.

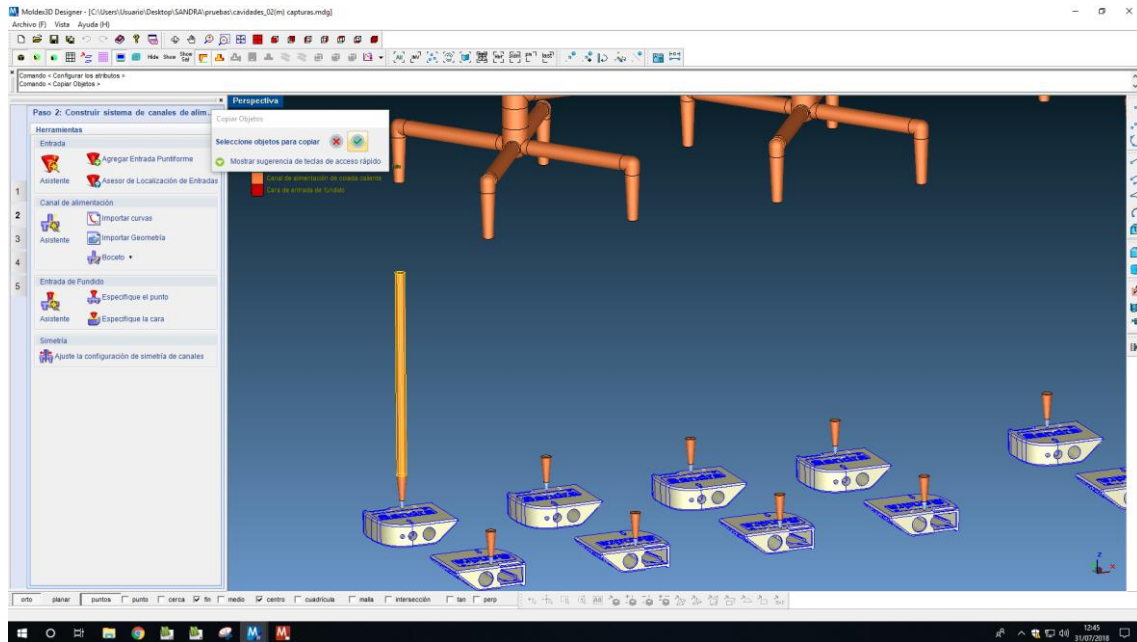


Fig. 5.81 En la barra superior > “Copiar” > selección canal vertical

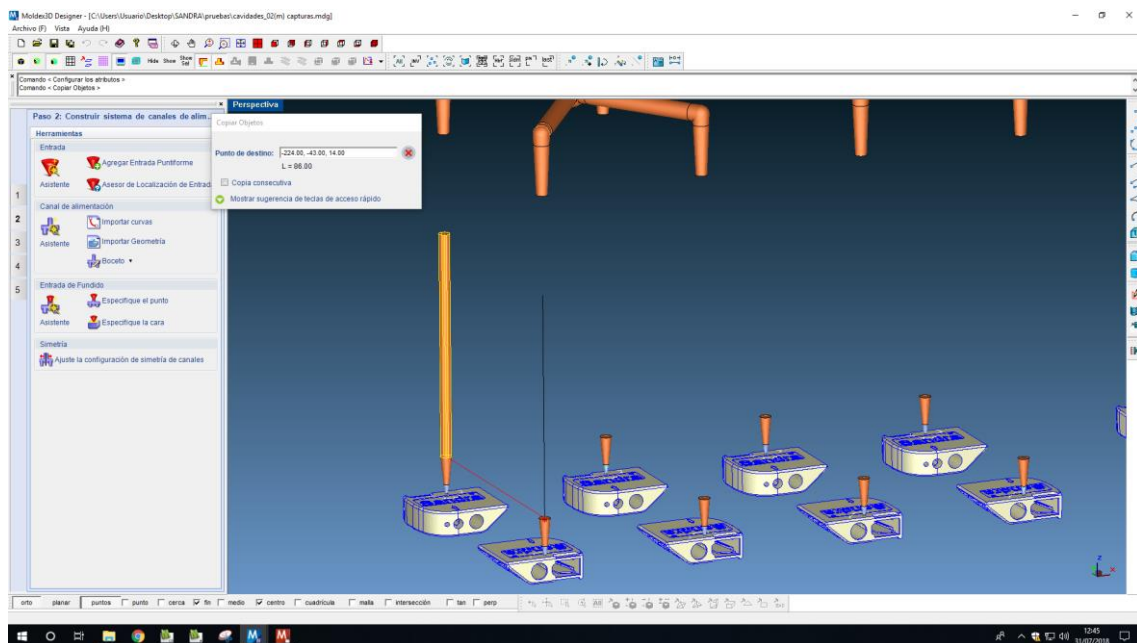


Fig. 5.82 En la barra superior > “Copiar” > selección de punto de origen y punto de destino

El resto de canales también serán creados con la herramienta de copiar, aunque se puede agilizar todavía más el proceso mediante la opción que ofrece el comando de “Copiar objetos” “Copia consecutiva”. Esto permite seleccionar los objetos a crear y el punto de origen una única vez, y seleccionar muchos puntos de destino; evitando de esta forma la selección de los objetos y puntos de inicio en cada copia a realizar.

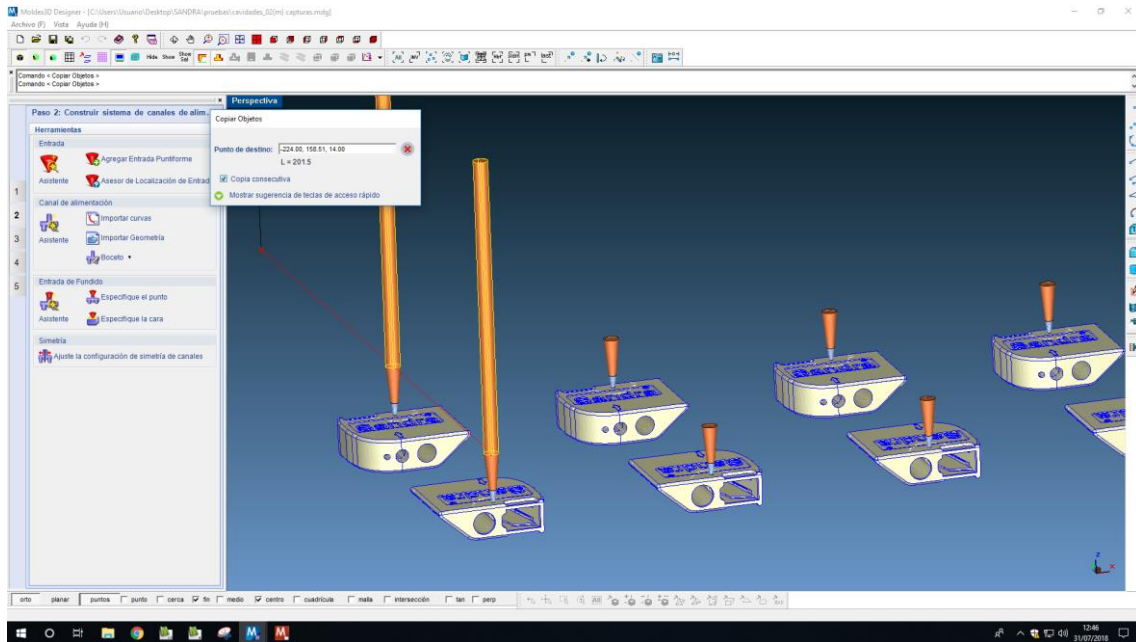


Fig. 5.83 En la barra superior > “Copiar” > copia consecutiva > selección objetos a copiar

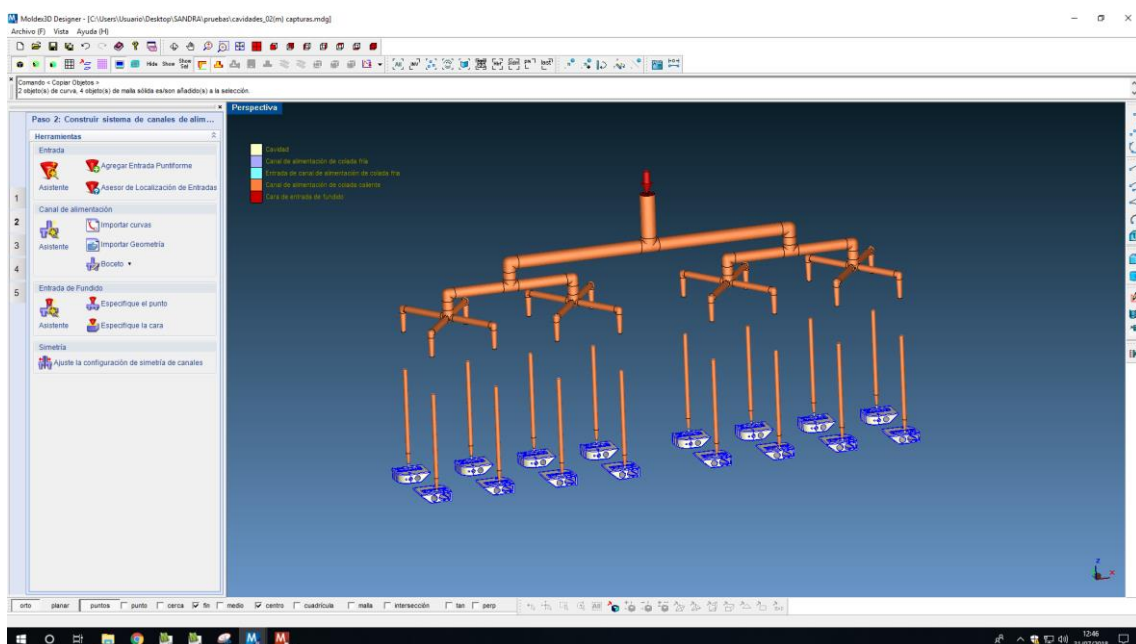


Fig. 5.84 Resultado de todos los canales copiados

Una vez se tienen creados todos los canales, el sistema queda completo pero con la parte superior desplazada respecto de la inferior. Se unen mediante el comando “Desplazar objetos”, situado en la barra superior. Funciona de modo similar al comando “Copiar objetos”.

Se hace clic en “Desplazar objetos” y se seleccionan los objetos a trasladar. En el caso modelo, como se ha explicado anteriormente, se debe desplazar la parte superior hacia la cavidad, de modo que el cero del molde quede en el mismo lugar que inicialmente.

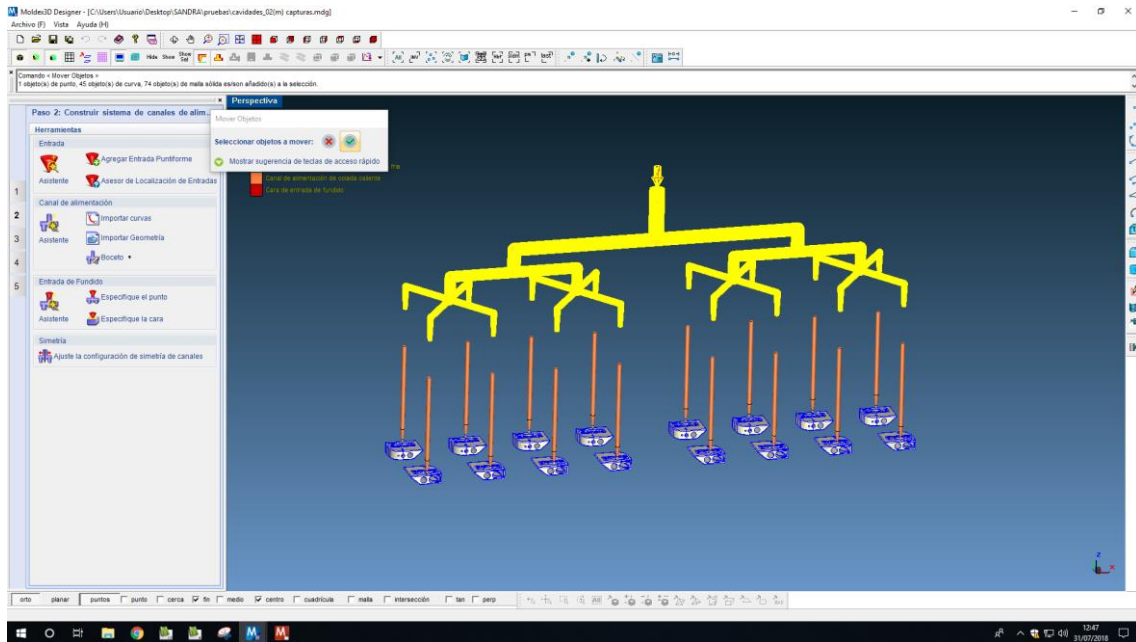


Fig. 5.85 En la barra superior > “Desplazar objetos” > selección de objetos a desplazar

Se tomará un punto de origen como referencia para realizar el movimiento, seleccionando a continuación un punto de destino. Se recomienda seleccionar ambos puntos por rastreo, aunque también pueden introducirse las coordenadas manualmente.

En el caso ejemplo se han seleccionado los centros de dos conductos a unir mediante el rastreo de estos.

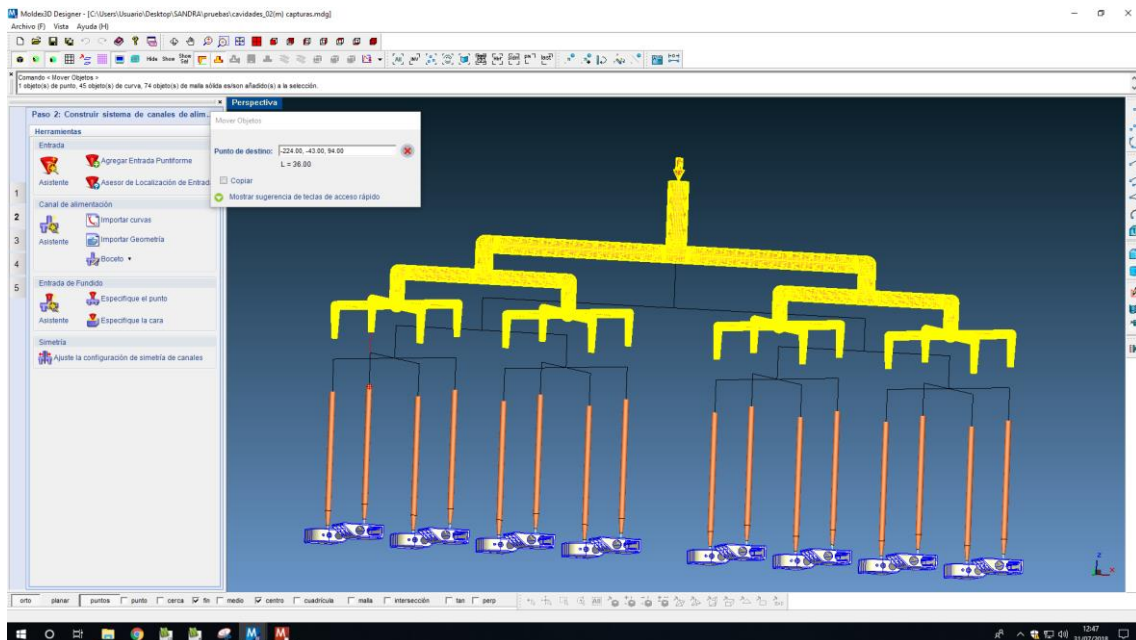


Fig. 5.86 En la barra superior > “Desplazar objetos” > selección de punto de origen y destino

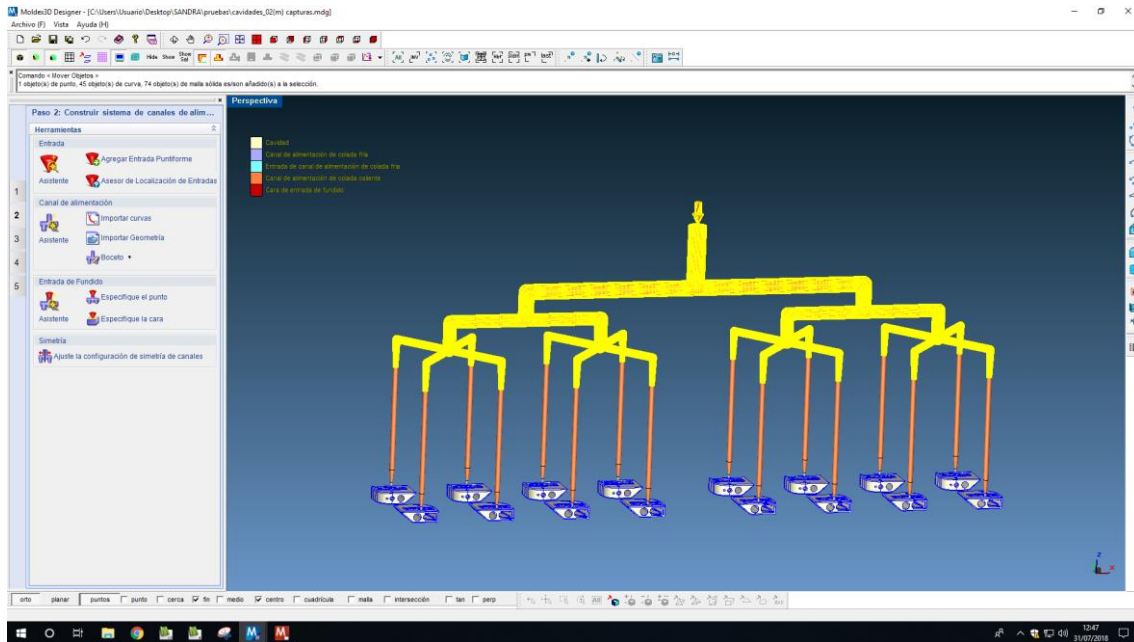


Fig. 5.87 Resultado de todo el sistema de canales unido

Con el canal de colada caliente unido, ya se tienen terminadas las modificaciones a realizar, por lo que el diseño está listo para ser mallado. Como ya se sabe, el mallado se lleva a cabo en el paso 4, haciendo clic en “Generar”.

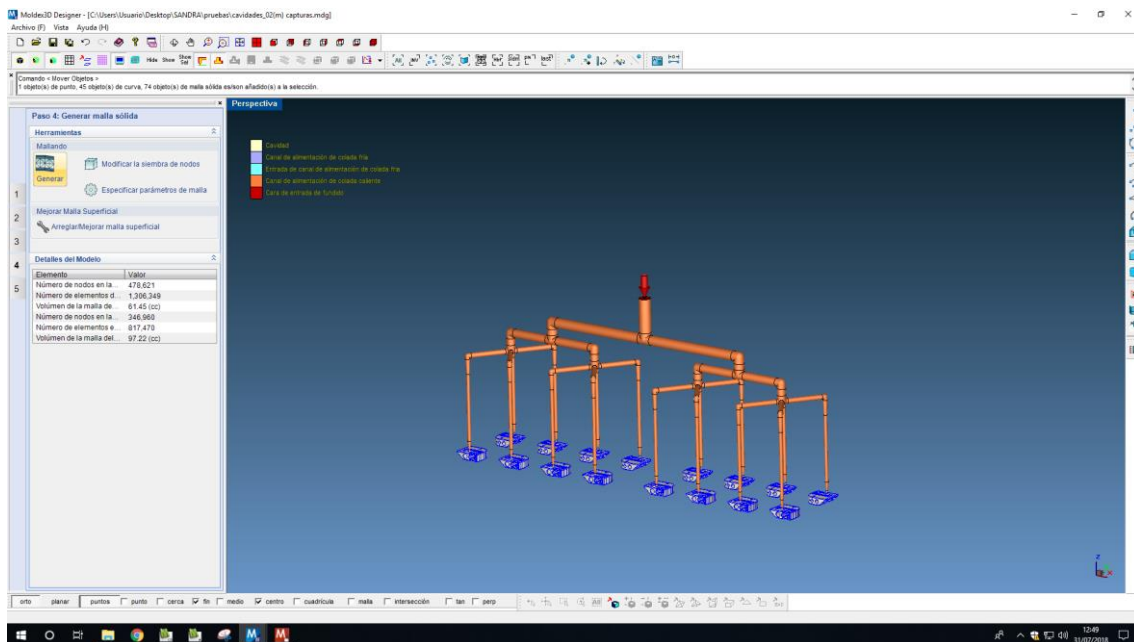


Fig. 5.88 En paso 4, “Generar”

Como se ha modificado únicamente la cámara caliente, el programa detecta que la malla de la cavidad no es necesario realizarla y es por esto que la marca como hecha. Solamente queda por mallar el conducto de alimentación.

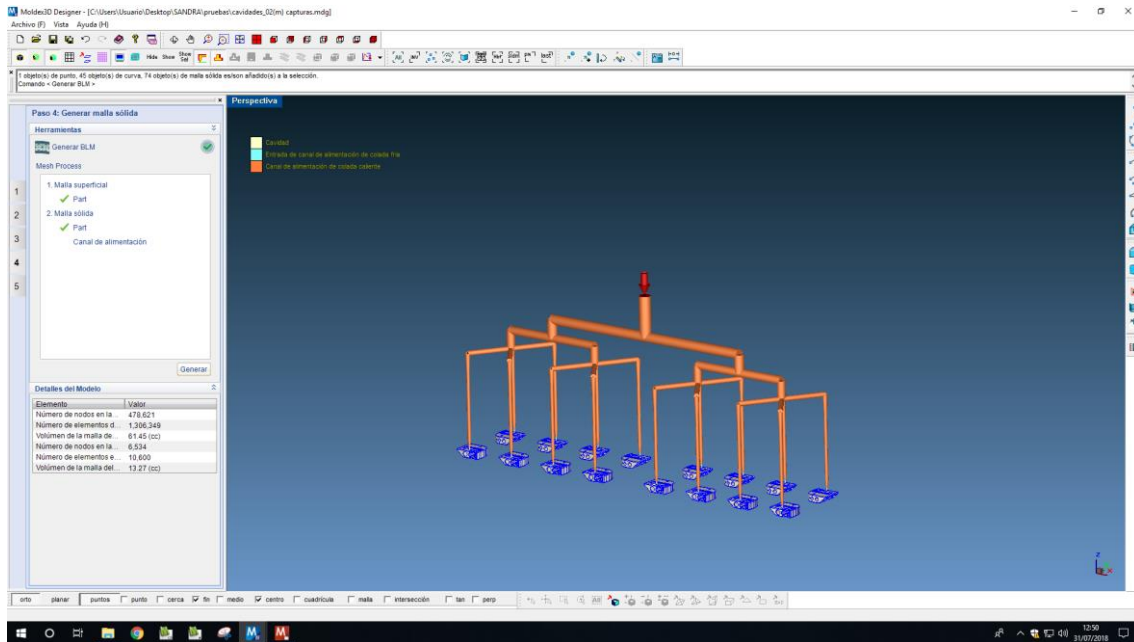


Fig. 5.89 En paso 4, “Generar” > lista elementos a mallar

Se hace clic en “Canal de alimentación” para indicar en qué componente se desea crear la malla, y a continuación se hace clic en “Generar”. En caso de deber de mallar más de un componente se realizaría la malla de cada uno de ellos por separado, como se explicó en la versión V01 – inicial. El proceso de mallado puede ser algo costoso para el programa. En caso de producirse algún error en el mallado, se solucionaría procediendo tal y como se ha explicado en la versión V01 – inicial.

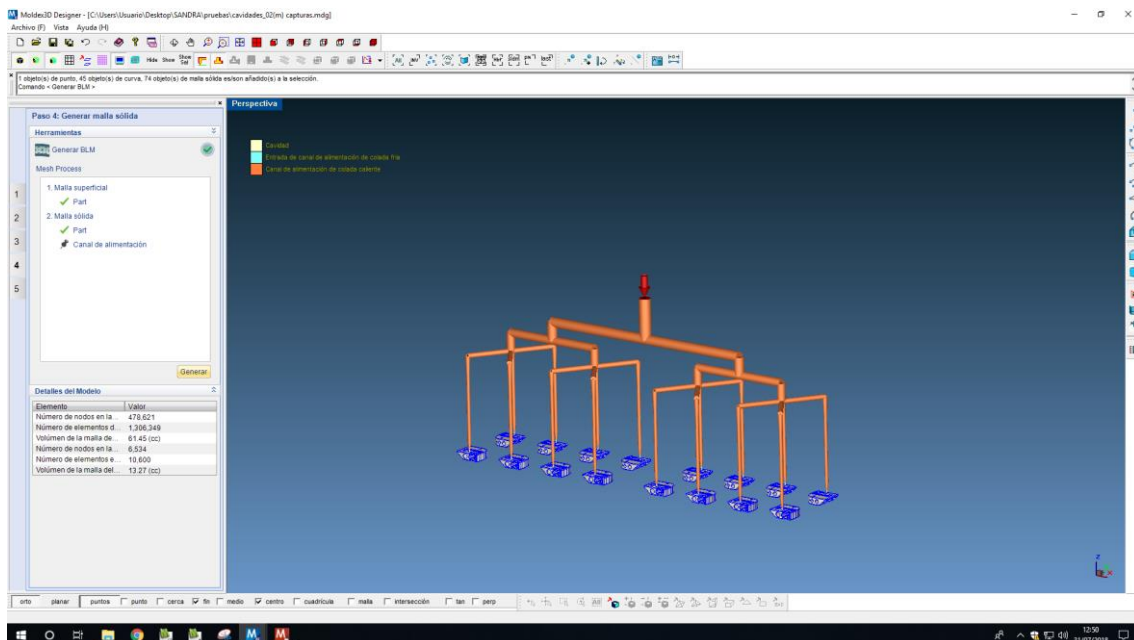


Fig. 5.90 En paso 4, “Generar” > selección de elemento a mallar

Puesto que no quedan más componentes para mallar, ya se tendría realizada la malla de todo el sistema. El siguiente paso es guardar la malla en archivo .MFE para poder abrirla posteriormente con Moldex3D Project y realizar las simulaciones correspondientes. Como ya se sabe, el proceso de exportación se lleva a cabo en el paso 5.

## V02.1 MOLDEX3D PROJECT

Una vez exportado el archivo del mallado del programa de Moldex3D Designer, comienza el trabajo con Moldex3D Project. Para realizar la simulación de la versión V02.1 se debe crear una nueva ejecución dentro del proyecto ya creado. Se inicia el programa Moldex3D Project y se abre el proyecto creado para la versión V01. Aparecerá la primera ejecución correspondiente al primer análisis, con los resultados de este. Para crear la nueva ejecución se debe hacer doble clic en la ventana del lateral izquierdo, a continuación de la primera ejecución, donde el programa indica “Hacer doble clic aquí para agregar una nueva ejecución”.

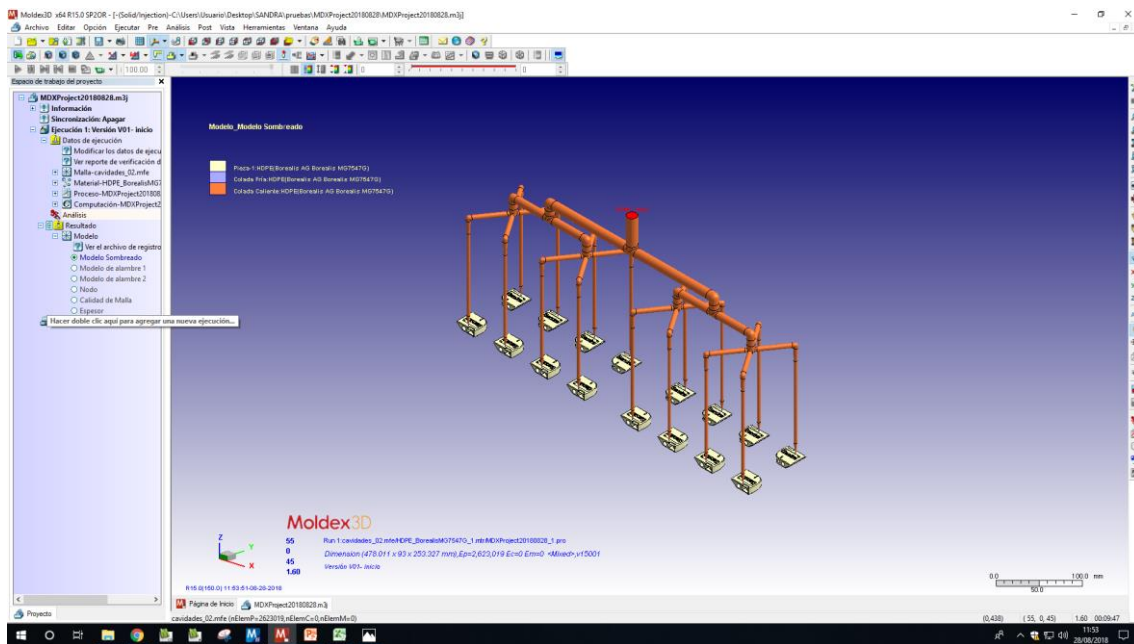


Fig. 5.91 En árbol de lateral izquierdo > “Hacer doble clic aquí para agregar una nueva ejecución”

Del mismo modo que en la versión V01, aparece una ventana emergente con múltiples pestañas para introducir todos los datos de la simulación. Se puede crear una ejecución nueva o importar una ya utilizada anteriormente. En caso de crear una nueva ejecución, los pasos a seguir a la hora de introducir las variables son los mismos que los expuestos para el caso de la versión V01.

En el caso modelo, en observaciones se indicará que se trata de una nueva versión V02.1 – Variación de longitud. A excepción del archivo .MFE a seleccionar, que obviamente se seleccionará el creado para esta versión, el resto de datos a introducir son los mismos que en la versión V01.



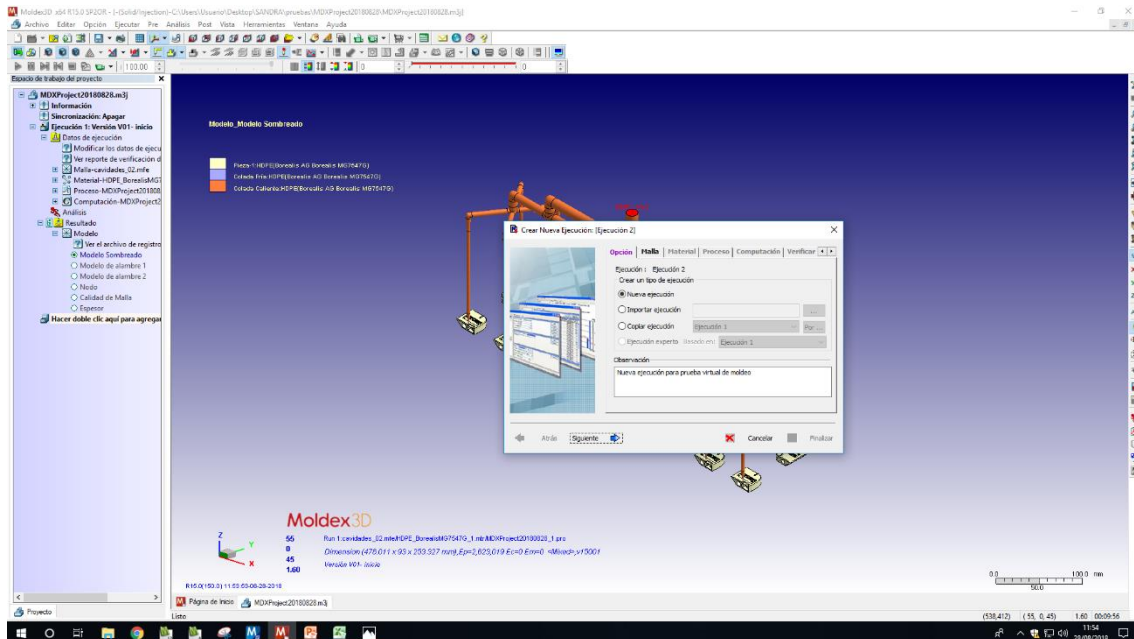


Fig. 5.92 Crear nueva ejecución > ventana de “opción”

Cuando se tengan todos los datos de la ejecución introducidos, se iniciará el cálculo del análisis del mismo modo que se hizo en la versión V01.

### V02.1 RESULTADOS

A continuación se tratarán los resultados obtenidos del análisis correspondiente a la versión V02.1. Puesto que ya se han expuesto teóricamente los parámetros más relevantes del estudio, y la versión a analizar es una ampliación o modificación de la versión inicial; con el fin de agilizar el proceso únicamente se mencionarán los aspectos en los que haya algún cambio respecto de la versión V01.

Hay parámetros como el tiempo del frente de flujo, las líneas de unión, la temperatura central o la relación de la capa congelada, que sufren una variación insignificante de una versión a otra. Sin embargo, los cambios que se buscaban tras modificar el diseño, se han visto reflejados en parámetros como la presión o la fuerza de cierre.

- LLENADO
  - Presión

La distribución de presiones en la cavidad es prácticamente la misma que en el ensayo anterior, pero sí cambian los valores de esta. Se calcula la nueva pérdida de carga en el canal de alimentación:

$$\text{caída de presión en cc} = P_{\text{max}_{\text{con cc}}} - P_{\text{max}_{\text{sin cc}}} = \quad (6)$$

$$23.22 - 12.32 = 10.90 \text{ MPa}$$

En la versión V01 se apreciaba una caída de presión de 20.28MPa. Con el nuevo diseño se ha conseguido aminorar a 10.90MPa. Este nuevo valor supone una reducción de casi 10 puntos, un 46.25% menos de caída de presión.

- COMPACTACIÓN
- Presión

Se comprueba que la modificación realizada no afecte de forma negativa a las presiones en la fase de compactación.

En el caso ejemplo, la distribución de presiones de la versión V02.1 en esta fase es similar a la de la versión inicial, luego no existe ningún tipo de problema.

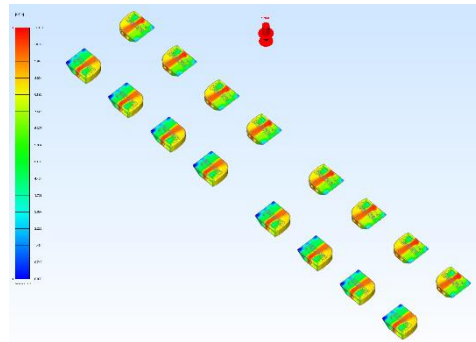


Fig. 5.93 Resultado compactación V02.1: presión

- Densidad

La densidad, en la inyección de material, es un parámetro directamente relacionado con la presión. Si la distribución de presiones en la fase de compactación es la adecuada, la densidad también debería ser correcta. No obstante, se comprueba para tratar de asegurarse.

En el caso ejemplo se comprueba que la densidad es homogénea, por lo que se ha realizado una fase de compactación adecuada.

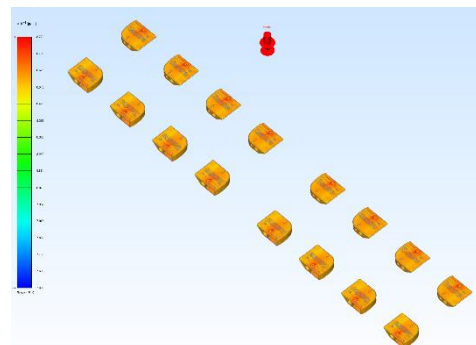


Fig. 5.94 Resultado compactación V02.1: densidad

- Fuerza de cierre

La curva XY que sigue la fuerza de cierre frente al tiempo es la misma en ambos casos. La diferencia radica en que se ha conseguido disminuir la fuerza requerida calculada por el programa. En la versión V01 era necesaria una fuerza de 26.22 toneladas, en la versión V02.1 es suficiente con 22.80 toneladas, lo que representa una reducción del 13.04%. Cuando se habla de valores de fuerza tan pequeños, no es relevante esta reducción; en cambio, si se trata de un molde diseñado para piezas voluminosas donde es necesaria una gran fuerza de cierre, una reducción del 13.04% supone una gran cantidad de toneladas. Reducir la fuerza de cierre necesaria es interesante ya que el molde podría inyectarse en una máquina de menor coste, aumentando así las ganancias en el producto.

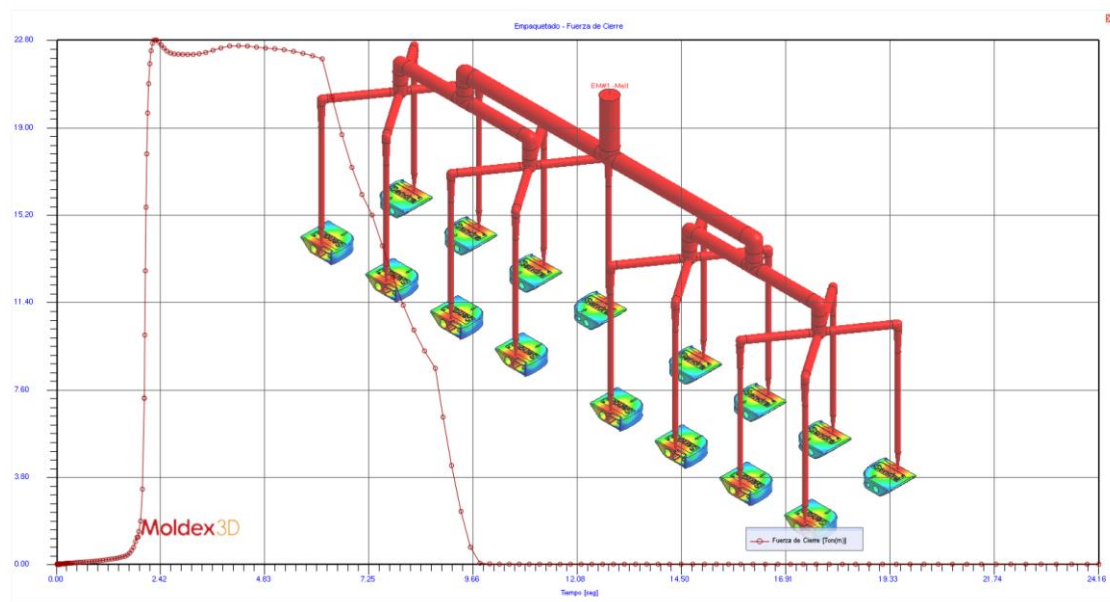


Fig. 5.95 Resultado compactación V02.1: fuerza de cierre

### 5.3.1. V02.2 – VARIACIÓN SECCIÓN

Partiendo de la versión V02.1, se realizan las modificaciones pertinentes en el programa Moldex3D Designer para modificar la sección y conseguir una mayor reducción de la pérdida de carga en el sistema de colada caliente. Al igual que se ha procedido en la versión V02.1, se exportará la malla del diseño para simularla en Moldex3D Project y comparar los resultados obtenidos, esperando obtener mejoras.

#### V02.2 MOLDEX3D DESIGNER

Tal y como se hará cada vez que se cree una nueva versión, se guarda la versión anterior como V02.2 para trabajar sobre esta, manteniendo la versión anterior intacta. De este modo, al terminar el estudio se conservará un archivo de Moldex3D Designer para cada versión.

Se inicia el programa Moldex3D Designer y se abre el archivo V02.2.MDG. El estado actual del diseño tiene la altura modificada en la versión anterior, el objetivo ahora es cambiar las dimensiones sección. Se cuenta con un diámetro de canal principal de 4 cm, el cual se va a cambiar por un diámetro de 6 cm; debiendo modificar a su vez los canales adyacentes para acomodarlos a la nueva dimensión. A diferencia de la versión anterior, no es necesario eliminar los conductos, será suficiente con modificar los parámetros de la sección transversal.

Se selecciona el canal que se va a modificar, se hace clic derecho sobre este y se selecciona la opción de “Editando los atributos del moldeo por inyección”. Aparece la ventana de configurar atributos en el lateral izquierdo, y se introducen los nuevos valores de diámetro. Se debe repetir el proceso para el tramo principal, y los adyacentes. Tener en cuenta que el atributo sigue siendo “Canal de alimentación”, por lo que hay que cerciorarse de no modificarlo.

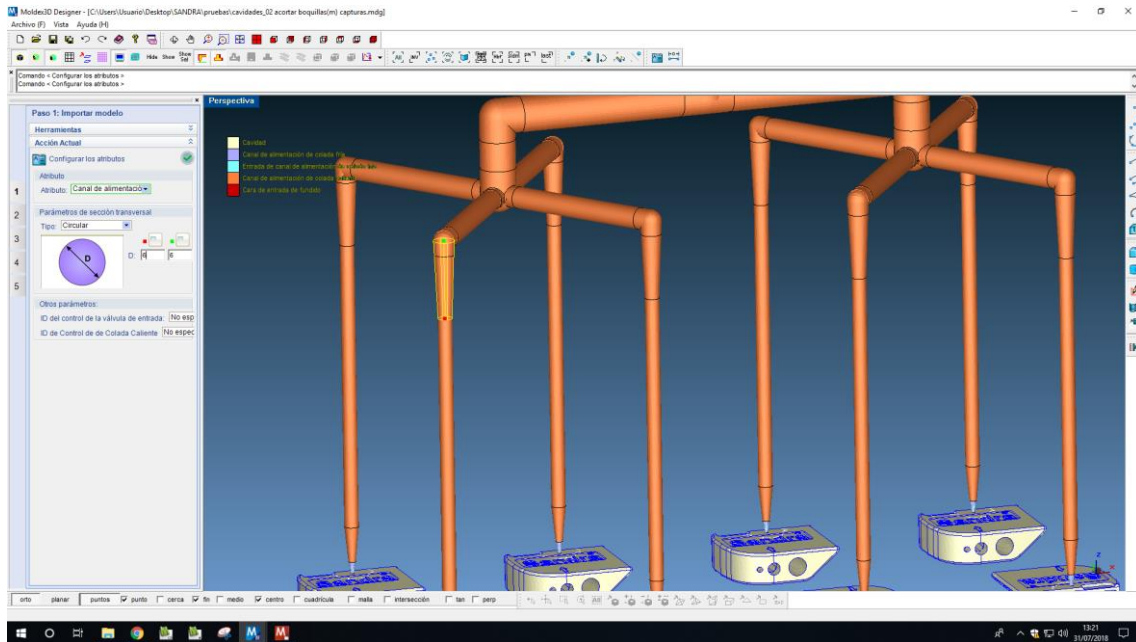


Fig. 5.96 Modificación diámetro 1

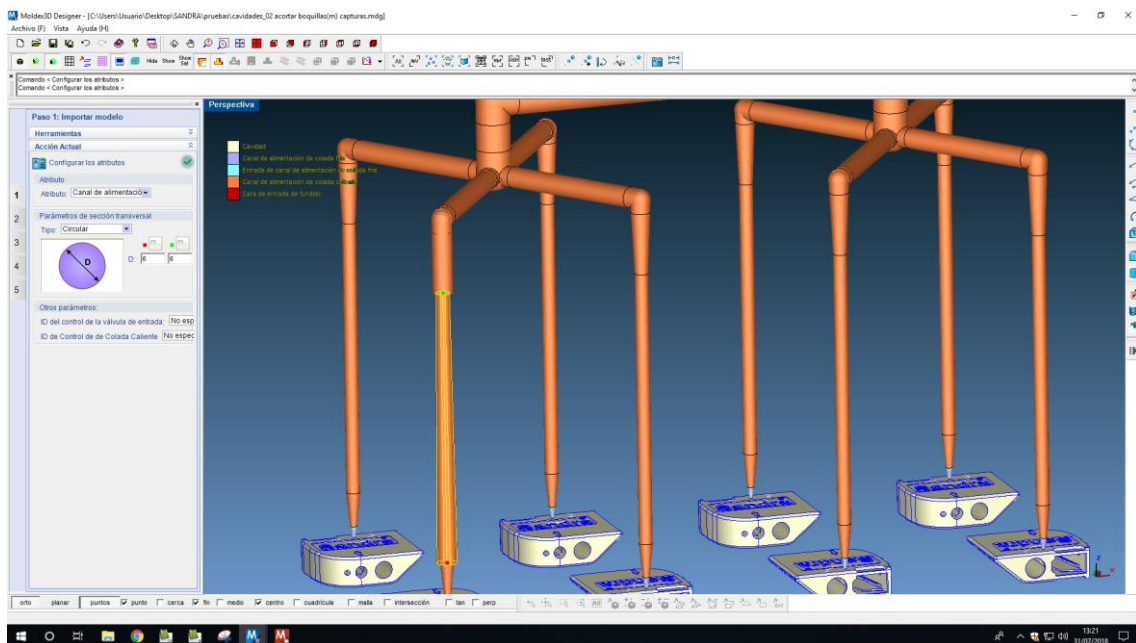


Fig. 5.97 Modificación diámetro 2

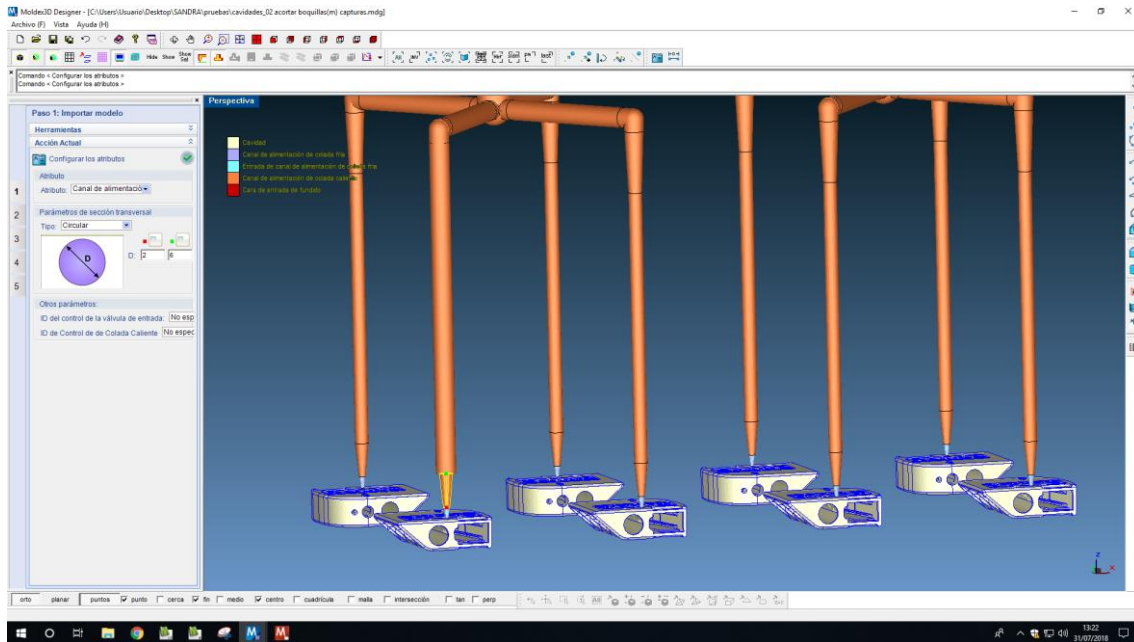


Fig. 5.98 Modificación diámetro 3

Ya se tiene el conducto totalmente modificado. Podrían cambiarse el resto procediendo con las mismas pautas; no obstante, se recomienda eliminar los conductos con las dimensiones antiguas para copiar el canal ya acondicionado. Si además se selecciona la opción de “Copia consecutiva” ya vista, el trabajo es mucho menos costoso. En el caso ejemplo se procede de este modo, seleccionando además los puntos de destino mediante rastreo. El resultado obtenido es el que sigue.

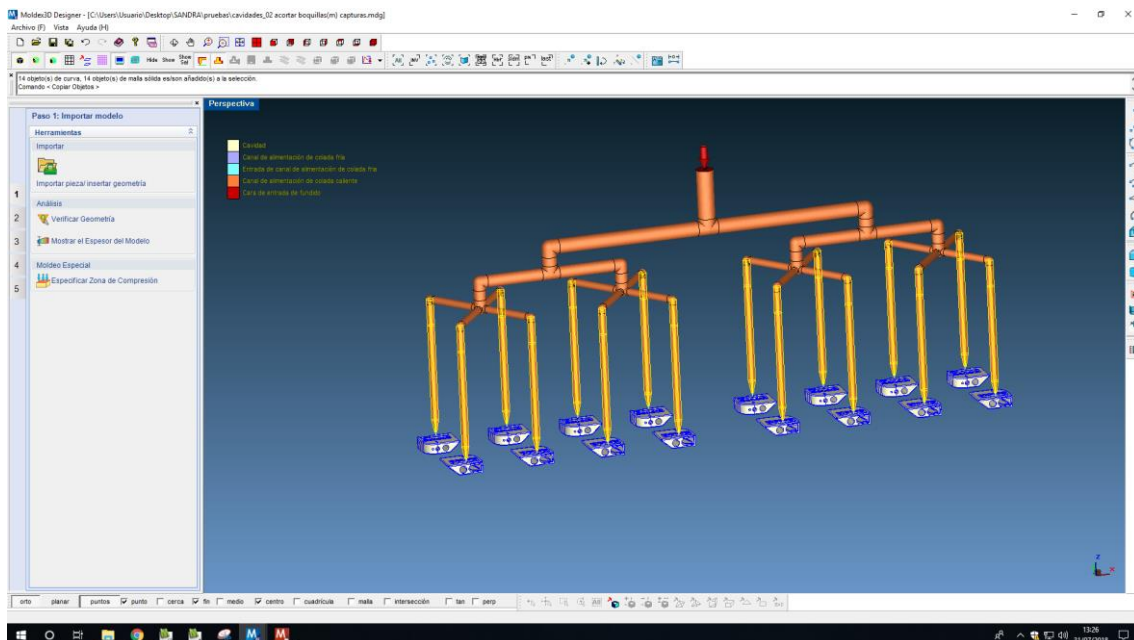


Fig. 5.99 Resultado de todos los canales copiados

Una vez modificadas todas las secciones transversales ya se tiene terminado el diseño de la versión V02.2. Se deberá crear ahora el mallado de todo el sistema en el paso 4. Igual que en la versión anterior, solo se ha modificado el canal de alimentación, por lo que el programa únicamente necesitará mallar esta parte.

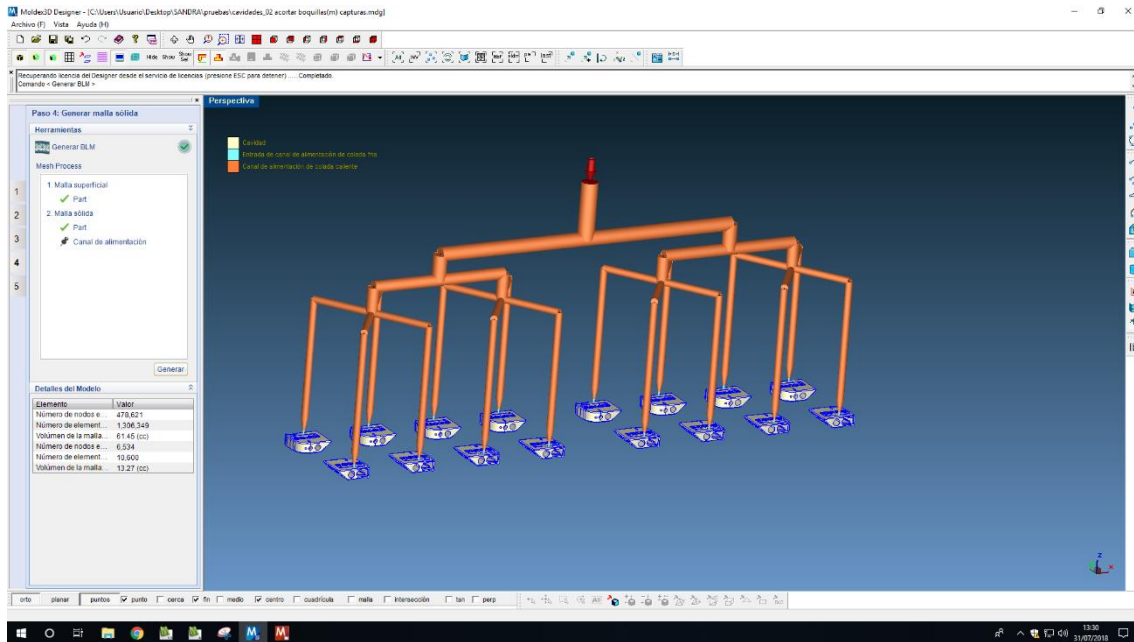


Fig. 5.100 En paso 4, mallado del canal de alimentación

Cuando se haya creado el mallado del canal de alimentación, reparando la malla corrupta si procede, se dará por terminado el paso de generar la malla.

En este punto, se debe exportar la malla del nuevo diseño a archivo .MFE en el paso 5, para poder trabajar con ella en Moldex3D Project.

### V02.2 MOLDEX3D PROJECT

Se simula la nueva versión creada añadiendo una nueva ejecución en el proyecto. Se trata de la ejecución número 3 a la que se le dará nombre de V02.2 – Variación sección.

Los pasos a seguir para añadir la ejecución y simularla son exactamente los mismos que en la versión V02.1. A parte de la malla, que se seleccionará la correspondiente a esta versión, el resto de parámetros a introducir para el análisis son invariantes.

Una vez se ha completado la introducción de datos, se inicia la simulación para el posterior estudio de resultados.

### V02.2 RESULTADOS

Se procede a interpretar y comparar los resultados del análisis de la versión V02.2 con la versión V02.1 y la versión V01. Con ello se verá la evolución de la pérdida de carga, como dato principal, respecto a la modificación de la altura de canal para apreciar la variación debida a la sección; y respecto a la versión inicial, contando así con todas las modificaciones realizadas al diseño.

- LLENADO
- Presión

Se calcula la pérdida de carga con la modificación de la sección transversal de los canales.

$$\begin{aligned} \text{caída de presión en cc} &= P_{\text{max}_{\text{con cc}}} - P_{\text{max}_{\text{sin cc}}} = \\ &16.74 - 12.85 = 4.89 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (7)$$

Comparando con la versión anterior V02.1, donde la caída de presión era de 10.60MPa, se ha conseguido reducir 6.01MPa. Pasar de una versión con la longitud modificada, a una versión en

la que también se modifica la sección, supone una disminución de la pérdida de carga de más de la mitad: un 55.14%.

Si se compara con la versión V01 con la versión V02.2, es decir, si se compara la situación inicial con una situación en la que se ha modificado tanto el diámetro como la longitud de los canales, el cambio que se percibe es mucho más brusco. En la versión V01 la caída de presión era 20.28MPa, por lo que se tiene una disminución de 15.39 puntos, que hablando en porcentajes es un 75.89% de disminución.

Todo esto queda reflejado en la tabla que se muestra a continuación.

	Presión (MPa)	Caída de presión (MPa)	Reducción c.p (MPa)	Reducción c.p (%)
V01	27,14	20,28	-	-
V02.1	23,22	10,9	9,38	46,25
V02.2	16,74	4,89	6,01	55,14
V02 acumulado	-	-	15,39	75,89

Tabla 2 Evolución de la presión de llenado.

#### ➤ COMPACTACIÓN

##### ○ Presión

Se comprueba que, al igual que sucedía con las modificaciones realizadas en la versión V01, la distribución de presiones no se ve afectada por la variación de la sección transversal de los canales.

##### ○ Densidad

A modo de comprobación, tras consultar los resultados de densidad, se corrobora que la pieza tiene una distribución de material homogénea.

##### ○ Fuerza de cierre

La fuerza de cierre requerida por el sistema en el caso de la versión V02.2 es de 16.08 toneladas. Únicamente modificando el diámetro se consigue una reducción de 6.72 toneladas, es decir, una disminución del 29.47%. Si se cuenta con las modificaciones de las versiones V02.1 y V02.2 a la vez, se ha conseguido una reducción de 10.14 toneladas, lo que se puede reflejar en un 38.67%.

Se resume todo de forma esquemática en la tabla.

	Fuerza de cierre (Ton)	Reducción f.c (Ton)	Reducción f.c (%)
V01	26,22	-	-
V02.1	22,8	3,42	13,04
V02.2	16,08	6,72	29,47
V02 acumulado	-	10,14	38,67

Tabla 3 Evolución de la fuerza de cierre

## 5.4. V03 – REFRIGERACIÓN

Como ya se ha explicado, las dos primeras fases en el ciclo de un molde en funcionamiento son llenado y compactación. Aunque la refrigeración del plástico se realiza desde el principio de la fase de llenado, la fase de refrigeración como tal tiene inicio una vez termina la fase de compactación; y esta no termina hasta que se abre el molde para proceder a la expulsión de la pieza. No debe suponerse que cuando la pieza es expulsada del molde está completamente sólida, ya que en la mayoría de los casos no es así. La pieza puede expulsarse una vez haya adquirido una consistencia adecuada (Autodesk knowledge network (s.f.)).

Aspectos de la refrigeración como la velocidad o la uniformidad, son clave a la hora de medir la calidad y los costes de producción de la pieza. El tiempo invertido en la fase de refrigeración del molde es de aproximadamente dos tercios del total del tiempo de ciclo. Si el tiempo refrigeración obtenido está por encima de este rango, debería tratar de reducirse. Algunas formas de reducir el tiempo de refrigeración son aumentar el caudal de líquido refrigerante, aumentar el recorrido de los canales de refrigeración, crear mayor número de entradas y salidas de líquido o aproximar lo máximo posible el canal de refrigeración a la cavidad.

El programa Moldex3D permite la opción de introducir un circuito de refrigeración y simularlo. No obstante, si esto no desea hacerse, estima unos parámetros aproximados de refrigeración para completar los cálculos del ciclo del molde.

En este estudio va a dedicarse una versión a introducir y simular canales de refrigeración tanto en la parte móvil como en la parte fija del molde. Se mostrará cómo diseñar los canales de refrigeración en Moldex3D Designer, cómo realizar la ejecución en Moldex3D Project, y finalmente se explicará cómo interpretar los resultados del análisis.

### *V03 MOLDEX3D DESIGNER*

Para poder comenzar a trabajar en el diseño de esta nueva versión partiendo del estado final de la última ejecución, debe crearse un archivo copia de la última versión que se tenga. En este caso se creará el archivo V03.MDG a partir de la versión V02.2.MDG.

Se recuerda que en el programa de Moldex3D Designer hay una barra lateral con una numeración del 1 al 5 con los pasos a seguir a la hora de realizar un diseño. Hasta el momento, se han explicado y utilizados todos a excepción del 3, el cual se dedica a la refrigeración. Es el paso en el que se centrará esta parte del estudio.

Se inicia el programa Moldex3D Designer y se abre el archivo copia creado, V03.MDG. Puesto que se ha partido de la versión V02.2, se tiene ya diseñado tanto las cavidades como el canal de colada caliente con sus debidas mejoras. Se comienza a trabajar directamente en el paso 3.

Es importante saber que para realizar simulaciones con el canal de refrigeración, el programa Moldex3D exige que se introduzca un tocho con el volumen máximo del molde completo. Es por esto que ofrece un asistente para su creación, aunque también pueden introducirse las dimensiones si se conocen. Otras opciones son importarlo o crearlo mediante un boceto. En el caso ejemplo se emplea el asistente, introduciendo las medidas máximas del portamoldes seleccionado.



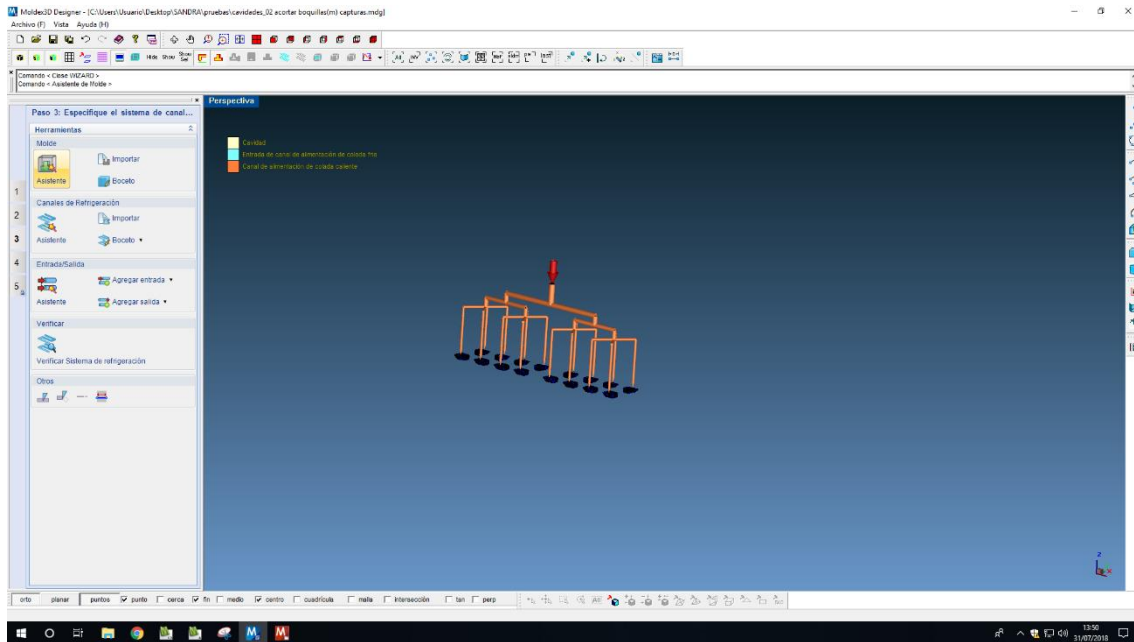


Fig. 5.101 En paso 3, "Asistente"

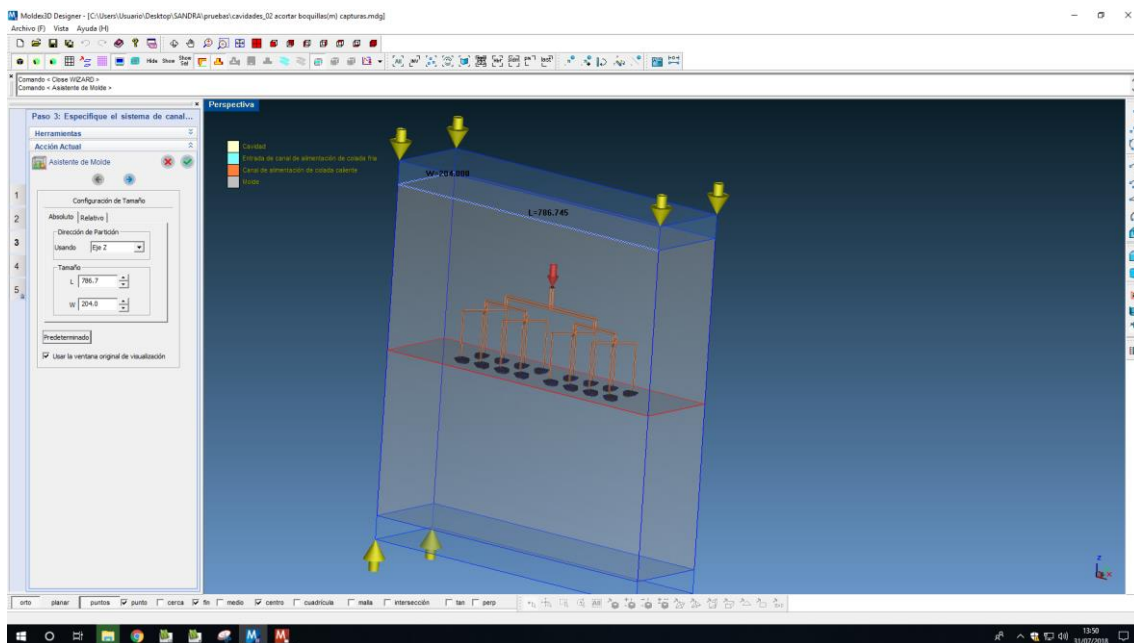


Fig. 5.102 En paso 3, "Asistente" > introducción de medidas tocho

El siguiente paso es introducir los canales de refrigeración, para ello hay varias opciones. Se puede crear o importar un boceto y a partir de este dar propiedades a las líneas, o bien importar los canales de refrigeración con volumen. Si se hace clic en "Boceto" el programa da opción de insertar líneas o arcos, mientras que si se hace clic en "Importar" se puede importar tanto croquis como un 3D de los canales de refrigeración con un archivo de intercambio. Si se elige esta última opción, se recomienda importar los canales de refrigeración posicionados en el eje Z como corresponde.

En el caso ejemplo se han introducido los canales de refrigeración importando un archivo 3D de estos. Se ha tomado esta opción por ser más rápida si se tienen dibujados en algún programa de

diseño CAD, como era el caso. Para ello, se hace clic en “Importar” y se selecciona el archivo que corresponda en un cuadro de diálogo de Windows.

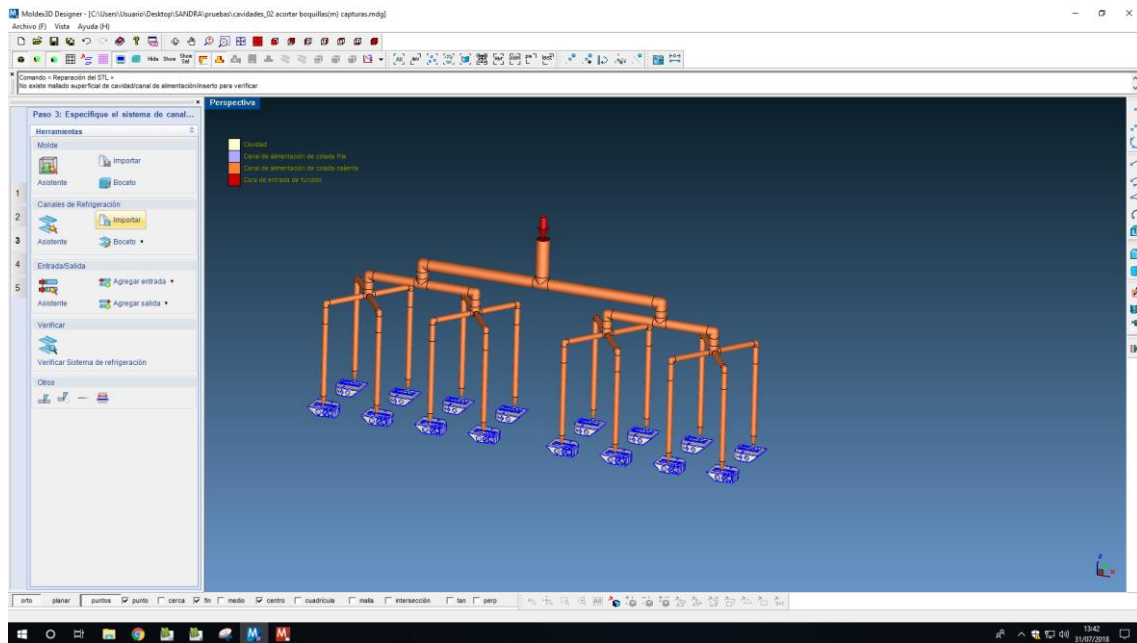


Fig. 5.103 En paso 3, “Importar”

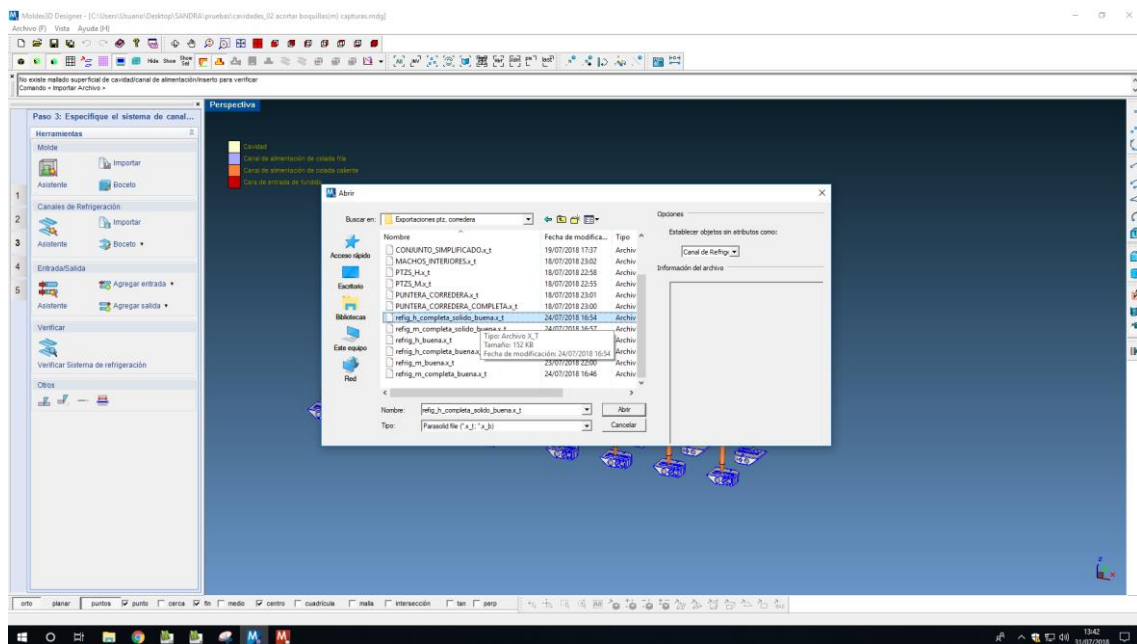


Fig. 5.104 En paso 3, “Importar” > selección de archivo

Puesto que el proceso de importar el sólido se ha realizado desde el paso 3 de canal de refrigeración, el programa Moldex3D Designer detecta automáticamente el cuerpo como canal de refrigeración. No obstante, si no fuese el caso, puede cambiarse el atributo haciendo clic derecho sobre el cuerpo, seleccionando “Editando los atributos del moldeo por inyección” y modificando el tipo de atributo del sólido.

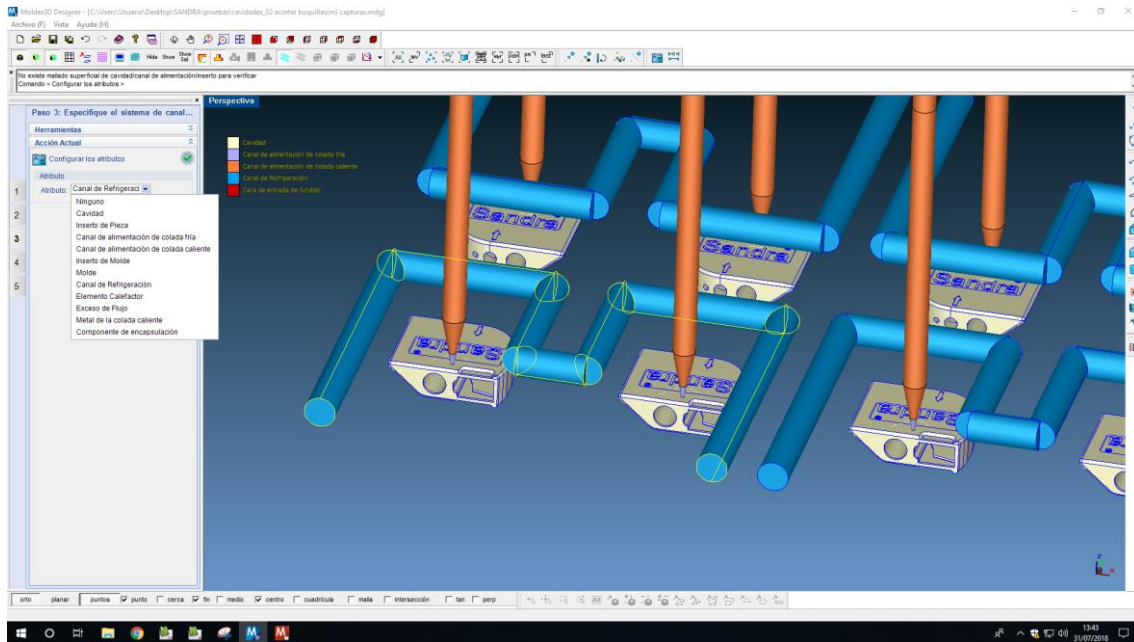


Fig. 5.105 Clic derecho sobre refrigeración > “Editando los atributos del moldeo por inyección” > atributo: canal de refrigeración

Se ha introducido el canal de refrigeración correspondiente a la parte móvil del molde, se repite el proceso para introducir la parte fija del mismo.

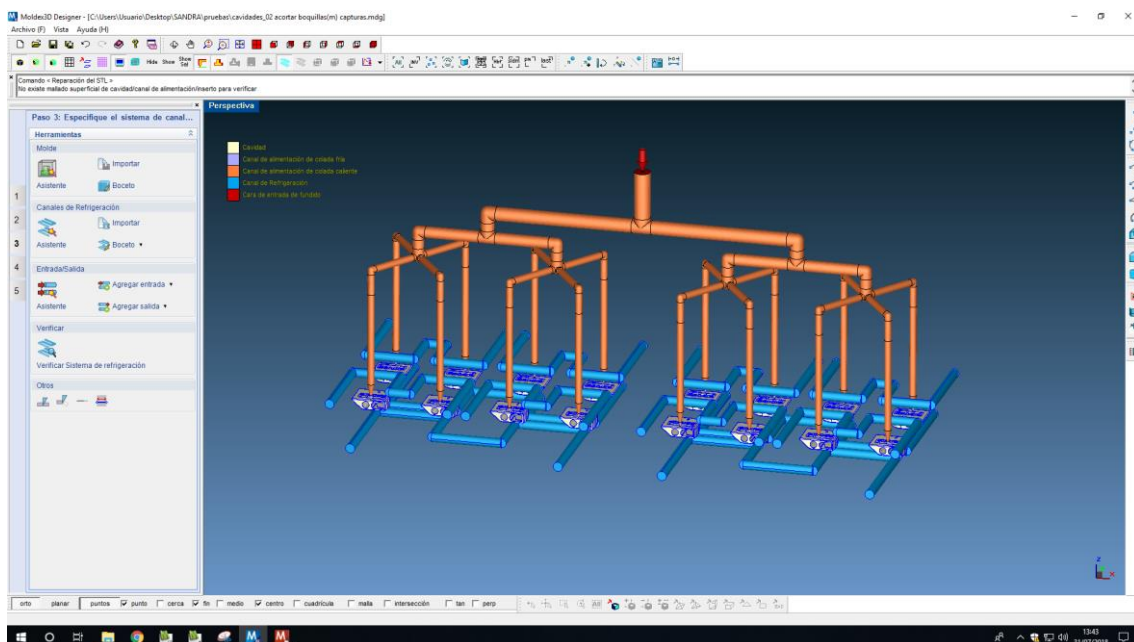


Fig. 5.106 Resultado de toda la refrigeración introducida

Una vez se tienen todos los canales de refrigeración diseñados, se debe indicar al programa los puntos por los que entrará y saldrá el fluido. Moldex3D Designer ofrece un asistente de entradas y salidas, el cual se recomienda ya que suele funcionar correctamente. No obstante, pueden introducirse manualmente con las opciones de “Agregar entrada” y “Agregar salida”. Es una tarea sencilla si se seleccionan los puntos de entrada y salida rastreando el centro del canal refrigeración.

En el caso ejemplo se introducen las entradas y salidas de fluido mediante el asistente para ello.

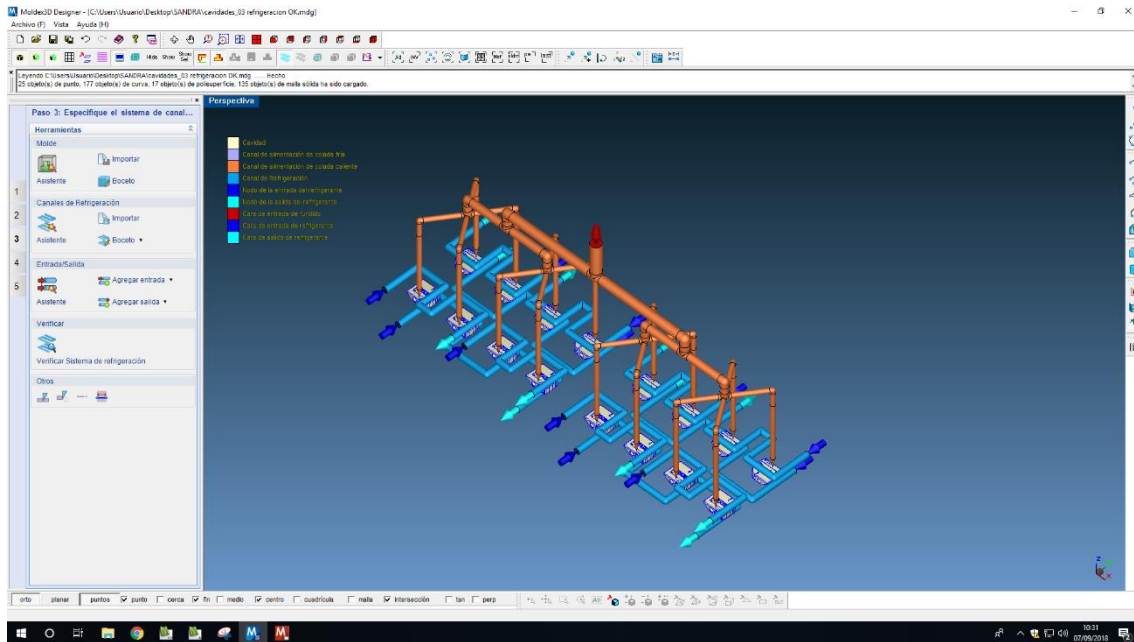


Fig. 5.107 Resultado de entradas y salidas de refrigeración asignadas

Una vez se tiene el diseño terminado, se realiza el mallado en el paso número 4. Para la versión V03 será necesario mallar el molde y los canales de refrigeración, puesto que el resto de elementos no han sido modificados y el programa detecta automáticamente que ya se tiene creada la malla. Cuando se haya terminado el proceso de mallar, corrigiendo las áreas de malla corrupta si se diera el caso, se finaliza con el paso 5. Se exporta la malla a archivo .MFE para poder introducirla y simularla en Moldex3D Project.

### V03 MOLDEX3D PROJECT

Se realiza la simulación de la versión V03 en Moldex3D Project. Para ello se crea una nueva ejecución como se ha visto en versiones anteriores, en la que se selecciona como malla el archivo V03.MFE. Las condiciones de proceso que deben introducirse son las mismas que en el resto de ejecuciones, puesto que en ellas ya se indicaban aspectos relacionados con la refrigeración para que el programa estimase un tiempo de enfriamiento. Cuando se hayan introducido todos los datos de la ejecución se inicia el análisis.

### V03 RESULTADOS

En la versión V03 se ha realizado una simulación con un componente que forma parte de una de las fases del ciclo de inyección y, al igual que sucedía con las fases de llenado y compactación, se obtienen resultados específicos para la fase de refrigeración. A continuación se tratará de exponer los parámetros más relevantes del módulo, completando la explicación con el análisis del proyecto modelo.

- REFRIGERACIÓN
  - Eficiencia de refrigeración

El resultado muestra la eficiencia de cada canal de refrigeración, y el porcentaje de calor extraído por el canal de enfriamiento.

El cálculo de la eficiencia de enfriamiento queda definido por la siguiente ecuación:

$$\text{eficiencia de refrigeración} = \frac{Q_c}{(Q_c + Q_m)} * 100\% \quad (8)$$

Donde:

$Q_c$  = calor total absorbido a través de la superficie del canal de refrigeración

$Q_m$  = calor total absorbido a través de la superficie del molde

El resultado muestra el porcentaje de calor que retira el canal de enfriamiento. El resultado es fácilmente interpretable: un valor positivo significa eficiencia de enfriamiento, mientras que un valor negativo representa eficiencia de calentamiento.

En el caso ejemplo los canales de refrigeración muestran un valor de eficiencia positivo, por lo que extraen calor de la cavidad.

Los conductos de la parte fija muestran un porcentaje de eficiencia de refrigeración de un 41.71%, mientras que los canales de la parte móvil muestran el 58.29% restante.

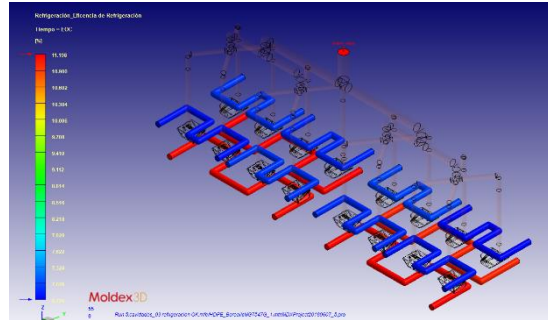


Fig. 5.108 Resultado refig. V03: eficiencia de refrigeración

- Temperatura central

La temperatura central que se da en la fase de refrigeración indica la temperatura del material de la capa media en la dirección del espesor de la pieza en esta fase. De su resultado puede observarse en qué medida está refrigerada la pieza.

Se analiza la temperatura central de la fase de refrigeración del caso ejemplo.

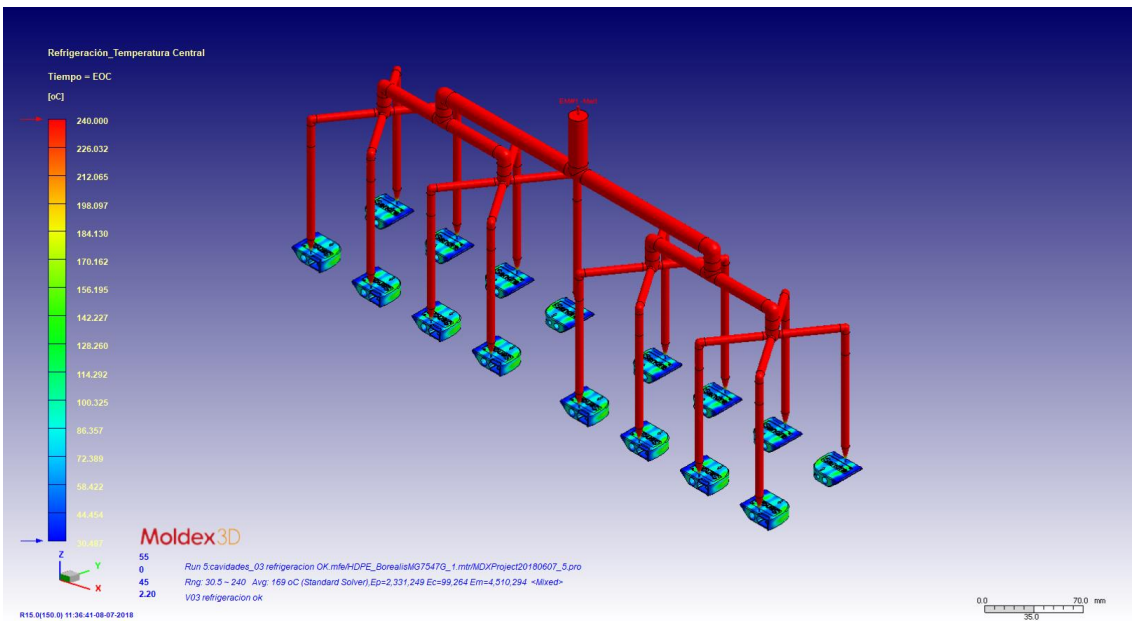


Fig. 5.109 Resultado refig. V03: temperatura central, vista general

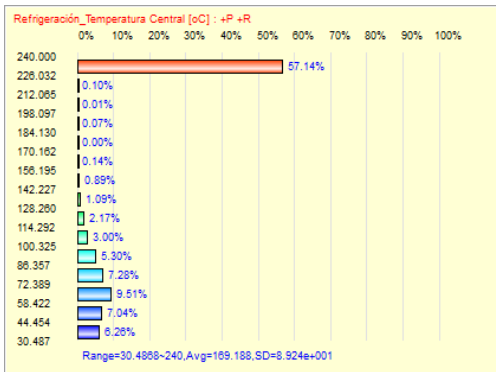


Fig. 5.110 Resultado refrig. V03: estadísticas temperatura central (izquierda)

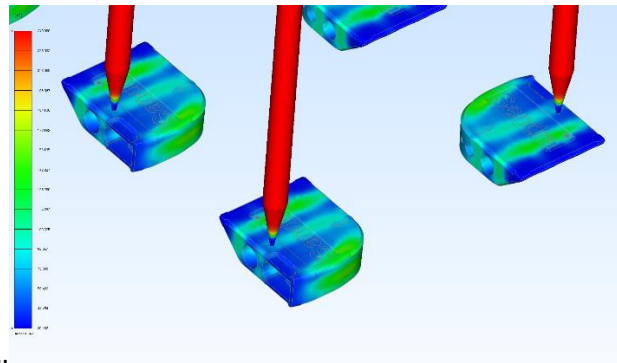


Fig. 5.111 Resultado refrig. V03: temperatura central, vista cavidad (derecha)

Dejando de lado el conducto de cámara caliente, un 94.63% del volumen total de la pieza está por debajo de los 120°C, y la media de temperatura de la pieza son 66°C. Teniendo en cuenta que la temperatura de expulsión son 87°C, el sistema de refrigeración funciona correctamente.

- Diferencia de temperatura del molde

El resultado muestra la diferencia de temperatura entre las partes superior e inferior de la cavidad. Una gran diferencia de temperaturas dará lugar a una tensión de cizalladura residual desequilibrada, produciendo una deformación en la pieza. Se recomienda optimizar el diseño de la refrigeración con el objetivo de reducir lo máximo posible la diferencia de temperatura del molde.

Si se analiza el caso ejemplo, se aprecia que la diferencia de temperatura del molde oscila entre los 40°C y los 5°C. Teniendo en cuenta que la temperatura máxima que llega a alcanzar la cavidad supera los 200°C, y que se considera una temperatura ambiente de 25°C, la diferencia de temperatura es correcta.

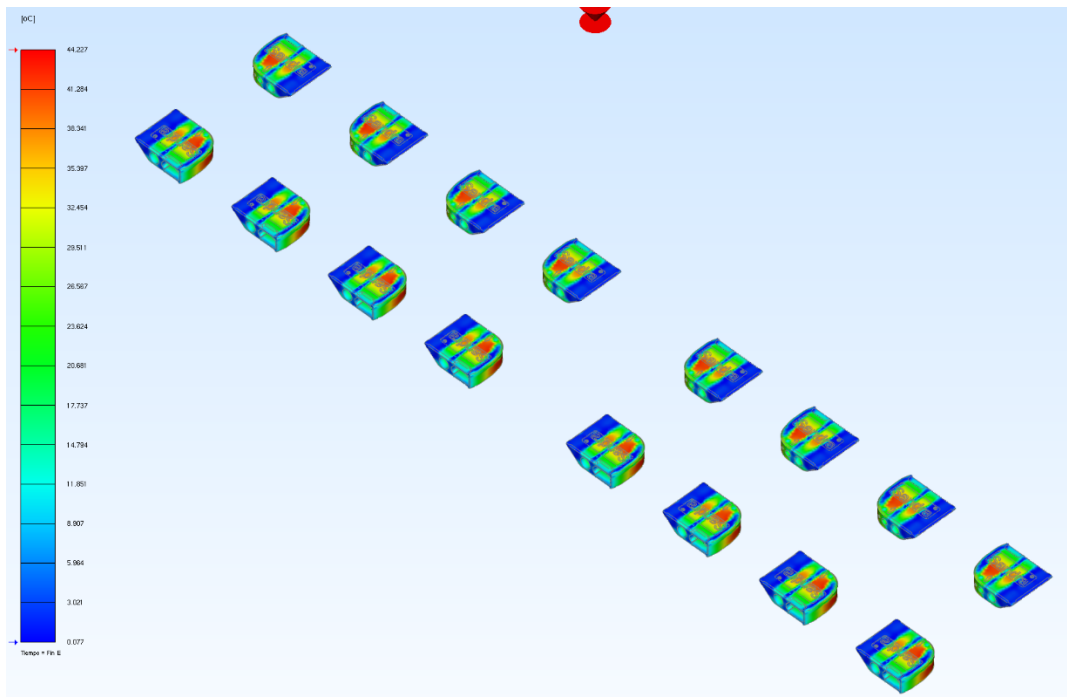


Fig. 5.112 Resultado refrig. V03: diferencia de temperatura del molde

- Tiempo de enfriamiento máximo

Se trata del tiempo máximo de enfriamiento en la dirección del espesor de la pieza. Se estima desde el final de la fase de compactación hasta el momento en el que la temperatura de la pieza se ha enfriado alcanzando el valor de la temperatura de expulsión.

El tiempo de enfriamiento máximo se calcula de forma similar a la temperatura central:

Se traza una línea de partición a lo largo del espesor de la pieza. Se toman nodos, representados en azul, cercanos a la línea dibujada. Tener en cuenta que también se toman nodos en la dirección normal a la vista del esquema. Mediante una interpolación de los nodos, se calcula el tiempo de enfriamiento máximo.

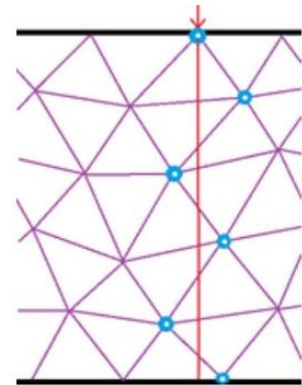


Fig. 5.113 Esquema cálculo tiempo de enfriamiento máximo

Se analizan a continuación los resultados obtenidos para el caso ejemplo.

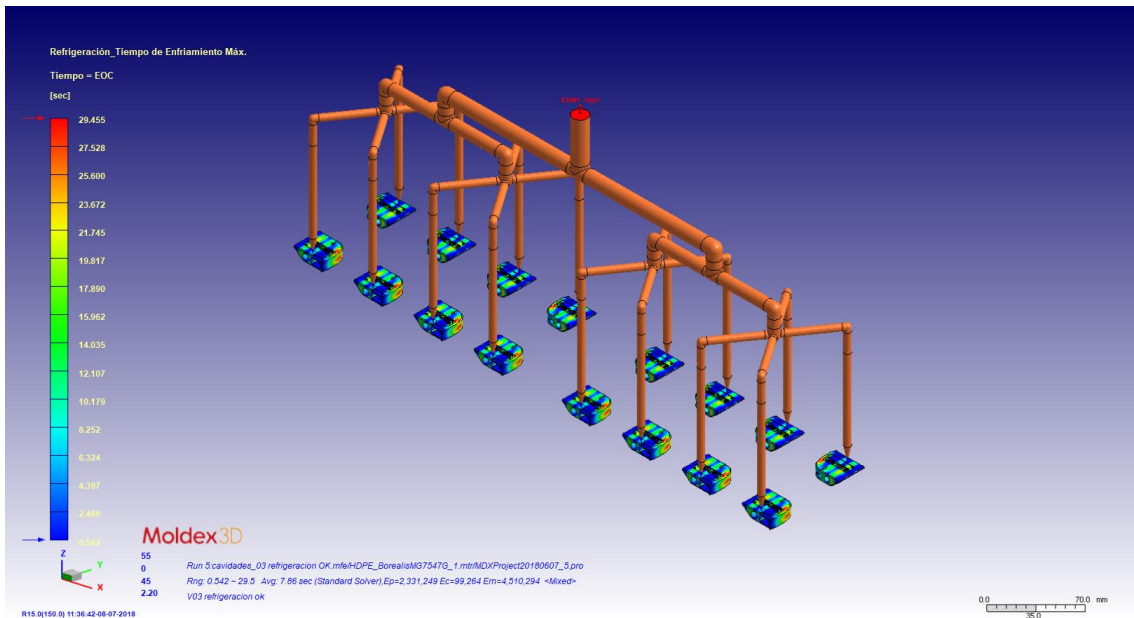


Fig. 5.114 Resultado refrig. V03: tiempo de enfriamiento máximo, vista general

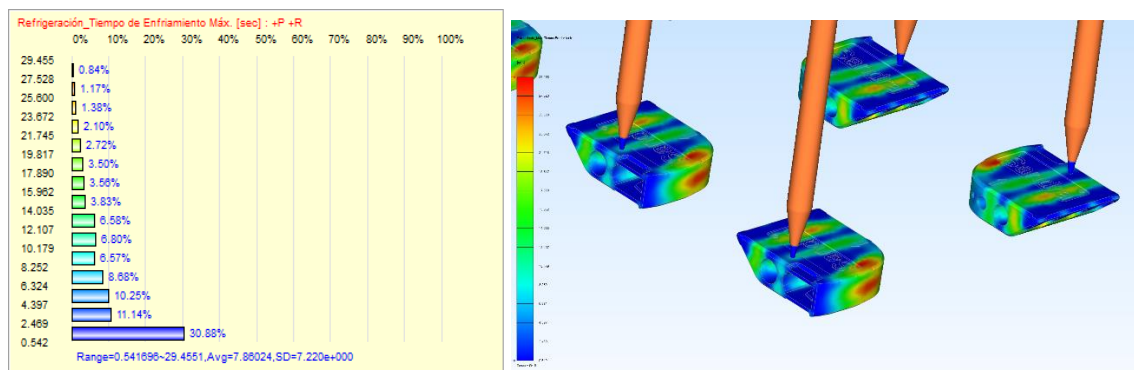


Fig. 5.115 Resultado refrig. V03: estadísticas tiempo de enfriamiento máximo (izquierda)

Fig. 5.116 Resultado refrig. V03: tiempo de enfriamiento máximo, vista cavidad (derecha)

A simple vista, puede apreciarse en la representación que la mayor parte de la pieza se enfría de forma rápida. Si consultamos las estadísticas, el 84.73% del volumen de la pieza alcanza la temperatura de expulsión antes de los 15 segundos. Se considera un valor aceptable.



## 6. CONCLUSIONES Y ACTUACIONES FUTURAS

Se ha detectado una carencia en una empresa del sector del diseño y fabricación de moldes: no se emplean las nuevas tecnologías para ayudar al diseño de estos. Con este proyecto se ha ayudado a resolver el déficit gracias a la introducción de un programa CAE, Moldex3D. Se han realizado explicaciones exhaustivas sobre cómo utilizar esta plataforma y cómo interpretar sus resultados; además de proporcionar un guion orientativo acompañado de un caso práctico.

Pese a ser algo novedoso y necesitar práctica, se ha aplicado de forma exitosa a un trabajo actual de la empresa, coordinando de manera eficiente su modo clásico de trabajar con el propuesto en el proyecto. Se ha obtenido un resultado satisfactorio tanto por parte de esta, como por parte del cliente.

Si se habla del caso práctico en concreto, tras aplicar las sucesivas modificaciones en cada una de las versiones creadas, se han conseguido grandes mejoras en parámetros fundamentales como son la presión o la fuerza de cierre. En la versión V01 – Inicial se tenía una presión total de 27.14 MPa con una caída de presión en el sistema de colada caliente de 20.28 MPa; mientras que en la versión V02.2 – Variación sección se ha conseguido una presión total de 16.74 MPa, con una caída en la cámara caliente de tan solo 4.89 MPa. Es decir, se ha conseguido reducir la pérdida de carga en 15.39 MPa, lo que representa una disminución del 75.89%. En cuanto a la fuerza de cierre, inicialmente se requerían 26.22 Ton, mientras que en la versión final V02.2 se alcanza el valor de fuerza requerida de 16.08 Ton. Esto representa una reducción del 38.67%, 10.14 Ton. Por otro lado, en la versión V03 – Refrigeración del caso práctico se han obtenido resultados que indican que en la fase de refrigeración el 94.63% del volumen total de la pieza está por debajo de los 120°C, y que la temperatura media de la pieza es de 66°C. Teniendo en cuenta que la temperatura de expulsión es de 87°C, se ha diseñado un sistema de refrigeración que funciona correctamente.

Puesto que se tiene como limitación el tiempo, para finalizar este proyecto queda pendiente hacer un estudio estadístico que compare los resultados de la empresa antes y después de la aplicación del estudio, hablando en términos de ganancias, tiempo y calidad de resultados. Este será realizado una vez se haya aplicado en múltiples casos con el fin de tener una muestra representativa.

Como sugerencia, en líneas futuras se podría especializar el estudio según se trate de piezas de tamaño pequeño o grande, con o sin sistema de colada caliente, o moldes de una sola cavidad o multicavidad. Ofreciendo de este modo más concreción en el estudio y más exactitud en los resultados.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- AUTODESK. *Autodesk knowledge network*.  
<<https://knowledge.autodesk.com/es/support/moldflow-adviser/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ESP/MoldflowAdviser-Setup/files/GUID-66A1762F-CC20-486D-8EAA-3001A7FFD39C-htm.html>> [Consulta: agosto 2018]
- AUTODESK. *Autodesk products Moldflow*.  
<<https://www.autodesk.com/products/moldflow/subscribe>> [Consulta: Agosto 2018]
- GÓMEZ SELLÉS, E. et al. (2017) *Apuntes de mecánica de fluidos*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- MOLDES 2010 S.L. *Página web corporativa de Moldes 2010 S.L.*  
<<http://moldes2010.com/>> [Consulta: agosto 2018]
- MOLDEX3D HELP. *Moldex3D Support*.  
<<http://support.moldex3d.com/r15/en/index.html>> [Consulta: agosto 2018]
- SOTELO, G (1999) *Hidráulica General*. México D.F.: Limusa.
- UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. *Departamento de Ingeniería Mecánica*.  
<[http://wikifab.dimf.etsii.upm.es/wikifab/images/b/b2/Ficha\\_colada\\_caliente.pdf](http://wikifab.dimf.etsii.upm.es/wikifab/images/b/b2/Ficha_colada_caliente.pdf)> [Consulta: agosto 2018]
- UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA, CAMPUS D'ALCOI. *Máster en Diseño de Piezas y Moldes para Inyección de Plástico*.  
<<http://www.dismold.upv.es/2017/07/14/visita-ponencia-la-empresa-fustel-fabricante-portamoldes/>> [Consulta: agosto 2018]



DESARROLLO E IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA OPTIMIZACIÓN  
DEL DISEÑO DE MOLDES DE INYECCIÓN EN LA INDUSTRIA DEL PLÁSTICO  
BASADO EN PROGRAMAS DE AYUDA A LA INGENIERÍA.

---

## ***PLIEGO DE CONDICIONES***

---

## 1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Para la aplicación de este proyecto teórico se deberán seguir las especificaciones y recomendaciones técnicas recogidas tanto en la memoria del proyecto como en el propio pliego de condiciones.

El objeto del presente pliego de condiciones es definir las especificaciones técnicas necesarias para llevar a cabo de forma correcta este proyecto. Queda fuera del alcance del pliego determinar condiciones facultativas, económicas y legales por no tratarse de un proyecto de desarrollo de una ejecución donde intervienen parte contratante y parte contratista.

## 2. CONDICIONES TÉCNICAS

Se detallan las características técnicas requeridas por los equipos para el adecuado desarrollo del proyecto.

Debido a la índole del trabajo, se recogen especificaciones técnicas de los equipos informáticos necesarias para llevar a cabo el proyecto, el cual gira alrededor de Moldex3D.

### 2.1. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA

Según Moldex3D Help (s.f.), el programa Moldex3D R15.0 puede trabajar tanto con la plataforma Windows / x86-64, como con Linux / x86-64. No obstante, se debe matizar que la plataforma de Linux únicamente puede emplearse para recursos de cálculo.

Los sistemas operativos de Windows capaces de soportar Moldex3D son:

- Windows 10 family
- Windows 8 family
- Windows 7 family
- Windows Server 2008 R2
- Windows HPC Server 2008 R2
- Windows Server 2012

Como observación, Moldex3D R15.0 está certificado para Windows 10.

Los sistemas operativos de Linux capaces de soportar Moldex3D son:

- CentOS 6 family
- CentOS 7 family
- RHEL 6 family
- RHEL u7 family
- SUSE Linux Enterprise Server 11 SP2

### 2.2. ESPECIFICACIONES DE HARDWARE

Para manejar programas de esta índole se requiere de unas condiciones mínimas en los componentes físicos de los equipos informáticos. Además de determinar estos requisitos mínimos, se establecerán los recomendados.

Requisitos mínimos de hardware:

- CPU: procesador Inter®Core i7
- RAM: 16 GB de RAM
- HDD: 1 TB de espacio libre

Requisitos de hardware óptimos:

- CPU: procesador Inter®Xenon®E5
- RAM: 32 GB de RAM
- HDD: 2 TB de espacio libre



DESARROLLO E IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA OPTIMIZACIÓN  
DEL DISEÑO DE MOLDES DE INYECCIÓN EN LA INDUSTRIA DEL PLÁSTICO  
BASADO EN PROGRAMAS DE AYUDA A LA INGENIERÍA.

---

# *PRESUPUESTO*

---







DESARROLLO E IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA OPTIMIZACIÓN  
DEL DISEÑO DE MOLDES DE INYECCIÓN EN LA INDUSTRIA DEL PLÁSTICO  
BASADO EN PROGRAMAS DE AYUDA A LA INGENIERÍA.

---

# ***ANEJO 1: VOCABULARIO TÉCNICO***

---

Se presenta un glosario de palabras técnicas empleadas a lo largo del cuerpo del proyecto. En él se recogen alfabéticamente conceptos considerados como específicos del campo de trabajo, no expuestos de manera extendida en la memoria del mismo.

<b><i>Computer Aided Design (CAD):</i></b>	Se traduce como Diseño Asistido por Ordenador, y se trata de una plataforma que facilita el proceso de diseño a los ingenieros y diseñadores en aspectos como la creación, modificación y optimización de un diseño. El campo de estas herramientas puede dividirse de forma básica en dos grandes sectores: programas de dibujo en 2D y de modelado en 3D. Mientras que con dibujos 2D el trabajo se limita a geometría plana como puntos, líneas, arcos y polígonos; los dibujos 3D introducen elementos con volumen.
<b><i>Computer Aided Engineering (CAE)</i></b>	Traducido como Ingeniería Asistida por Ordenador, envuelve todos aquellos programas que ayudan en las tareas de análisis en el campo de la ingeniería. El término incluye simulación, validación y optimización de productos
<b><i>Computer Aided Manufacturing (CAM)</i></b>	La Fabricación Asistida por Ordenador es el uso de una plataforma informática con el fin de manejar y controlar la maquinaria involucrada en el proceso de fabricación. Su principal propósito es conseguir un proceso de producción más rápido, eficiente, y preciso.
<b><i>Cavidad</i></b>	Parte hueca del molde donde se inyecta el material y se obtiene la pieza deseada. Las superficies de la cavidad forman el negativo de las superficies de la pieza a obtener. Un molde puede contar con una o varias cavidades (multicavidad).
<b><i>Lado fijo</i></b>	Lado de inyección o también conocido como lado macho, es la parte del molde sujeta al plato de la máquina fijo, y donde apoya el cilindro de inyección del material.
<b><i>Lado móvil</i></b>	Lado de expulsión o lado hembra, es la parte del molde sujeta al plato móvil de la máquina. Este lado del molde se mueve de forma solidaria con la máquina de inyección. Generalmente, en este lado también está ubicado el sistema de expulsión de la pieza.
<b><i>Molde de inyección</i></b>	Pieza, o conjunto de piezas ensambladas, con parte interior hueca. Al introducir un material dentro de la cavidad, se obtendrá una nueva pieza con la forma del hueco. Por lo general, los moldes de plástico están formados por varias placas fabricadas con acero.

<b><i>Portamolde</i></b>	Elementos fabricados con unas normas estandarizadas que forman el bloque de acero del molde que se va a fabricar. La utilización del portamolde permite reducir los tiempos y costes de fabricación (Universidad Politécnica de Valencia (2017)).
<b><i>Postizo</i></b>	Parte del molde, que por necesidad se fabrica de forma independiente y se posiciona como un inserto donde corresponda. Esta técnica se suele emplear en las partes frágiles del molde, de modo que es sencillo sustituirlas.
<b><i>Punto de inyección</i></b>	Abertura pequeña en la superficie de la cavidad que comunica el canal de alimentación o de colada con la propia cavidad. Es el punto por el que se introduce el material dentro de la cavidad en los moldes de inyección.
<b><i>Sobredimensionar</i></b>	Situación en la que se dedican más recursos de los necesarios a la hora de diseñar.
<b><i>Sistema colada caliente</i></b>	Conjunto de canales conectados entre sí por los que se conduce el material hasta la cavidad en estado fundido. De este modo se evita la solidificación del material, y este puede aprovecharse para ser inyectado en la cavidad en el siguiente ciclo. Esto reduce de manera notable la cantidad de material empleado (Universidad Politécnica de Madrid (s.f.)).