



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid
Tel.: 91 336 3060
info.industriales@upm.es

www.industriales.upm.es



Alejandro Sánchez Hurtado

05 TRABAJO FIN DE GRADO

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN DE POLÍMEROS A TRAVÉS DE LA ELIMINACIÓN DE DEFECTOS EN PIEZAS DE PLÁSTICO

NOVIEMBRE 2024

Alejandro Sánchez Hurtado

DIRECTORA DEL TRABAJO FIN DE GRADO:
Andrea Fernández Gorgojo



POLITÉCNICA

Dedicado a Patrukas.

“El ingeniero ha sido, y es, un creador de historia”

-James Kip Finch.

AGRADECIMIENTOS:

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutora Andrea por todo el apoyo que me ha proporcionado durante el desarrollo de mi Trabajo de Fin Grado. Su ayuda ha sido fundamental para poder llevar a cabo el proyecto con éxito, pero también para poder aprender muchísimo y disfrutar durante la realización del mismo. Ha sido una tutora excepcional y siempre he sentido que podía contar con su respaldo.

Asimismo, quiero expresar mi agradecimiento a todos los integrantes del Departamento de Fabricación. Su asistencia ha sido fundamental para aprender a trabajar con toda la maquinaria del laboratorio y siempre han estado dispuestos a resolver mis dudas y a ayudarme cuando se presentaban nuevos problemas.

Por otro lado, quiero dar a las gracias a todos los profesores que he tenido durante mis años estudiando en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, todos ellos han contribuido enormemente a mi formación como ingeniero y como persona.

Me gustaría agradecer especialmente a mi familia por su amor incondicional y por hacerme saber que puedo contar con ellos para lo que sea. Quiero dar las gracias a mis padres Juan Antonio y Yolanda y a mi hermana Laura por todo su apoyo y su cariño. No me puedo olvidar de mis abuelas Felisa y Mari, de mis abuelos Juan e Ignacio, así como de mis tíos Montaña, David y María y de mis primos Nacho y Eva. Gracias a todos ellos por convertirme en la persona que soy a día de hoy.

A su vez, deseo expresar mi gratitud a una parte fundamental de mi vida: mis amigos. Sin duda, haberles conocido es una de las mejores cosas que me llevo de mi paso por la universidad. Por ello, quiero mostrar mi agradecimiento a Tomás, Arturo, Laura, Felipe, Dani, Juan, Miguel, Gonzalo, Luis, Lechuga y Marco. Han sido años repletos de buenos recuerdos y en los que he disfrutado muchísimo con ellos.

Por último, pero no menos importante, quiero dar las gracias a mis amigas de Torrejoncillo. Con ellas he pasado momentos inolvidables y son muy especiales para mí. Por ello, me gustaría agradecer a Ana, Sofía, Elena, Celia, María, Natalia y Lorena por estos años a su lado.

RESUMEN EJECUTIVO:

El moldeo por inyección es uno de los métodos de fabricación más importantes en la industria de los polímeros. Este se basa en calentar el material hasta conseguir que se encuentre en un estado fluido para posteriormente, con unas condiciones de presión y temperatura elevadas, realizar una rápida inyección de dicho material en un molde. Tras un tiempo de enfriamiento, el material se solidifica con la forma deseada y se procede a la apertura del molde y la expulsión de la pieza.

Este tipo de fabricación es el más utilizado en la producción a gran escala de piezas de plástico, debido a su elevada velocidad y su elevado grado de automatización. Sin embargo, uno de los principales problemas que presenta es la infinidad de defectos de fabricación que pueden aparecer y que dependen de multitud de variables del proceso.

Por tanto, el objetivo fundamental de este trabajo es estudiar la influencia de distintas variables del proceso en la aparición de dichos defectos de fabricación, para lograr definir unas condiciones óptimas de fabricación en las que estos defectos se minimicen.

La primera decisión a tomar fue la elección del material y de la geometría. Se ha escogido como materia prima el polipropileno, un polímero termoplástico altamente empleado en la industria de la inyección por su excelente relación propiedades/coste. Como geometría se ha escogido una biela con un cajeadado en su base, con el objetivo de que la pieza tenga distintos espesores y que cuente con zonas que favorezcan la aparición de defectos, como cilindros, agujeros o el propio cajeadado.

Los parámetros de inyección escogidos para estudiar su influencia en los defectos son la temperatura de inyección, la presión de inyección, la presión de mantenimiento y el tiempo de mantenimiento. Por otra parte, los defectos a estudiar son los más relevantes en el proceso de inyección: las burbujas de aire retenido, las rebabas, los rechupes, el llenado incompleto del molde, la contracción de la pieza y el alabeo de la misma.

Se realizaron un alto número de ensayos, variando cada uno de los parámetros mencionados anteriormente. Sobre cada una de esas piezas se efectuaron mediciones con diversos instrumentos de medida, como son un software de procesamiento de imágenes para cuantificar las burbujas y las rebabas, una máquina de coordenadas para medir la contracción de los cilindros, un micrómetro para medir la contracción del ancho o un sensor láser para medir el alabeo de la pieza.

Tras el análisis de todos los datos obtenidos, se concluyó que la temperatura y la presión de inyección tienen una alta influencia en la aparición de los defectos, mientras que la presión y el tiempo de mantenimiento no son tan determinantes. Altas temperaturas de inyección provocan un aumento en las rebabas de las piezas fabricadas, mientras que bajas temperaturas producen piezas con un alabeo mayor y con más burbujas de aire retenido. En lo relativo a la presión de inyección, se ha detectado que cuando esta es excesivamente alta se incrementan considerablemente las rebabas y las burbujas de aire retenido en las piezas, sin embargo, presiones demasiado bajas contribuyen a que las piezas experimenten un mayor alabeo y una mayor contracción.

En resumen, este trabajo busca proporcionar información sobre las mejores condiciones para realizar el proceso de inyección de polímeros, concretamente de polipropileno, para la minimización de los defectos que aparecen en las piezas, tratando así de reducir el número de iteraciones a realizar en la industria, ahorrando tiempos y costes.

PALABRAS CLAVE:

Inyección, polímeros, defectos, polipropileno y optimización.

CÓDIGOS UNESCO:

- [3312.10] – Plásticos.
- [2301.15] – Análisis de Polímeros.
- [3312.08] – Propiedades de los Materiales.
- [3310.03] – Procesos Industriales.
- [3313.12] – Equipo y Maquinaria Industrial.
- [3311.08] – Equipo de Laboratorio.

ÍNDICE:

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN EJECUTIVO	II
PALABRAS CLAVE.....	III
CÓDIGOS UNESCO	III
ÍNDICE	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ACRÓNIMOS.....	XII
1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA	1
1.1. MOLDEO POR INYECCIÓN	2
1.1.1. Máquina de inyección	2
1.1.2. Molde	6
1.1.3. Ciclo de inyección.....	8
1.1.4. Parámetros del proceso de inyección	12
1.2. POLÍMEROS	17
1.2.1. Procesos de fabricación con materiales poliméricos.....	19
1.2.2. Proceso de inyección de polímeros	20
1.2.3. Polipropileno	23
1.3. DEFECTOS EN PIEZAS FABRICADAS POR INYECCIÓN	24
1.3.1. Falta de llenado	25
1.3.2. Rebabas	26
1.3.3. Rechupes	27
1.3.4. Burbujas de aire retenido.....	28
1.3.5. Contracción	29
1.3.6. Alabeo	30
1.3.7. Líneas de soldadura.....	31
2. ANTECEDENTES.....	32
3. OBJETIVOS	35
3.1. FINALIDAD DEL PROYECTO	35
3.2. ALCANCE DEL PROYECTO	36
4. METODOLOGÍA	37
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL EMPLEADO	37
4.1.1. Ensayo de calorimetría diferencial de barrido.....	37
4.1.2. Ensayo de termogravimetría.....	39
4.1.3. Ensayo de fluidez	39
4.2. INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA A FABRICAR.....	40

4.3. PROCESO DE INYECCIÓN.....	42
4.3.1. Inyectora <i>Mateu & Solé Meteor 165/55H 30 Φ</i>	43
4.3.2. Análisis térmico del molde y de la pieza.....	44
4.3.3. Parámetros de la máquina de inyección	45
4.3.4. Desarrollo de los ensayos	46
4.3.5. Simulación del proceso de inyección con el software <i>MoldFlow</i>	47
4.4. MEDICIÓN DE DEFECTOS EN LAS PIEZAS FABRICADAS	48
4.4.1. Inspección visual	48
4.4.2. Software <i>ImageJ</i>	49
4.4.3. Micrómetro.....	53
4.4.4. Máquina de coordenadas <i>Mitutoyo CRYSTA - Plus M544</i>	55
4.4.5. Sensor láser	59
5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	63
5.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL EMPLEADO	63
5.1.1. Ensayo de calorimetría diferencial de barrido.....	63
5.1.2. Ensayo de termogravimetría.....	65
5.1.3. Ensayo de fluidez	66
5.2. PARÁMETROS DEL PROCESO DE INYECCIÓN	67
5.2.1. Parámetros a fijar	67
5.2.2. Parámetros de estudio.....	70
5.2.3. Matriz de ensayos.....	71
5.3. ANÁLISIS TÉRMICO DEL MOLDE Y DE LA PIEZA	74
5.4. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE LA PIEZA EN LA APARICIÓN DE DEFECTOS.....	76
5.5. ANÁLISIS DE DEFECTOS EN LAS PIEZAS FABRICADAS.....	78
5.5.1. Falta de llenado	78
5.5.2. Burbujas de aire retenido.....	79
5.5.3. Rebabas	84
5.5.4. Contracción del ancho de la pieza.....	86
5.5.5. Contracción de los cilindros de la pieza.....	89
5.5.6. Desviación angular de los ejes	91
5.5.7. Alabeo	96
5.6. SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE <i>MOLDFLOW</i>	99
6. CONCLUSIONES	103
7. LÍNEAS FUTURAS	106
8. EVALUACIÓN DE IMPACTOS SOCIAL, ECONÓMICO Y MEDIOAMBIENTAL	107
8.1. IMPACTO SOCIAL	107
8.2. IMPACTO ECONÓMICO.....	107

8.3. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	108
9. CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	109
10. MARCO NORMATIVO Y ESTÁNDARES TÉCNICOS	110
11. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO	111
12. REFERENCIAS	113
13. ANEXOS.....	116
ANEXO 1.....	116
ANEXO 2.....	117
ANEXO 3.....	118
ANEXO 4.....	119
ANEXO 5.....	120
ANEXO 6.....	121
ANEXO 7.....	122
ANEXO 8.....	123
ANEXO 9.....	124
ANEXO 10.....	125
ANEXO 11.....	126
ANEXO 12.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1.1.1- 1 Unidades de una máquina de inyección [5].....	2
Figura 1.1.1- 2 Elementos de la unidad de inyección [6].....	3
Figura 1.1.1- 3 Zonas del husillo en un máquina de inyección [7]	4
Figura 1.1.2- 1 Comparación entre un molde multicavidad (izquierda) y un molde con una única cavidad (derecha) [10].....	6
Figura 1.1.2- 2 Componentes de un molde para procesos de inyección [13].....	7
Figura 1.1.3- 1 Esquema del ciclo de inyección.....	8
Figura 1.1.3- 2 Representación del desplazamiento de la unidad de inyección hacia el molde [9]	9
Figura 1.1.3- 3 Representación de la inyección del material en el molde [9]	10
Figura 1.1.3- 4 Representación de la etapa de mantenimiento en el proceso de inyección [9]...	10
Figura 1.1.3- 5 Evolución temporal de la presión ejercida por el husillo tras la inyección del material [14]	11
Figura 1.1.3- 6 Esquema de la etapa de dosificación en el proceso de inyección [9]	11
Figura 1.1.3- 7 Desmoldeo de la pieza en el proceso de inyección [9]	12
Figura 1.1.4- 1 Pieza con llenado incompleto debido a baja temperatura del polímero [16].....	13
Figura 1.1.4- 2 Representación esquemática del cojín de inyección [19]	15
Figura 1.1.4- 3 Esquema de la aplicación de contrapresión en el proceso de inyección [20]	15
Figura 1.2- 1 Posibles estructuras de las cadenas poliméricas [21]	17
Figura 1.2- 2 Estructuras internas de polímeros termoplásticos [22].....	18
Figura 1.2.2- 1 Esquema de la variación del estado del PVC con la temperatura.....	20
Figura 1.2.2.1- 1 Variación de la viscosidad de distintos polímeros con la temperatura [25]	22
Figura 1.2.3- 1 Reacción de polimerización del polipropileno [27].....	24
Figura 1.3.1- 1 Piezas inyectadas que presentan un defecto de falta de llenado [30]	25
Figura 1.3.2- 1 Rebabas en una pieza fabricada mediante inyección [31]	26
Figura 1.3.3- 1 Pieza inyectada con rechupes en una de sus superficies [33]	27
Figura 1.3.4- 1 Pieza fabricada por inyección con burbujas de aire retenido [34]	28
Figura 1.3.6- 1 Pieza inyectada que se ha alabeado durante su enfriamiento [35].....	30
Figura 1.3.7- 1 Línea de soldadura en una pieza fabricada por inyección [35]	31
Figura 3.1- 1 Geometría a fabricar en el proyecto	35
Figura 3.2- 1 Laboratorio de Fabricación de la ETSII-UPM	36
Figura 4.1.1- 1 Calorímetro diferencial de barrido <i>DSC Q200</i> de la compañía <i>TA Instruments</i> [37]	38
Figura 4.1.2- 1 Analizador termogravimétrico <i>TGA Q50</i> de la compañía <i>TA Instruments</i>	39
Figura 4.1.2- 1 Analizador termogravimétrico <i>TGA Q50</i> de la compañía <i>TA Instruments</i>	39
Figura 4.1.3- 1 <i>KINSGEO ® tester</i> , equipo empleado para la obtención del MFI.....	40
Figura 4.2- 1 Geometría a fabricar durante el proyecto	40
Figura 4.2- 2 Diseño de la biela sin cajeado en su base	41
Figura 4.2- 3 Placa fija del molde empleado en el proyecto	41
Figura 4.2- 4 Diseño de la pieza y los canales de alimentación empleados	42
Figura 4.3.1- 1 Máquina de inyección <i>Meteor 165/55H 30 Φ</i> de la compañía <i>Mateu & Solé</i>	43
Figura 4.3.2.1- 1 Cámara termográfica <i>E40</i> de la marca <i>FLIR</i>	44
Figura 4.3.2.1- 2 Imágenes tomadas por la cámara termográfica sobre el molde (izquierda) y sobre una pieza (derecha)	45
Figura 4.3.3- 1 Consola de la máquina de inyección	45
Figura 4.3.4- 1 Registro de las piezas fabricadas (izquierda) y numeración para identificarlas (derecha).....	46
Figura 4.3.4- 2 Burbujas que aparecen en las piezas fabricadas debido a una pequeña imperfección en el molde	47
Figura 4.4.1- 1 Piezas fabricadas que presentan un llenado incompleto de la cavidad del molde	49
Figura 4.4.1- 2 Biela fabricada que presenta falta de llenado en su base.....	49
Figura 4.4.2- 1 Fotografía tomada para su análisis con el software <i>ImageJ</i>	50

Figura 4.4.2- 2 Burbujas de aire retenido en una de las piezas fabricadas.....	50
Figura 4.4.2- 3 Burbuja de gran tamaño en una de las piezas fabricadas causada por el defecto en el molde.....	51
Figura 4.4.2- 4 Establecimiento de la escala de la imagen en <i>ImageJ</i>	51
Figura 4.4.2- 5 Imágenes procesadas con el software <i>ImageJ</i> con el objetivo de aislar los píxeles con burbujas.....	52
Figura 4.4.2- 6 Resultados proporcionados por <i>ImageJ</i> en la medición de las burbujas de una pieza.....	52
Figura 4.4.2- 7 Pieza fabricada que presenta muchas rebabas.....	52
Figura 4.4.2- 8 Imágenes procesadas con el software <i>ImageJ</i> para analizar el área de rebabas en una pieza.....	53
Figura 4.4.2- 9 Área de rebabas que se quiere medir (izquierda) y resultados proporcionados por <i>ImageJ</i> (derecha).....	53
Figura 4.4.3- 1 Micrómetro empleado en el proyecto junto con su elemento de soporte.....	54
Figura 4.4.3- 2 Marcas sobre las piezas en las secciones a medir con micrómetro.....	54
Figura 4.4.4- 1 Máquina de coordenadas <i>CRYSTA - Plus M544</i> de la compañía <i>Mitutoyo</i>	55
Figura 4.4.4- 2 Cabezal que contiene el palpador de la máquina de coordenadas (izquierda) y ampliación sobre dicho palpador (derecha).....	56
Figura 4.4.4- 3 Medición del diámetro interior del cilindro de las piezas con la máquina de coordenadas.....	57
Figura 4.4.4- 4 Rechupes en los cilindros de las piezas fabricadas.....	58
Figura 4.4.4- 5 Piezas con alabeo cóncavo (izquierda) y convexo (derecha).....	58
Figura 4.4.4- 6 Fijación de piezas cóncava (izquierda) y convexa (derecha) para su medición con la máquina de coordenadas.....	59
Figura 4.4.5- 1 Montaje del sensor láser sobre la fresadora.....	60
Figura 4.4.5- 2 Piezas fabricadas que presentan alabeo en su base, convexo (arriba) y cóncavo (abajo).....	60
Figura 4.4.5- 3 Pieza acondicionada para ser medida con el sensor láser.....	61
Figura 4.4.5- 4 Medición del alabeo de una de las piezas con el sensor láser.....	61
Figura 4.4.5- 5 Software <i>LabView</i> durante la medición del alabeo de una pieza.....	62
Figura 5.1.1- 1 Primer calentamiento en el ensayo DSC.....	63
Figura 5.1.1- 2 Primer enfriamiento en el ensayo DSC.....	64
Figura 5.1.1- 3 Área bajo la curva del pico máximo del primer calentamiento del ensayo DSC.....	64
Figura 5.1.2- 1 Curva TGA del polipropileno estudiado.....	65
Figura 5.1.2- 2 Curva DTG del polipropileno estudiado.....	66
Figura 5.1.3- 1 Índice de fluidez según la temperatura.....	67
Figura 5.2.1- 1 Indicador del desplazamiento del husillo de la unidad de inyección.....	68
Figura 5.2.3- 1 Piezas inyectadas a 250°C con presiones de inyección de 35 bar (superior) y 40 bar (inferior).....	72
Figura 5.2.3- 2 Piezas inyectadas a 190°C con presiones de inyección de 65 bar (superior) y 70 bar (inferior).....	72
Figura 5.2.3- 3 Piezas inyectadas cuyo único parámetro distinto es el tiempo de mantenimiento: 6 s (superior) y 12 s (inferior).....	73
Figura 5.3- 1 Promedio de la temperatura del molde para cada temperatura de inyección.....	75
Figura 5.3- 2 Temperatura del molde según el número de piezas consecutivas inyectadas.....	75
Figura 5.4- 1 Promedio del área de la burbuja generada por la depresión en el molde para cada temperatura de inyección.....	77
Figura 5.4- 2 Promedio del área de la burbuja generada por la depresión en el molde para cada presión de inyección.....	78
Figura 5.5.1- 1 Llenado completo o incompleto de las piezas según sus parámetros de inyección.....	79
Figura 5.5.2- 1 Valoración del área de burbujas de aire retenido de todas las piezas fabricadas según sus parámetros de inyección.....	80
Figura 5.5.2- 2 Promedio de la valoración del área de burbujas para cada temperatura de inyección.....	80

Figura 5.5.2- 3 Promedio de la valoración del área de burbujas para cada presión de inyección	81
Figura 5.5.2- 4 Valoración del número de burbujas de aire retenido de todas las piezas fabricadas según sus parámetros de inyección	81
Figura 5.5.2- 5 Promedio de la valoración del número de burbujas para cada temperatura de inyección	82
Figura 5.5.2- 6 Promedio de la valoración del número de burbujas para cada presión de inyección	82
Figura 5.5.2- 7 Promedio de la valoración del área y número de burbujas para cada temperatura de inyección	83
Figura 5.5.2- 8 Promedio de la valoración del área y número de burbujas para cada presión de inyección	83
Figura 5.5.3- 1 Valoración del área de rebabas de todas las piezas fabricadas según sus parámetros de inyección	84
Figura 5.5.3- 2 Promedio de la valoración del área de rebabas para cada temperatura de inyección	85
Figura 5.5.3- 3 Promedio de la valoración del área de rebabas para cada presión de inyección.	85
Figura 5.5.4- 1 Promedio de la contracción en la base de la biela para cada sección medida	86
Figura 5.5.4- 2 Promedio de la valoración de la contracción en la sección izquierda de la base para cada temperatura de inyección	87
Figura 5.5.4- 3 Promedio de la valoración de la contracción en la sección izquierda de la base para cada presión de inyección	88
Figura 5.5.4- 4 Promedio de la contracción en la base para cada presión y cada tiempo de mantenimiento	89
Figura 5.5.5- 1 Promedio de la contracción en el cilindro derecho a 16 mm para cada presión de inyección	90
Figura 5.5.5- 2 Promedio de la contracción en los cilindros para cada presión de mantenimiento	91
Figura 5.5.5- 3 Promedio de la contracción en los cilindros para cada tiempo de mantenimiento	91
Figura 5.5.6- 1 Valoración del ángulo de torsión de todas las piezas medidas según sus parámetros de inyección	92
Figura 5.5.6- 2 Promedio de la valoración de torsión para cada temperatura de inyección	92
Figura 5.5.6- 3 Promedio de la valoración de torsión para cada presión de inyección	92
Figura 5.5.6- 4 Promedio del ángulo de torsión para cada presión y cada tiempo de mantenimiento	93
Figura 5.5.6- 5 Valoración del ángulo de alabeo de todas las piezas medidas según sus parámetros de inyección. En rosa las piezas convexas y en azul las cóncavas	93
Figura 5.5.6- 6 Promedio del ángulo de alabeo para cada presión y cada tiempo de mantenimiento	94
Figura 5.5.6- 7 Valoración de la contracción de la distancia entre ejes de los cilindros de todas las piezas medidas según sus parámetros de inyección, medida a una cota de 16 mm	95
Figura 5.5.6- 8 Promedio de la valoración de la contracción de la distancia entre ejes para cada temperatura de inyección	95
Figura 5.5.6- 9 Promedio de la valoración de la contracción de la distancia entre ejes para cada presión de inyección	95
Figura 5.5.7- 1 Perfiles de curvatura de algunas de las piezas medidas	96
Figura 5.5.7- 2 Valoración del alabeo de todas las piezas fabricadas según sus parámetros de inyección	96
Figura 5.5.7- 3 Promedio de la valoración del alabeo para cada temperatura de inyección	97
Figura 5.5.7- 4 Promedio de la valoración del alabeo para cada presión de inyección	97
Figura 5.5.7- 5 Promedio del alabeo para cada presión y cada tiempo de mantenimiento	98
Figura 5.6- 1 Simulación de la confianza de llenado para 230°C (arriba) y 190°C (abajo)	99
Figura 5.6- 2 Simulación de las líneas de soldadura obtenidas en las piezas	100
Figura 5.6- 3 Simulación del alabeo de las piezas	100
Figura 5.6- 4 Simulación de las burbujas de aire retenido en las piezas	101

Figura 5.6- 5 Simulación de la contracción experimentada por las piezas	101
Figura 5.6- 6 Simulaciones de la orientación de las cadenas poliméricas en la pieza.....	102
Figura 5.6- 7 Simulación de la orientación de las cadenas poliméricas con la máxima temperatura de inyección	102
Figura 9- 1 Objetivos de desarrollo sostenible [39]	109
Figura 11- 1 Diagrama de Gantt del proyecto.....	112

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1.2- 1 Clasificación de polímeros y ejemplos [3].....	17
Tabla 1.2.3- 1 Propiedades térmicas y mecánicas del polipropileno [29].....	24
Tabla 4.4.4- 1 Diámetro de los cilindros de los machos del molde a la altura de las mediciones.....	57
Tabla 4.4.4- 2 Distancias entre los ejes de los machos del molde a la altura de las mediciones.....	58
Tabla 5.1.1- 1 Resultados obtenidos en la calorimetría diferencial de barrido	65
Tabla 5.2.1- 1 Tiempo de enfriamiento requerido para cada temperatura de inyección	70
Tabla 5.2.1- 2 Valor de los parámetros constantes en el proceso de inyección	70
Tabla 5.2.3- 1 Matriz de ensayos del proyecto.....	74
Tabla 5.5.2- 1 Resultados de la medición de burbujas de aire retenido	80
Tabla 5.5.3- 1 Resultados de las medición de rebabas	84
Tabla 5.5.4- 1 Resultados de la medición de la contracción del ancho de las piezas.....	86
Tabla 5.5.5- 1 Resultados de la medición de la contracción de los cilindros de las piezas	90
Tabla 5.5.7- 1 Resultados de la medición del alabeo en las piezas	96

ACRÓNIMOS:

- ABS: Acrilonitrilo Butadieno Estireno.
- BD: Butadieno.
- BP: Polibutadieno.
- DSC: Calorimetría diferencial de barrido (en inglés *Differential Scanning Calorimetry*).
- EDPM: Etileno propileno dieno monómero.
- EP: Epoxi.
- ETSII: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.
- MF: Melamina formaldehído.
- MFI: Índice de fluidez (en inglés *Melt Flow Index*).
- ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- PA: Poliamida.
- PC: Policarbonato.
- PE: Polietileno.
- PET: Polietileno tereftalato.
- PF: Fenol-formaldehído.
- PMMA: Polimetilmetacrilato.
- POM: Polioximetileno.
- PP: Polipropileno.
- PS: Poliestireno.
- PUR: Poliuretano.
- PVC: Cloruro de polivinilo.
- TGA: Análisis termogravimétrico (en inglés *Thermogravimetric Analysis*).
- TPU: Poliuretano termoplástico.
- UF: Urea-formaldehído.
- UP: Poliéster insaturado.
- UPM: Universidad Politécnica de Madrid.

1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA:

El proceso de inyección es, a día de hoy, uno de los métodos de fabricación más importantes en la obtención de productos de plástico. En la actualidad, la producción mundial de piezas fabricadas mediante procesos de inyección de plástico se encuentra alrededor de las 5,9 millones de toneladas anuales, siendo una industria que está en continuo crecimiento, ya que se estima que en el año 2029 se alcanzarán las 7,24 millones de toneladas producidas anualmente [1].

El moldeo por inyección permite trabajar con todo tipo de polímeros, ya sean termoplásticos, termoestables o elastómeros. Sin embargo, aquellos cuyas características son más apropiadas para la inyección son los termoplásticos, siendo los más empleados. En lo relativo a la distribución de los materiales empleados en la industria del moldeo por inyección, el material más utilizado es el polipropileno (PP), un 38% de las piezas de plástico fabricadas por inyección emplean este material. Le siguen el polietileno (PE) con un 15% de la producción mundial y el poliestireno (PS) con un 8% [2].

El proceso de inyección es el idóneo para la fabricación de piezas a gran escala, ya que permite la transformación en un único paso de materia prima hasta producto terminado [3]. A su vez, cuenta con múltiples ventajas como la escasa necesidad de operaciones de acabado, la elevada calidad superficial de las piezas si se emplea el molde y las condiciones operativas adecuadas o la capacidad de producir piezas de geometrías complejas. Asimismo, se trata de un tipo de fabricación muy versátil que permite obtener tanto piezas muy ligeras como piezas considerablemente pesadas [3].

Una característica fundamental de la inyección es que es un proceso que puede ser automatizable en su totalidad, debido a que las condiciones bajo las que tiene lugar la fabricación son altamente reproducibles. Esto supone una ventaja fundamental de este tipo de fabricación frente a otros, ya que provoca una muy elevada eficiencia de producción, con alta velocidad, repetitividad y precisión. Todos ellos son factores clave que convierten a la inyección en el método más adecuado para la fabricación a gran escala, mediante ciclos automatizados de muy poca duración.

Se trata de una tecnología de procesado de plásticos cuya inversión inicial es muy elevada, tanto en maquinaria como en el diseño y la producción de los moldes, pero que debido a la gran automatización y velocidad ya mencionadas logra que el coste unitario de cada pieza sea significativamente más bajo cuando se producen grandes series. A su vez, muchos de los materiales empleados en la inyección permiten su reciclado, minimizando así el desperdicio del mismo en búsqueda de la sostenibilidad medioambiental.

Por otro lado, este modo de fabricación también presenta ciertos inconvenientes. Entre ellos se encuentran las limitaciones en las geometrías a fabricar, ya que con espesores de pieza mayores a 8 mm, el tiempo de enfriamiento es demasiado elevado y no se recomienda emplear la inyección. Además, como ya se ha mencionado anteriormente, para que sea rentable el proceso de inyección se deben fabricar un número muy elevado de piezas. Otra de las desventajas principales que presenta esta tecnología es la limitación en tamaño de las piezas, puesto que para fabricar piezas de gran tamaño se requieren máquinas y moldes muy grandes, cuyo coste es mucho más elevado.

A pesar de todo ello, el mayor reto al que se enfrenta la industria del moldeo por inyección es el de hacer frente a la aparición de defectos en las piezas. Se trata de un problema muy frecuente y complejo, ya que en la aparición de los defectos influyen numerosos

parámetros de inyección, como presiones, temperaturas, tiempos o velocidades. Esta aparición de defectos es en muchas ocasiones inevitable y se debe en gran medida a la contracción del material durante la solidificación del mismo.

1.1. MOLDEO POR INYECCIÓN:

El moldeo por inyección es un proceso de conformado semicontinuo que emplea principalmente materiales poliméricos. En el mismo, se parte de gránulos o *pellets* que son calentados hasta reblandecerse y alcanzar un estado de plasticidad y fluidez. Tras ello, el material fluido se inyecta mediante una elevada presión y de forma rápida en un molde a través de un pequeño orificio. Una vez el material se encuentra en el molde, tiene lugar el enfriamiento del mismo que da lugar a su solidificación, tras la que se procede a la extracción de la pieza [4].

La inyección permite obtener un gran número de piezas mediante ciclos rápidos en los que resulta un producto prácticamente finalizado de buena calidad y precisión, sin apenas necesidad de operaciones de acabado.

1.1.1. Máquina de inyección:

Las máquinas de inyección son unos dispositivos en los que se introduce el polímero en forma de *pellets* y se obtiene una pieza de plástico con la geometría deseada. Todas las máquinas de inyección cuentan con dos sistemas cuyo funcionamiento y objetivos son independientes. Se trata de la unidad de inyección y de la unidad de cierre, como se puede observar en la Figura 1.1.1-1:

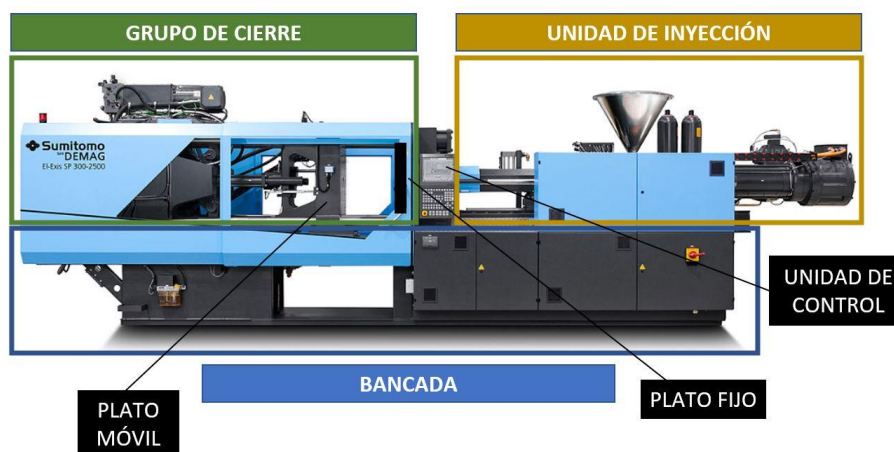


Figura 1.1.1- 1 Unidades de una máquina de inyección [5]

Por un lado, la unidad de inyección tiene dos objetivos principales: debe plastificar el material para llevarlo desde un estado sólido hasta un estado fluido y debe inyectar dicho material en el molde [1].

Por otro lado, la unidad de cierre se encarga de abrir y cerrar el molde, teniendo como objetivo fundamental asegurar que el molde se mantenga cerrado durante la inyección del material, así como soportar la presión que ejerce la unidad de inyección. Otra tarea de

esta unidad es la de expulsar la pieza una vez se ha solidificado, empujándola mediante los eyectores.

Estas unidades se dividen a su vez en numerosos componentes que tienen tareas más específicas de cara al proceso de inyección. En la Figura 1.1.1-2 se pueden observar de manera esquemática algunos de los elementos de la unidad de inyección:

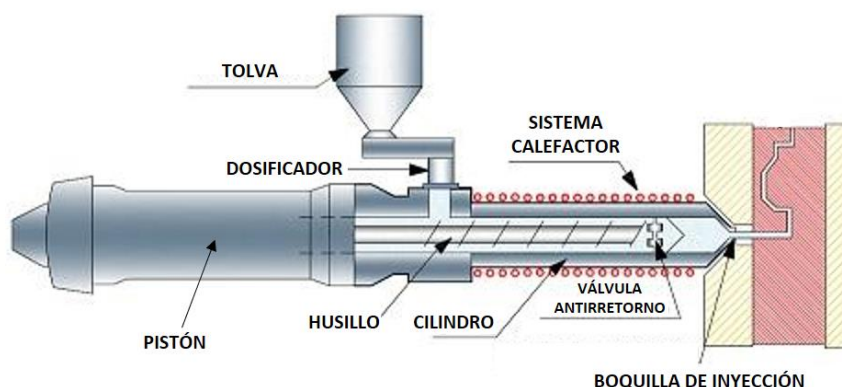


Figura 1.1.1- 2 Elementos de la unidad de inyección [6]

A continuación, se describe para qué sirve y cómo es el funcionamiento de cada uno de estos elementos de la unidad de inyección:

- La **tolva** es el elemento encargado de almacenar y proteger los gránulos del material que se va a inyectar. Tiene paredes inclinadas o una forma tronco-cónica para cumplir su otra función: alimentar de material por gravedad a los siguientes componentes de la inyectora, asegurando que a la máquina le llegue un flujo continuo del mismo.
- El **dosificador** es el componente de esta unidad que se encarga de regular la cantidad de material que pasa desde la tolva, donde se está almacenando, hacia el cilindro en el que será fundido. Está directamente comunicado con la tolva. Se trata de un elemento clave para optimizar los ciclos de inyección y aumentar la eficiencia del proceso, puesto que debe permitir el paso únicamente de la cantidad de material que llena la cavidad del molde y los canales de alimentación y que sale como pieza tras el proceso.
- El **cilindro** es el elemento en cuyo interior tendrá lugar la fusión del polímero mediante el calor aportado por las bandas calefactoras y el movimiento del husillo. Su función principal es albergar el material mientras se mezcla, se prepara y se lleva a las condiciones idóneas para que tenga lugar la inyección.
- El **sistema calefactor** está compuesto por bandas calefactoras que suelen ser resistencias eléctricas. Su principal objetivo es fundir el polímero y llevarlo hasta un estado suficientemente fluido como para que pueda tener lugar la inyección. Se debe controlar la temperatura de forma que esta aumente gradualmente a lo largo del cilindro. Asimismo, se debe ajustar dicha temperatura para evitar la falta de fluidez si la temperatura es demasiado baja, que impediría la inyección, o la degradación del material en el caso de que la temperatura sea demasiado alta, que provocaría una modificación indeseada en las propiedades del polímero.
- El **husillo** es un elemento que se encuentra ubicado en el interior del cilindro, que consiste en un tornillo sin fin de acero [7]. Tiene un movimiento de rotación cuyo

objetivo es favorecer la fusión y homogeneización del material, mediante la fricción del mismo con las paredes del cilindro [8]. Asimismo, tiene un movimiento de avance cuyo objetivo es propulsar al material fundido hacia la boquilla de inyección. El husillo de las máquinas de inyección cuenta con tres zonas bien diferenciadas, como se puede observar en la Figura 1.1.1-3:

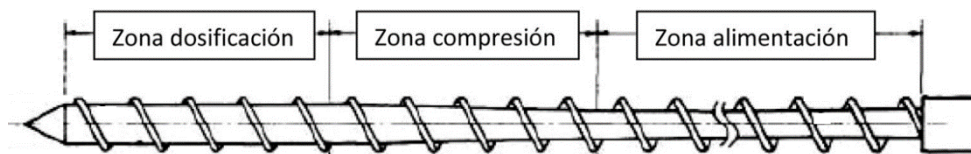


Figura 1.1.1- 3 Zonas del husillo en un máquina de inyección [7]

- La zona de alimentación es la más cercana a la tolva. En ella entra el polímero granulado y se transporta en estado sólido hacia las siguientes zonas. Su longitud varía en las distintas máquinas de inyección, pero suele tener una longitud en torno a la mitad de la longitud total del husillo.
 - La zona de compresión es la encargada de aumentar el calor aportado al polímero. En esta zona tiene lugar un progresivo aumento del diámetro del husillo para comprimir el material, aumentando la fricción y los esfuerzos de cizalla que este sufre. Su longitud suele ser un 25% de la longitud total del husillo.
 - La zona de dosificación es aquella más cercana a la boquilla de inyección y que cuenta con el mayor diámetro del husillo. Recibe el material fundido casi en su totalidad y su objetivo es finalizar la fusión de los residuos sólidos restantes, así como mezclar y homogeneizar completamente la masa fundida. Usualmente su longitud es también un 25% de la longitud total del husillo.
- El **pistón** es un componente de funcionamiento normalmente hidráulico, aunque también puede ser mecánico, que es el encargado de ejercer presión sobre el material a inyectar. Esta presión tiene como tareas principales vencer la resistencia que opone el material a pasar por la boquilla de inyección y mantener dicha presión una vez ha tenido lugar la inyección para minimizar la contracción experimentada por el material al enfriarse (fase de mantenimiento) [4].
 - La **boquilla de inyección**, también conocida como **tobera de inyección**, es el elemento de la máquina gracias al cual se comunican y entran en contacto el cilindro y el canal de alimentación del molde. Cuenta con un orificio por el que sale el polímero en estado fundido cuando el pistón ejerce presión.
 - La **válvula antirretorno** es un componente que impide el reflujó de material en el cilindro, evitando que el material fluido vuelva hacia la zona de alimentación, pero que posibilita el flujo hacia el molde.

Por otro lado, los elementos de la otra gran unidad de las máquinas de inyección, la unidad de cierre, se muestran en la Figura 1.1.1-4:

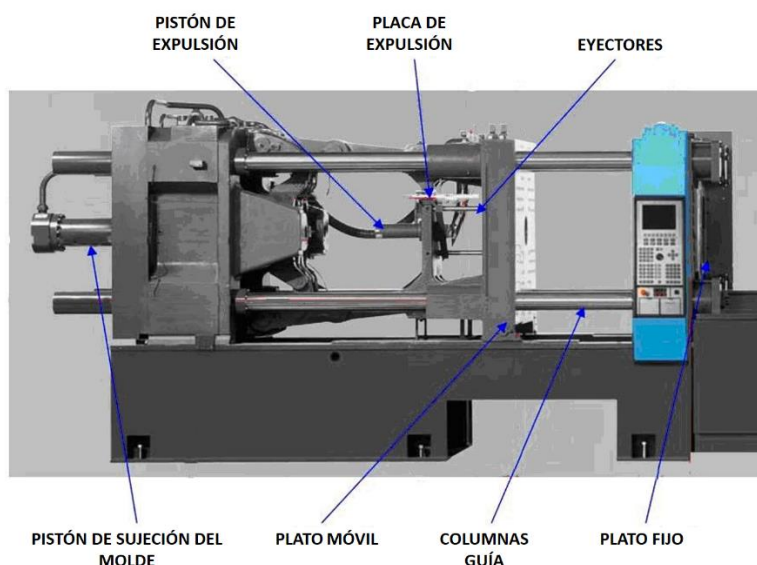


Figura 1.1.1- 4 Elementos de la unidad de cierre [9]

La función de cada uno de estos componentes es:

- El **plato fijo** es el componente sobre el que se coloca la mitad fija del molde. Debe ser capaz de anclar y asegurar dicha parte del molde. Asimismo, debe contar con un canal de alimentación por el que pase el polímero fundido.
- El **plato móvil** es el componente sobre el que se coloca la mitad móvil del molde. Se desliza sobre las columnas guías y permite la apertura y cierre del molde.
- Las **columnas guía** sirven de sustento para el plato móvil en su movimiento horizontal de apertura y cierre.
- El **pistón de sujeción del molde** es el encargado de aplicar la fuerza que provoca el desplazamiento del plato móvil. A su vez, una tarea clave que cumple es la de ejercer la presión de cierre sobre el molde durante la inyección del material y el enfriamiento del mismo.
- Los **eyectores** son los encargados de ejecutar el desmoldeo de la pieza una vez el material se ha solidificado con la forma deseada. Suelen ser varillas que se desplazan en el plato móvil y facilitan la salida de la pieza del molde. Por otro lado, se debe tener cuidado con las deformaciones inducidas por los eyectores en el proceso de desmoldeo, por lo que en ocasiones se retiran las varillas y es simplemente el movimiento de la placa de expulsión el que ejerce el desmoldeo.
- La **placa de expulsión** es el componente sobre el que se colocan los eyectores y permite una distribución más homogénea y uniforme de la fuerza que se ejercerá sobre la pieza para su desmoldeo.
- El **pistón de expulsión** es el encargado de aportar la fuerza que mueve la placa de expulsión.

1.1.2. Molde:

El molde es uno de los componentes más relevantes en el proceso de inyección de polímeros. Se trata de un elemento que cuenta con una cavidad en la que se introduce el polímero en estado fundido a gran temperatura mediante la aplicación de una elevada presión. Dicha cavidad tiene la geometría de la pieza que se quiere fabricar y debe albergar al material durante su enfriamiento hasta que se solidifique y pueda ser extraído del molde una vez ha tomado dicha forma. En general, la cavidad del molde debe estar sobredimensionada para compensar la contracción que experimentan los polímeros al solidificarse.

Los moldes se dividen en dos grandes familias: moldes de una cavidad y moldes multicavidad. La diferencia fundamental entre ambos es el número de piezas que se pueden obtener en cada inyección de material. En los moldes multicavidad se pueden obtener tantas piezas como cavidades, pudiendo ser todas iguales o contando cada una con un diseño distinto, denominándose moldes familia.

En los moldes multicavidad es siempre necesario verificar que el número de cavidades a fabricar multiplicado por el peso de cada pieza sea menor o igual que la capacidad de inyección con la que cuenta la máquina empleada.

En la Figura 1.1.2-1 se puede observar la comparativa entre un molde multicavidad que puede fabricar en cada ciclo de inyección 8 piezas, ubicado a la izquierda, y un molde de cavidad única, a la derecha:

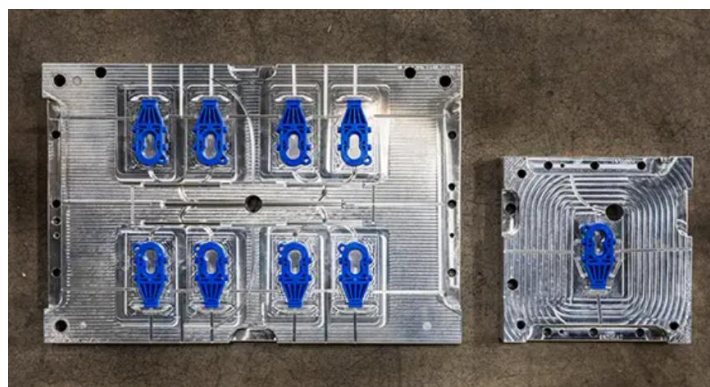


Figura 1.1.2- 1 Comparación entre un molde multicavidad (izquierda) y un molde con una única cavidad (derecha) [10]

Los moldes son un elemento clave en el moldeo por inyección y deben cumplir una serie de requerimientos para que este tenga éxito. En primer lugar, deben tener un muy buen acabado superficial y ser muy precisos dimensionalmente, puesto que cualquier defecto se trasladará a las piezas inyectadas [11]. A su vez, también es necesario que esté perfectamente mecanizado para asegurar un ajuste perfecto y lograr un cierre hermético.

Por otro lado, el molde debe tener buena resistencia mecánica a compresión, puesto que debe soportar la presión con la que se inyecta el polímero y, especialmente, la presión ejercida sobre él por la unidad de cierre para asegurar su cierre hermético durante la inyección. En lo relativo a la temperatura, el molde ideal debe contar con una temperatura de fusión muy superior a las temperaturas con las que se trabaje, una buena conductividad térmica para favorecer la refrigeración de la pieza, evacuando el calor durante su enfriamiento y solidificación, y debe ser estable dimensionalmente a altas temperaturas.

Para la fabricación de moldes, como norma general, se realiza un mecanizado y un pulido [12]. Los materiales más usados en la industria de moldes para inyección son el acero y el aluminio. Ambos cuentan con la ventaja de tener una considerable conductividad térmica que facilita el enfriamiento de la pieza, disminuyendo el tiempo necesario y aumentando la calidad del producto obtenido. Entre las ventajas con las que cuenta cada uno, el acero tiene una mayor resistencia mecánica, mientras que el aluminio presenta una mayor facilidad de mecanizado y un menor coste.

A continuación, se presentan todos los elementos que conforman el molde. En la Figura 1.1.2-2 se pueden ver representados los más relevantes:

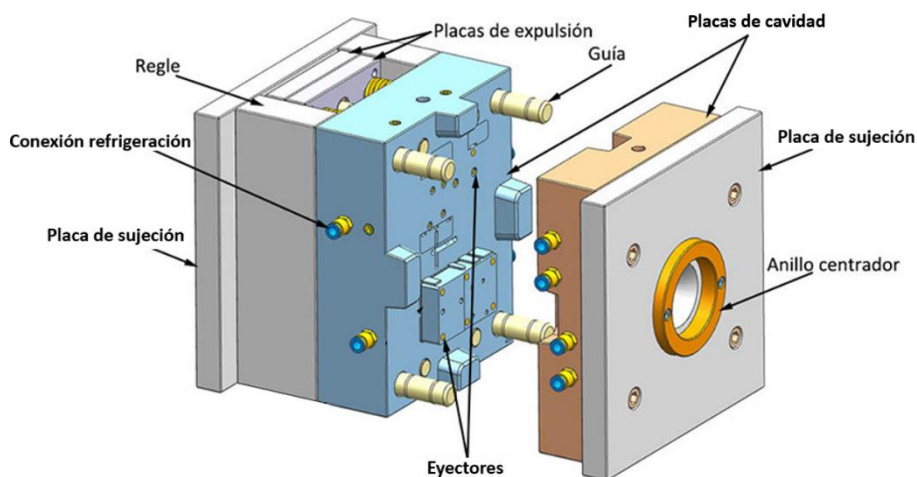


Figura 1.1.2- 2 Componentes de un molde para procesos de inyección [13]

- **Anillo centrador:** Es el componente encargado de asegurar que la boquilla de inyección y el bebedero se encuentran alineados, para asegurar que no se desperdicie material en el momento de la inyección [13].
- **Sistema de alimentación:** Es el conjunto de elementos que comunica la boquilla de inyección y la cavidad del molde. Por este sistema circula el polímero fundido a gran temperatura y velocidad en el momento de la inyección. Está formado por los siguientes elementos:
 - **Bebedero:** Es el elemento que se une a la boquilla en el momento de la inyección y por el que circula todo el material a inyectar. Tiene forma tronco-cónica para facilitar el desmoldeo del material que quede en esta zona. Desemboca en los canales de alimentación.
 - **Canales de alimentación:** Reciben el material desde el bebedero y lo trasladan hasta las entradas del molde. Suelen ser varios los canales de alimentación, variando su número en función de las cavidades con las que cuenta el molde y de los puntos de inyección que tenga cada cavidad.
 - **Entrada:** Es el estrecho conducto por el que la masa fluida entra en la cavidad. El orificio por el que llega el polímero fundido a la cavidad se denomina punto de inyección.
- **Placa de sujeción:** Es la encargada de unirse a los platos fijo y móvil de la unidad de cierre de la máquina y sostener a los demás elementos del molde [13].
- **Cavidad:** Es la geometría de la pieza a fabricar mecanizada sobre las placas de cavidad del molde. Debe diseñarse con las dimensiones de la pieza sobredimensionadas, ya que el polímero experimentará una contracción y una disminución de volumen durante su enfriamiento.

- **Placas de cavidad:** Son la placa fija y la placa móvil. Sobre ellas se ha mecanizado la cavidad o las cavidades sobre las que se solidificará el material una vez sea inyectado. Si la pieza a fabricar requiere el uso de machos para crear agujeros, estos se colocarán en la placa fija.
- **Respiraderos:** Son elementos que permiten al aire y a los gases retenidos en la cavidad y en el sistema de alimentación salir a la atmósfera cuando estos se llenan de material. Sin ellos, estos gases quedarían retenidos dentro de la pieza en forma de burbujas.
- **Guías:** Son elementos cuyo objetivo es alinear las dos placas de figura en el momento en que se cierra el molde, para lograr un encaje perfecto y un cierre hermético, evitando así fugas de material en el momento de la inyección y garantizando que la pieza obtenida tenga la geometría deseada.
- **Placa expulsora:** Es la encargada del desmoldeo de la pieza. Sobre ella se colocan los eyectores y se desplaza hacia la placa móvil. Proporciona una distribución más uniforme de la fuerza ejercida sobre la pieza para extraerla.
- **Eyectores:** Suelen ser varillas que están colocadas sobre la placa expulsora. Su función es empujar a la pieza una vez se ha solidificado para su desmoldeo.
- **Sistema de refrigeración:** Son canales que atraviesan el molde por los que circula un fluido refrigerante, usualmente agua o aceite. Da lugar a una mayor eficacia en la extracción de calor de la pieza durante su enfriamiento. Esta mejora en la refrigeración provoca una disminución en el tiempo de enfriamiento requerido y un aumento de la calidad de la pieza obtenida.
- **Regles:** Son los elementos encargados de conectar las placas de sujeción y las placas de cavidad, permitiendo la existencia de un espacio libre para el movimiento de la placa expulsora. También tienen funciones de sujeción.

1.1.3. Ciclo de inyección:

Todos los procesos de moldeo por inyección se llevan a cabo siguiendo una secuencia de operaciones para acabar obteniendo el producto terminado. El ciclo de inyección es esta sucesión de etapas ejecutadas tanto por la unidad de inyección como por la unidad de cierre, algunas de ellas realizadas de forma paralela. En la Figura 1.1.3-1 se muestra un esquema de este ciclo:

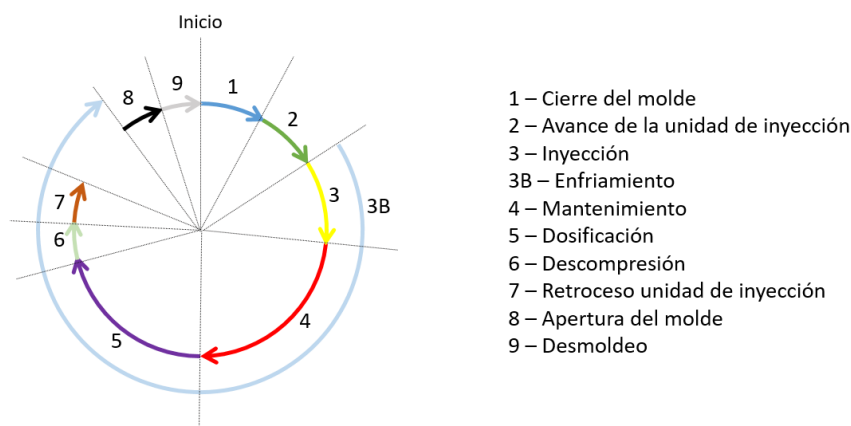


Figura 1.1.3- 1 Esquema del ciclo de inyección

A continuación, se describe cada una de las etapas del ciclo de inyección:

Fase 1 - Cierre del molde:

En esta primera etapa se desplaza la unidad de cierre con el objetivo de cerrar el molde. El movimiento en vacío se realiza con baja presión y alta velocidad al principio, para disminuir el tiempo total del ciclo. A continuación, se reduce la velocidad en los momentos cercanos al contacto entre las dos partes del molde para asegurar un ajuste perfecto y evitar choques. Por último, se aplica la fuerza de cierre mediante un aumento en la presión aplicada sobre el molde. Esta fuerza ejercida sobre el molde tiene como objetivo aguantar la presión de la pieza al ser inyectada y evitar fugas de material por los resquicios del molde.

Fase 2 – Desplazamiento de la unidad de inyección hacia el molde:

En esta etapa se encuentra ya dentro del cilindro la cantidad de material que va a ser inyectada. Mediante las bandas calefactoras y la fricción producida por el movimiento de rotación del husillo el material debe estar en un estado fundido y desplazado hasta la parte delantera del cilindro de inyección. El principal objetivo de esta etapa es llevar al polímero hasta las condiciones óptimas de temperatura y homogeneidad para que tenga lugar la inyección, así como conectar físicamente el cilindro y el molde. Esta etapa acaba con la boquilla de inyección ubicada sobre el canal de alimentación del molde. En la Figura 1.1.3-2 se muestra un esquema de esta fase:

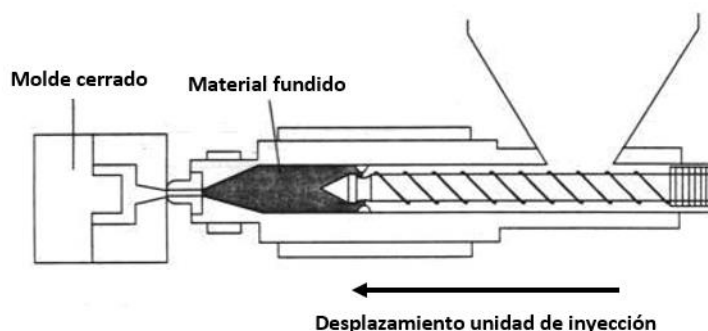


Figura 1.1.3- 2 Representación del desplazamiento de la unidad de inyección hacia el molde [9]

Fase 3 – Inyección del material:

Esta etapa consiste en la inyección del material fluido dentro del molde mediante la aplicación de una presión elevada. En este momento el husillo ha dejado de rotar y transmite al polímero la presión de inyección que el pistón ejerce sobre él, introduciendo al molde el polímero fundido a través del canal de alimentación. Se observa una representación esquemática de esta fase en la Figura 1.1.3-3:

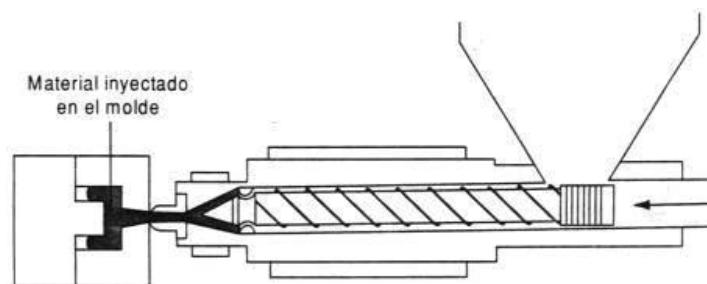


Figura 1.1.3- 3 Representación de la inyección del material en el molde [9]

Fase 3B – Enfriamiento:

Es una de las etapas más importantes del proceso. El enfriamiento comienza cuando el material es inyectado dentro del molde y se superpone con las fases de mantenimiento, dosificación y descompresión. En esta etapa el polímero fluido que se ha introducido dentro del molde disminuye su temperatura y se solidifica con la forma de la cavidad del molde.

El tiempo de enfriamiento abarca desde que el material es inyectado hasta la apertura del molde y su cálculo es función del espesor de la pieza, la difusividad térmica del material y las temperaturas de inyección, del molde y de cristalización del polímero.

Fase 4 – Mantenimiento:

Esta etapa, al igual que el enfriamiento, comienza inmediatamente después de la inyección del material. En ella, el husillo continúa ejerciendo una presión denominada presión de mantenimiento, que suele ser menor que la presión de inyección. El objetivo de esta etapa es hacer frente a la contracción que experimenta el polímero durante su enfriamiento mediante el aporte de material adicional, así como evitar el retroceso del material aún fundido hacia el cilindro de inyección.

En la Figura 1.1.3-4 se observa un esquema de la etapa de mantenimiento:

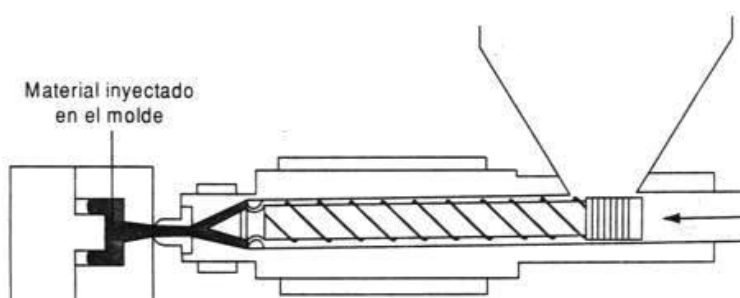


Figura 1.1.3- 4 Representación de la etapa de mantenimiento en el proceso de inyección [9]

Por otro lado, en la Figura 1.1.3-5 se muestra la evolución temporal de la presión que debe aplicar el husillo desde la inyección del material. Se puede observar que la etapa de enfriamiento siempre tiene una duración superior a la de mantenimiento. Tras la inyección, se continúa aplicando presión en la etapa de mantenimiento, aunque con un valor más bajo, y se retira cuando finaliza esta etapa:

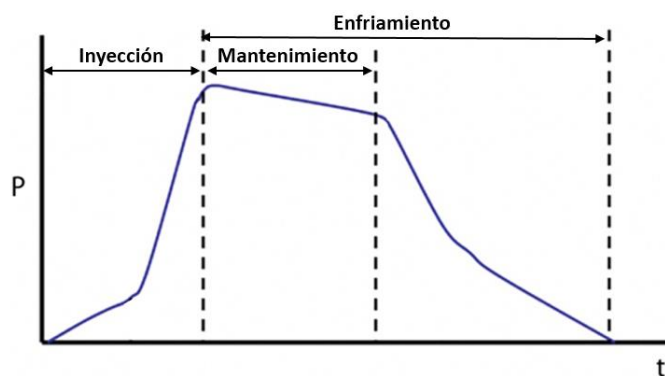


Figura 1.1.3- 5 Evolución temporal de la presión ejercida por el husillo tras la inyección del material [14]

Fase 5 – Dosificación:

Esta fase también ocurre de forma simultánea con el enfriamiento de la pieza. Su objetivo fundamental es cargar el material necesario para el siguiente ciclo de inyección. Para ello, el husillo comienza su movimiento de rotación y hace caer los *pellets* desde la tolva hasta el cilindro. Esta etapa busca a su vez acondicionar el material para el siguiente ciclo, iniciando su fusión con el calor aportado por las bandas calefactoras y la fricción interna debida al giro del husillo, desplazándolo hasta la parte delantera del cilindro [15]. En la Figura 1.1.3-6 se representa el funcionamiento de la máquina en esta etapa:

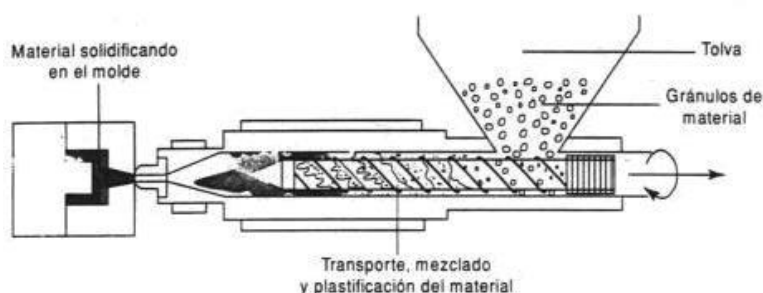


Figura 1.1.3- 6 Esquema de la etapa de dosificación en el proceso de inyección [9]

Fase 6 – Descompresión:

Esta etapa consiste en un pequeño retroceso del husillo debido a la presión ejercida por el material fundido en la parte delantera del mismo, buscando evitar que en el momento de apertura de la boquilla existan fugas del material fluido.

Fase 7 – Desplazamiento de la unidad de inyección alejándose del molde:

En esta etapa, con el molde aún cerrado, tiene lugar un movimiento de retroceso de la unidad de inyección, separando la boquilla de inyección y el canal de alimentación del molde.

Fase 8 – Apertura del molde:

Tras el periodo de enfriamiento, cuando el material polimérico ya se ha solidificado con la forma deseada, la unidad de cierre procede a abrir el molde. En primer lugar, se retira la presión ejercida que da lugar a la fuerza de cierre. A continuación, la placa móvil del molde se separa de la placa fija con una velocidad lenta para no inducir deformaciones en

la pieza. Por último, dicha placa ya tiene un movimiento en vacío a mayor velocidad hasta llegar a su posición final de molde abierto.

Fase 9 – Desmoldeo:

Es la última etapa del ciclo y su objetivo es retirar la pieza solidificada de la cavidad del molde, haciendo uso de la placa de expulsión y de los eyectores. Es necesario tener en cuenta que los eyectores pueden inducir deformaciones permanentes en la pieza inyectada, por lo que si evitar dichas deformaciones es un factor crítico se puede emplear simplemente la placa de expulsión o un flujo de aire comprimido para despegar la pieza. En la Figura 1.1.3-7 se observa un esquema de esta etapa:

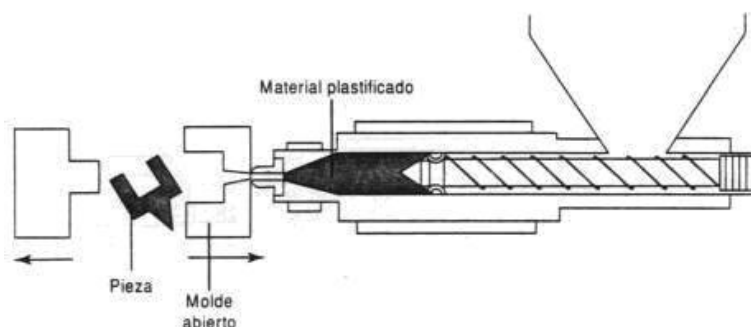


Figura 1.1.3- 7 Desmoldeo de la pieza en el proceso de inyección [9]

1.1.4. Parámetros del proceso de inyección:

En el proceso de inyección de polímeros intervienen numerosas variables que afectan a la calidad de la pieza obtenida y a los defectos que en ella aparecen. Es necesario regular un elevado número de parámetros, lo que hace que la tarea de optimizar el proceso resulte muy compleja. A continuación, se muestran los parámetros más relevantes de cara al proceso de inyección:

Temperatura de la masa fluida:

Es la temperatura a la que está el material en el interior del cilindro de inyección, encontrándose en un estado termoplástico. Se obtiene calentando el polímero mediante la fricción provocada por el giro del husillo y mediante el calor aportado por las bandas calefactoras. Usualmente, tiene lugar un aumento progresivo de la temperatura de dichas bandas según se avanza a lo largo del cilindro.

Es clave en el proceso el control de esta temperatura, puesto que temperaturas muy altas darán lugar a un sobrecalentamiento del material causando la degradación del polímero, que tendrá como consecuencia la pérdida de sus propiedades mecánicas y una mayor probabilidad de aparición de defectos. A su vez, también se debe controlar que la temperatura de la masa fluida no sea demasiado baja, puesto que daría lugar a problemas de llenado al no lograr suficiente fluidez del material.

A modo de ejemplo, en la Figura 1.1.4-1 se muestra una pieza en la que no se ha completado el llenado de la cavidad, debido a que el polímero no ha alcanzado una temperatura suficientemente alta como para fluir óptimamente:

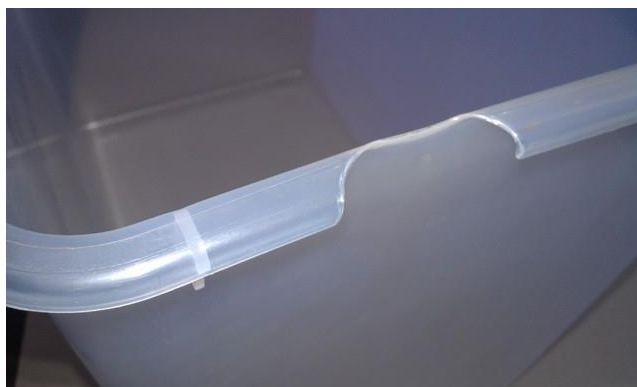


Figura 1.1.4- 1 Pieza con llenado incompleto debido a baja temperatura del polímero [16]

Temperatura de inyección:

Es la temperatura que tiene la masa fluida en el momento en el que se inyecta en el molde. Tiene relación directa con la fluidez del polímero en el momento de la inyección, por lo que se debe calcular el valor óptimo según el material empleado para maximizar la calidad de la pieza fabricada.

Presión de inyección:

Es la presión aplicada por el pistón que permite inyectar el material fluido dentro del molde. Es clave calcular correctamente esta presión, ya que presiones demasiado bajas dan lugar a un llenado incompleto de la cavidad del molde, mientras que presiones demasiado altas producen rebabas.

Presión de mantenimiento:

Es la presión que se continúa ejerciendo una vez ha tenido lugar la inyección, mientras el polímero ya se encuentra en el interior del molde. Su objetivo es hacer frente a la contracción que experimenta el polímero al solidificarse, así como minimizar la aparición de rechupes. Es siempre menor a la presión de inyección y se expresa como un porcentaje de esta.

Tiempo de mantenimiento:

Es el tiempo durante el cual se ejerce la presión de mantenimiento para contrarrestar la contracción del material.

Tiempo de enfriamiento:

Es un parámetro clave en la inyección de polímeros. Se define como el tiempo transcurrido desde que tiene lugar la inyección de material en el molde hasta que se produce la apertura del mismo para proceder a la extracción de la pieza. Durante este periodo tiene lugar la solidificación del material dentro del molde para poder ser extraído con la forma deseada.

Es fundamental realizar un correcto cálculo del tiempo de enfriamiento en estos procesos, ya que si el molde se abre antes de lo debido el polímero no se habrá solidificado, siguiendo con una cierta plasticidad que provocará que el material todavía blando caiga del molde por gravedad sin la forma deseada. Por otro lado, un tiempo de enfriamiento

excesivo provocaría que resulte muy difícil el desmoldeo de la pieza, pudiendo inducir deformaciones adicionales al intentar extraerla del molde.

Para el cálculo del tiempo de enfriamiento óptimo se emplean fórmulas empíricas que tienen en cuenta numerosas variables. Entre ellas destacan parámetros del material como su difusividad térmica, características geométricas como la forma de la pieza (plana, cilíndrica, esférica, etc.) y el espesor de la misma, así como parámetros de funcionamiento de la máquina como la temperatura del molde o la temperatura de inyección. Para piezas planas o cilíndricas con un vaciado cilíndrico se emplea la Ec. 1:

$$(Ec. 1) \quad t_c = \frac{h^2}{\alpha \cdot \pi^2} \cdot \ln \left(\frac{4}{\pi} \cdot \left(\frac{T_m - T_w}{T_e - T_w} \right) \right) \quad [17]$$

Siendo los parámetros de dicha fórmula:

t_c : tiempo de enfriamiento (s).

h : espesor de la pieza (en piezas planas) (mm).

h : diferencia entre radio exterior e interior (en piezas cilíndricas con vaciado cilíndrico) (mm).

α : difusividad térmica del material (m^2/s).

T_m : temperatura del molde ($^{\circ}C$).

T_w : Temperatura de eyección del material ($^{\circ}C$).

T_e : Temperatura del material al comienzo del enfriamiento ($^{\circ}C$).

Para el cálculo de la difusividad térmica del material se emplea la Ec. 2, que se basa en parámetros que son conocidos del polímero como la conductividad térmica (k), la densidad (ρ) y el calor específico (C_p):

$$(Ec. 2) \quad \alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad [18]$$

Volumen a inyectar:

Se trata del volumen total a inyectar, es decir, el volumen de la pieza a fabricar junto con el volumen de los canales de alimentación. Está directamente relacionado con el desplazamiento del husillo en el momento de la carga del material, que es el parámetro que se suele introducir en las máquinas de inyección.

Cojín de inyección:

Se define como cojín de inyección la cantidad de material polimérico que queda en la parte frontal del husillo una vez ha finalizado la etapa de mantenimiento. En la Figura 1.1.4-2 se muestra una representación de este cojín de inyección:

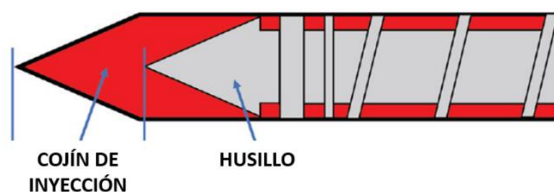


Figura 1.1.4- 2 Representación esquemática del cojín de inyección [19]

El cojín de inyección se emplea por múltiples motivos: transmite la presión aplicada a través del polímero, permite que el proceso tenga ciclos repetibles para que la máquina opere de forma continua y automatizada, da lugar a una inyección más consistente del material, contribuye a la etapa de mantenimiento disminuyendo las posibilidades de que haya una sobrecompactación del material y reduce el desgaste del husillo y otros elementos de la unidad de inyección en cada ciclo, entre otros.

De cara al proceso de inyección es necesario definir el volumen de este cojín de inyección, para tener en cuenta el desplazamiento adicional que debe tener el husillo al cargar el material. Para un correcto funcionamiento del proceso de inyección, este cojín debe ser:

- 5% del volumen total a inyectar, si la unidad de inyección tiene una ocupación superior al 50%.
- 10% del volumen total a inyectar, si la unidad de inyección tiene una ocupación inferior al 50%.

Contrapresión:

La contrapresión es una presión adicional ejercida sobre el pistón para oponerse a la presión que ejerce el material ubicado en el cilindro, de modo que favorece a que el material se compacte y evita un posible retroceso del husillo, como se muestra de forma esquemática en la Figura 1.1.4-3:

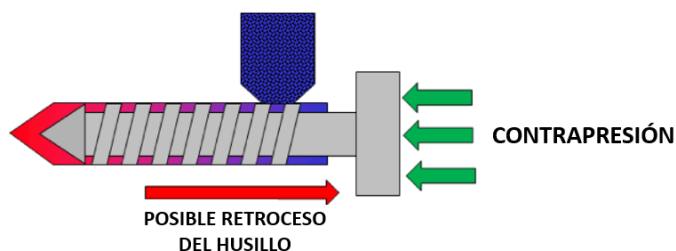


Figura 1.1.4- 3 Esquema de la aplicación de contrapresión en el proceso de inyección [20]

El uso de contrapresión presenta múltiples ventajas, entre las que destacan la homogeneización de la temperatura de la masa fluida y la mayor evacuación de aire retenido en la misma, disminuyendo la aparición de defectos como burbujas. Sin embargo, también se debe tener en cuenta que un aumento de la contrapresión dará lugar a un aumento en el tiempo de ciclo.

Para definir el valor de contrapresión necesario para aplicar en el proceso se debe tener en cuenta el tipo de polímero con el que se está trabajando:

- Polímeros termoestables: No se debe aplicar contrapresión porque un aumento de la temperatura puede dar lugar al curado del material, impidiendo su inyección. Algunos ejemplos de este tipo de polímeros son el fenol-formaldehído (PF) y la urea-formaldehído (UF).
- Polímeros sensibles a la temperatura: Se deben aplicar presiones bajas, entre 1 bar y 10 bar. Algunos ejemplos de este tipo de materiales son el poliuretano termoplástico (TPU) y el polietileno tereftalato (PET).
- Polímeros reforzados con fibras: Se deben aplicar presiones bajas, entre 1 bar y 10 bar.
- Polímeros convencionales: Se deben aplicar presiones medias, entre 10 bar y 20 bar. Se consideran polímeros convencionales el PP, el PE, el PS y el acrílico (ABS).
- Polímeros de elevada viscosidad: Se deben aplicar presiones altas, entre 20 bar y 30 bar. Entre los polímeros de alta viscosidad destacan el policarbonato (PC) y las poliamidas (PA).

Descompresión:

La descompresión consiste en un movimiento de retroceso del husillo que se realiza antes y después de la dosificación. Tiene como objetivos principales disminuir las fugas de material entre la boquilla y el molde, así como disminuir la presión que experimenta la boquilla una vez se ha inyectado el material, para evitar que este salga al retirarla.

Durante el ciclo de inyección tienen lugar dos descompresiones:

- Primera descompresión: Tiene lugar antes de la dosificación. Se suele emplear cuando se está trabajando con presiones muy elevadas. El desplazamiento del husillo debe ser el equivalente al 20% del volumen a inyectar.
- Segunda descompresión: Tiene lugar después de la dosificación. Se suele emplear siempre y el desplazamiento del husillo depende del tamaño de la máquina:
 - Si el diámetro del husillo es inferior a 75 mm: el husillo retrocederá una distancia igual al 10% de ese diámetro.
 - Si el diámetro del husillo es superior a 75 mm: el husillo retrocederá una distancia igual al 5% de ese diámetro.

Tiempo de residencia:

Se trata del tiempo total que pasa la masa fundida en la máquina. El polímero debe estar en el cilindro el tiempo suficiente para lograr una buena homogeneización, pero sin excederse, ya que puede llegar a degradarse.

1.2. POLÍMEROS:

Los materiales poliméricos están compuestos por macromoléculas de gran tamaño entrecruzadas. Estas moléculas a su vez están formadas por unidades químicas sencillas denominadas monómeros, que se repiten a lo largo de una cadena [21]. Las cadenas pueden ser lineales, ramificadas, entrecruzadas o reticuladas, influyendo fuertemente el tipo de cadena que tiene el polímero en las propiedades macroscópicas del mismo. En la Figura 1.2-1 se muestran dichas estructuras:

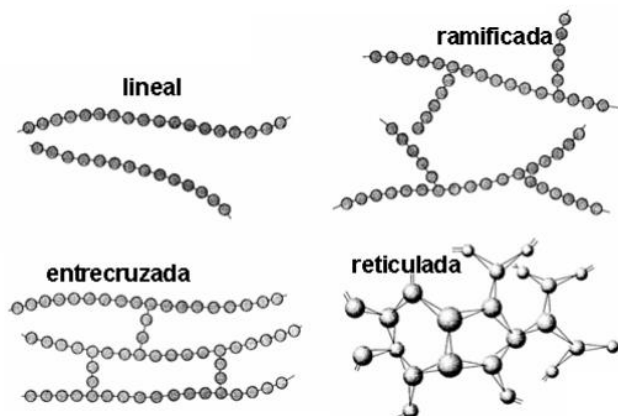


Figura 1.2- 1 Posibles estructuras de las cadenas poliméricas [21]

Esta definición engloba a un gran número de materiales, sin embargo, los polímeros son muy diferentes entre sí, presentando propiedades muy dispares según la estructura interna y la composición con la que cuentan. Gracias a ello, en la actualidad los polímeros están presentes prácticamente en todas las industrias, pudiéndose usar como materiales en construcción o en automoción, en la industria textil, en componentes electrónicos o como embalaje en la industria alimenticia, entre otros.

Generalmente, los polímeros son sustancias sintéticas, es decir, se fabrican a partir de sustancias naturales, aprovechando sus ventajas pero siendo capaces de suplir sus inconvenientes [3]. Las principales materias primas a partir de las cuales se sintetizan estos materiales son el petróleo, la celulosa, el carbón y el gas natural.

Los polímeros se clasifican según su estructura interna y su mecanismo de enlace. Ambos factores afectan a las propiedades que presentan y por tanto, a sus posibles aplicaciones. Existen tres grandes grupos de polímeros: termoplásticos, termoestables y elastómeros. En la Tabla 1.2-1 se muestran algunos ejemplos de cada tipo de polímero:

Tabla 1.2- 1 Clasificación de polímeros y ejemplos [3]

Termoplásticos		Termoestables	Elastómeros
Parcialmente cristalinos	Amorfos		
PP, PE, PA POM (polioximetileno)	PC, PS PMMA (polimetilmetacrilato) PVC (cloruro de polivinilo)	PF UP (poliéster insaturado) MF (melanina formaldehído) EP (epoxi)	PUR (poliuretano) BP (polibutadieno) BD (butadieno) EDPM (etileno propileno dieno monómero)

Los **polímeros termoplásticos** son aquellos que presentan cadenas de macromoléculas, lineales o ramificadas, que se encuentran unidas simplemente por fuerzas intermoleculares. Esto implica que al aplicar calor sobre estos materiales y aumentar su temperatura dichas fuerzas intermoleculares se reducen y es posible moldearlos.

Los termoplásticos son los polímeros más usados en la industria, ya que pueden presentar propiedades muy dispares que permiten cubrir múltiples aplicaciones. Se caracterizan por poder fundirse varias veces y ser solubles, o al menos capaces de hincharse. Según su estructura cristalina, se clasifican en dos grandes familias: termoplásticos amorfos y termoplásticos semicristalinos. En la Figura 1.2-2 se muestran representadas ambas estructuras:

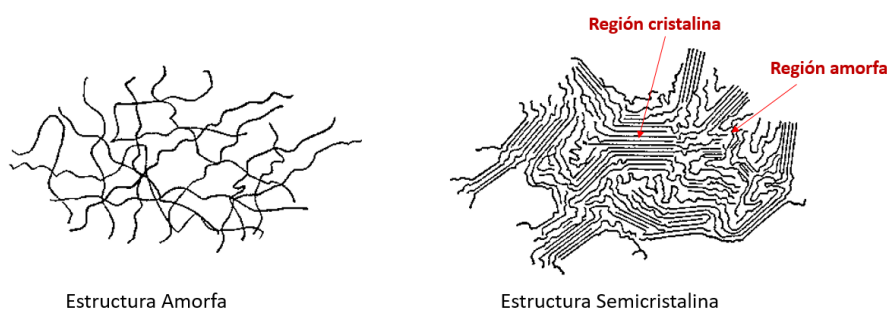


Figura 1.2- 2 Estructuras internas de polímeros termoplásticos [22]

Cada una de estas familias de termoplásticos se caracteriza por:

- Termoplásticos amorfos: Presentan una ordenación molecular similar a la del vidrio. Se trata de cadenas con un alto grado de ramificación, teniendo las cadenas laterales una gran longitud. Esto provoca que estas estén entrelazadas en todas direcciones, sin orden estructural y sin un empaquetamiento compacto. Son transparentes.
- Termoplásticos semicristalinos: Presentan ciertas regiones cuya ordenación molecular es similar a la de un cristal, pero nunca cuentan con la totalidad de la estructura cristalina. En este caso, se trata de macromoléculas con bajo grado de ramificación, es decir, cuentan con pocas cadenas laterales y de escasa longitud. Esto permite a las cadenas ordenarse y ubicarse de manera compacta en algunas zonas del material, denominadas regiones cristalinas. A pesar de ello, es inevitable la aparición de zonas en las que las cadenas no se encuentran ordenadas, denominadas regiones amorfas. Estos materiales presentan un aspecto translúcido, causado por la dispersión de la luz al pasar de una región a otra.

Por otro lado, existen los **polímeros reticulados**, que son aquellos en los que las cadenas de macromoléculas se unen entre sí creando una red, a partir de puentes entre los denominados puntos de entrecruzamiento. En este caso, las fuerzas de unión entre las cadenas son enlaces covalentes y fuerzas intermoleculares. Se clasifican en elastómeros y termoestables, en función de la intensidad de la reticulación y el número de puntos de entrecruzamiento:

- Elastómeros: Se trata de materiales con una estructura desordenada y un grado bajo de reticulación, es decir, sus macromoléculas están distribuidas sin orden y

con pocos entrecruzamientos. Son materiales que no son ni fundibles ni solubles, puesto que los enlaces covalentes requieren temperaturas muy elevadas para romperse, y una vez rotos no pueden volver a formarse. Sin embargo, sí son hinchables debido a los pocos puntos de entrecruzamiento con los que cuentan.

- **Termoestables:** Se trata de materiales con una estructura desordenada y un muy elevado grado de reticulación. Debido a este alto grado de reticulación y sus numerosos puntos de entrecruzamiento, son materiales de gran dureza, rigidez y fragilidad. Por el mismo motivo, son el tipo de polímeros que experimenta un menor reblandecimiento con la temperatura. Al igual que los elastómeros, no son fundibles y debido a su mayor grado de reticulación tampoco son hinchables.

1.2.1. Procesos de fabricación con materiales poliméricos:

Debido a la multitud de materiales poliméricos que existen y a las propiedades tan dispares que presentan entre sí, existen muchos métodos de fabricación y de transformación de los mismos. Es necesario buscar para cada tipo de polímero la forma de fabricación más adecuada en función de sus propiedades.

Los procesos de fabricación a partir de materiales poliméricos se dividen en cuatro grandes grupos:

- **Operaciones de moldeo:** En ellas se aumenta la temperatura del polímero para darle forma mientras este se encuentra fundido. En el caso de los termoplásticos el material se queda con la forma deseada cuando tiene lugar la solidificación y es posible volver a fundirlo para moldearlo de nuevo. Por otro lado, los termoestables y los elastómeros adquieren su forma definitiva cuando tiene lugar una reacción química denominada curado y no es posible volver a moldearlos una vez ha tenido lugar esta reacción, ya que al calentarse de nuevo se degradarían. Las principales operaciones de moldeo son la inyección, la extrusión, el prensado, el sinterizado, el calandrado y la colada.
- **Operaciones de termoconformado:** Son técnicas basadas en calentar el material hasta llevarlo a su estado termoplástico, para posteriormente aplicar presión o vacío sobre un molde.
- **Operaciones de mecanizado:** Son aquellas basadas en el arranque de material polimérico en forma de viruta. Entre ellas destacan el torneado, el fresado, el taladrado, el corte y el pulido.
- **Operaciones de fijación:** Son aquellas en las que se busca la unión de piezas distintas, ya sea mediante el empleo de uniones mecánicas, adhesivas o soldadas (exclusivamente aplicable a materiales termoplásticos). Algunos ejemplos son la soldadura, el pegado y el atornillado.

Por otro lado, un papel fundamental en la fabricación con materiales poliméricos lo juegan los aditivos. Estos son elementos que se añaden de forma controlada a los polímeros con el objetivo de modificar sus propiedades y suplir sus carencias. Entre los más destacados se encuentran:

- **Estabilizantes térmicos:** Buscan que el material sea capaz de soportar temperaturas más elevadas sin modificar otras de sus propiedades.
- **Plastificantes:** Se añaden con el objetivo de aumentar la flexibilidad del material.

- Refuerzos y fibras: Se añaden con el objetivo de aumentar el Módulo de Young del material, buscando convertirlo en un material más rígido.
- Antioxidantes: Buscan aumentar la resistencia que presenta el material a degradarse por reacciones de oxidación.
- Estabilizantes a la luz: Buscan aumentar la resistencia que presenta el material a degradarse por exposición a luz ultravioleta.

1.2.2. Proceso de inyección de polímeros:

El proceso de inyección es el método de fabricación de polímeros más importante y más usado en la industria de los plásticos, debido a su gran versatilidad y productividad, junto con su reducido coste para producción a gran escala. La inyección se puede aplicar tanto a materiales termoplásticos como termoestables y elastómeros, sin embargo, está especialmente indicada para polímeros termoplásticos.

Concretamente para la inyección de termoplásticos, las principales propiedades que hay que tener en cuenta son su temperatura de fusión (T_f), su viscosidad (μ), su temperatura de transición vítrea (T_g), en el caso de los termoplásticos amorfos, o su temperatura de cristalización (T_c), en el caso de los semicristalinos, y su temperatura de degradación (T_d).

La viscosidad es explicada en profundidad en el Apartado 1.2.2.1. El valor de esta afecta fundamentalmente a la resistencia que opone el polímero a fluir, de modo que valores altos de viscosidad implicarán la necesidad de aplicar presiones muy elevadas para inyectarlo.

En el proceso de inyección se lleva a los materiales a un estado termoplástico para que puedan fluir e introducirse en el molde cuya cavidad tiene la forma de la pieza deseada. Para alcanzar dicho estado es necesario superar la temperatura de fusión del material, pero sin alcanzar la temperatura de degradación, a partir de la cual se descompone. Cuando el material se encuentra en estado termoplástico, aumenta el movimiento relativo entre sus macromoléculas y se reducen las fuerzas intermoleculares que existen entre ellas. Esto provoca una disminución de la resistencia mecánica y de la viscosidad del material, así como un aumento de su elasticidad, permitiéndole fluir.

A modo de ejemplo, en la Figura 1.2.2-1 se muestran los intervalos de temperaturas en los que un polímero termoplástico amorfo como el PVC tiene un comportamiento u otro:

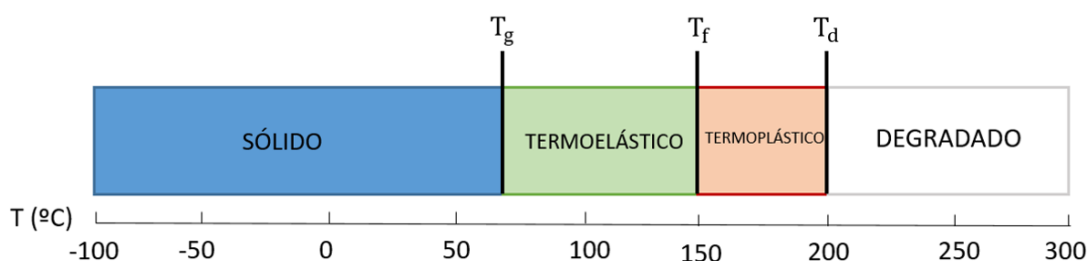


Figura 1.2.2- 1 Esquema de la variación del estado del PVC con la temperatura

Según cambia la temperatura y el material pasa de un estado a otro se modifican considerablemente sus propiedades, diferenciándose el comportamiento durante el enfriamiento de un termoplástico amorfo y uno semicristalino.

- En un polímero amorfo un aumento de la temperatura implica una mayor movilidad de sus cadenas poliméricas y por tanto una disminución de su viscosidad. Por lo tanto, durante su enfriamiento aumenta poco a poco su viscosidad. Al llegar a temperaturas inferiores a su temperatura de fusión pasa de un estado termoplástico a un estado termoelástico. Cuando se alcanza la temperatura de transición vítrea, el polímero experimenta un aumento en su viscosidad considerable y repentino, pasando de estado termoelástico a un estado sólido caracterizado por su rigidez.
- En un polímero semicristalino, de igual modo que en el amorfo, las disminuciones en la temperatura a la que se encuentra el material provocan aumentos en su viscosidad. En su caso, al pasar la temperatura de fusión durante el enfriamiento, se comienzan a crear núcleos cristalinos a partir de los cuales se desarrollarán las regiones cristalinas. Según la velocidad con la que se enfríe el material, estos núcleos crecerán en mayor o menor medida mientras disminuye la temperatura. Al llegar a la temperatura de cristalización tiene lugar una gran disminución del volumen específico del material, provocando una fuerte contracción al pasar directamente de estado termoplástico a ser un sólido cristalino en algunas regiones.

Cabe destacar la importancia de la velocidad de enfriamiento en las propiedades del polímero semicristalino. Cuanto más lento sea el enfriamiento del material durante su solidificación, mayor grado de cristalinidad se alcanzará en el polímero. Que se alcance un mayor grado de cristalinidad en el polímero implica que aumente su densidad y sus resistencias tanto mecánica como térmica.

1.2.2.1. Viscosidad de los polímeros:

La viscosidad es una propiedad física que se define como la resistencia que opone un material a fluir. Esta propiedad hace referencia a la fricción interna que existe entre las capas de un material y por tanto a la facilidad que tienen para deslizarse unas frente a otras [23]. Es un parámetro clave de los materiales usados en la inyección, puesto que estos deben tener la capacidad de fluir a través de un orificio estrecho aplicando una presión razonable que sea técnicamente realizable y rentable económicamente.

La viscosidad (η) es una propiedad que determina el comportamiento del material al ser inyectado y se define a partir de la tensión cortante aplicada sobre el material (τ) y la variación de velocidad de deformación que este experimenta ($\dot{\gamma}$). De forma general, la viscosidad se define siguiendo la Ley de Newton representada en la Ec. 3:

$$(Ec. 3) \quad \eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [24]$$

La viscosidad muestra una gran dependencia de otras magnitudes del polímero, experimentando gran variación con cambios de temperatura o de presión en el polímero. Cuanto mayor sea la temperatura a la que se encuentra el polímero, menor será la viscosidad del mismo, experimentando una disminución exponencial que se puede modelar mediante la ecuación de Arrhenius, mostrada en la Ec. 4. Esta ecuación permite

calcular la viscosidad (η) a partir de la temperatura absoluta del polímero (T) y parámetros constantes del material calculados empíricamente (A y B):

$$(Ec. 4) \quad \eta = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad [25]$$

Esto se debe a que al aumentar la temperatura se debilitan las fuerzas intermoleculares que unen las cadenas poliméricas, reduciendo la capacidad de sujetarse unas a otras y permitiendo al material fluir con más facilidad.

Asimismo, el tipo de polímero con el que se está trabajando afecta a la viscosidad. Como norma general, la viscosidad aumenta con el peso molecular del polímero, puesto que un mayor peso molecular implica una mayor longitud de las cadenas poliméricas y por tanto un mayor enmarañamiento de las mismas, que impide que el material fluya con facilidad. Esto se puede observar en la Figura 1.2.2.1-1, que muestra la variación de la viscosidad de distintos polímeros con la temperatura, donde se puede apreciar que aquellos polímeros con mayor peso molecular presentan una mayor viscosidad:

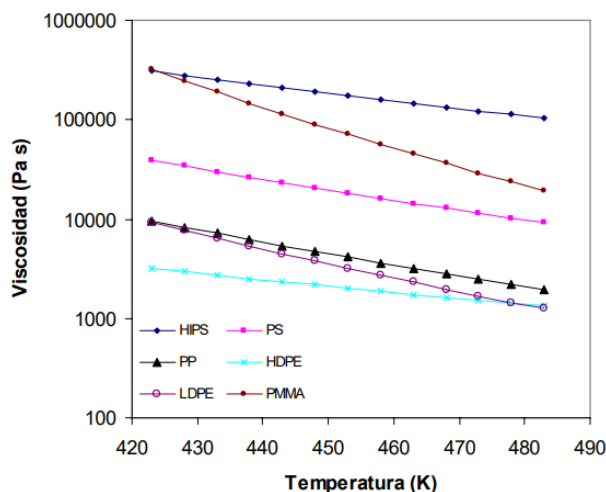


Figura 1.2.2.1- 1 Variación de la viscosidad de distintos polímeros con la temperatura [25]

Aunque en menor medida, la viscosidad también experimenta variación con la presión. Cuando se aplica presión sobre un polímero, este se comprime, disminuyendo el volumen libre existente entre las cadenas poliméricas. Esto provoca un mayor enmarañamiento de las mismas y una mayor dificultad para fluir [25]. Por tanto, aumentos en la presión dan lugar a aumentos en la viscosidad de los polímeros. Esta variación de la viscosidad en función de la presión y la temperatura se puede observar en la Ec. 5, donde Γ es un parámetro dependiente del polímero a usar y de la temperatura:

$$(Ec. 5) \quad \eta = f(T) \cdot e^{P \cdot \Gamma(T)} \quad [25]$$

1.2.2.2. Polímeros apropiados para la inyección:

Para que un polímero sea apto para usarse en procesos de inyección, debe tener unas determinadas propiedades para que su uso sea rentable y realizable, tanto técnicamente como económicamente.

En primer lugar, debe tener una temperatura de fusión que se pueda alcanzar con cierta facilidad para llevar al material a su estado termoplástico. Para tener un orden de

magnitud, los polímeros más usados en procesos de inyección tienen las temperaturas de fusión que se muestran a continuación:

- PE: 120°C – 180°C.
- PP: 160°C – 200°C.
- PS: 180°C – 240°C.
- ABS: 200°C- 250°C.

A su vez, en el interior de la máquina de inyección el polímero se encuentra a temperaturas superiores a su temperatura de fusión, por lo que también se debe tener en cuenta que su temperatura de descomposición, a partir de la cual se degrada el material, sea suficientemente alta como para que nunca se alcance. De manera aproximada, las temperaturas de degradación de los materiales más usados en la industria de la inyección son:

- PE: 300°C.
- PP: 300°C.
- PS: 250°C.
- ABS: 280°C.

En lo relativo a la estructura interna del polímero, aquellos que son semicristalinos presentan la ventaja de solidificarse con una mayor velocidad, mientras que los que son amorfos tienen como ventaja que experimentan una menor contracción en el enfriamiento.

A pesar de todo ello, el parámetro fundamental que determina si un polímero es idóneo para ser inyectado es su viscosidad. Para el proceso de inyección interesa emplear polímeros con viscosidades bajas a la temperatura a la que van a ser inyectados, con el objetivo de que estos tengan facilidad para fluir sin necesidad de alcanzar temperaturas excesivamente altas, todo ello con la meta de que no sea necesario el uso de máquinas muy grandes que apliquen presiones muy elevadas.

Teniendo todo ello en cuenta, en la industria actual, el polímero más usado en inyección es el polipropileno, que se emplea para fabricar en torno al 38% de las piezas inyectadas a nivel mundial. Le siguen el polietileno con un 15% y el poliestireno con un 8% [2].

Los sectores más importantes a día de hoy para la industria de la inyección son el sector de la automoción y el sector electrónico. En automoción se emplea principalmente polipropileno para piezas no críticas, PVC para piezas que deban tener buena resistencia para encontrarse a la intemperie y ABS para piezas que deban tener buena resistencia al impacto, mientras que en el sector de la electrónica se emplean principalmente poliestireno y ABS para la fabricación de carcasas [2].

1.2.3. Polipropileno:

El polipropileno es el material a emplear en este proyecto. Es un polímero termoplástico semicristalino que presenta una estructura lineal de su cadena polimérica. Se trata de un material sintetizado mediante la reacción de polimerización del propileno, un gas contenido en el crudo de petróleo [26]. En la Figura 1.2.3-1 se puede ver representada dicha reacción:

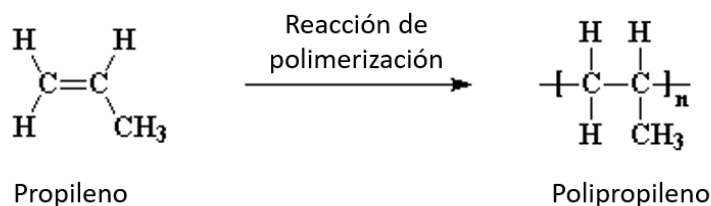


Figura 1.2.3- 1 Reacción de polimerización del polipropileno [27]

Como ya se ha mencionado en los apartados anteriores, el polipropileno es el polímero más usado en la industria de la inyección, pero además, a día de hoy es el segundo más usado a nivel global. Se trata de un material muy versátil empleado en industrias distintas. Por ejemplo, se usa en la fabricación de envases y embalajes, en la industria médica, como componente de automóviles o de equipos electrónicos, así como dando lugar a fibras para la industria textil [28].

Entre sus principales ventajas se encuentran una gran resistencia a la fatiga y al impacto. También cuenta con una muy pequeña absorción de humedad, lo que evita tener que secarlo antes de procesarlo. Asimismo, cuenta con una densidad baja, dando lugar a que las piezas fabricadas sean ligeras. Otra característica fundamental del polipropileno es que funciona como aislante eléctrico y cuenta con un punto de fusión alto, siendo ambos factores que fomentan su uso en el sector electrónico. Desde el punto de vista económico, tiene un coste bastante bajo. Otra ventaja competitiva con la que cuenta es su reciclabilidad, ya que es posible volver a fundirlo sin degradarlo y darle una nueva forma.

En la Tabla 1.2.3-1 se recoge el valor de las principales propiedades de este material:

Tabla 1.2.3- 1 Propiedades térmicas y mecánicas del polipropileno [29]

Temperatura de fusión (°C)	150 – 170
Temperatura de cristalización (°C)	-25 – -10
Conductividad térmica (W/mK)	0,1 – 0,2
Densidad (g/cm ³)	0,89 – 0,91
Módulo Elástico (GPa)	0,89 – 1,55
Resistencia mecánica a tracción (MPa)	28 – 42

1.3. DEFECTOS EN PIEZAS FABRICADAS POR INYECCIÓN:

En los procesos de inyección es muy común que muchas de las piezas fabricadas no cumplan con las especificaciones de su diseño debido a la aparición de defectos. Estos defectos modifican las propiedades de la pieza fabricada, provocando que no alcancen la calidad exigida y en muchas ocasiones que no sean capaces de cumplir la función para la que fueron diseñadas.

Uno de los mayores retos en el sector de la inyección de polímeros es minimizar la aparición de estos defectos, buscando optimizar el proceso, siendo capaces de reducir considerablemente los tiempos y costes derivados de volver a fabricar las piezas defectuosas, junto con los derivados de las pruebas y ensayos para encontrar las condiciones óptimas de fabricación.

Estos defectos pueden ocurrir por múltiples motivos: aquellos relacionados con el estado del material empleado en la inyección, con las condiciones operativas del proceso, como temperaturas, presiones o tiempos de enfriamiento aplicados, así como con errores en el diseño de la pieza o del molde.

En los siguientes apartados se describen los principales defectos, explicando los problemas que acarrearán, sus posibles causas y las medidas que se pueden tomar para minimizar su aparición.

1.3.1. Falta de llenado:

La falta de llenado o llenado incompleto es un defecto que se caracteriza porque el material inyectado no ha sido capaz de rellenar toda la cavidad del molde y por tanto la pieza obtenida no cuenta con la geometría deseada. En muchas ocasiones, ni siquiera es posible obtener una pieza única, puesto que el flujo que ha entrado al molde por distintos canales de alimentación no llega a unirse.

Se debe a un enfriamiento prematuro del material antes de que el mismo llene por completo la cavidad del molde. Existen numerosos factores que favorecen a este enfriamiento, cuya consecuencia es un aumento en la resistencia del material a fluir, entre los que se encuentran temperaturas bajas y obstáculos físicos.

En la Figura 1.3.1-1 se pueden observar numerosos ensayos en los que ha ocurrido un llenado incompleto de una pieza fabricada mediante inyección, como es la carcasa de un teléfono fijo. Se puede observar que los puntos de inyección se encuentran en la parte superior e inferior de la pieza y que el flujo no llega a unirse:



Figura 1.3.1- 1 Piezas inyectadas que presentan un defecto de falta de llenado [30]

Entre las principales causas que provocan la aparición de este defecto se encuentran:

- Falta de fluidez del material, al no alcanzar la temperatura necesaria o ser un polímero demasiado viscoso para emplearlo en procesos de inyección.
- Presión de inyección aplicada demasiado baja como para introducir el material fluido en el molde con facilidad.
- Cálculo erróneo del volumen de material a inyectar. Si se inyecta menos cantidad de material que la necesaria, este no será suficiente para llenar la cavidad del molde. Sin embargo, si se trata de inyectar más cantidad de la necesaria, esto derivará en problemas de fluidez que impedirán el correcto llenado del molde.
- Canales de alimentación demasiado estrechos que impiden el correcto flujo de material.
- Secciones demasiado estrechas de la pieza que se solidifican demasiado pronto e impiden al flujo de material seguir avanzando.

- Temperatura del molde demasiado baja, que provocará el enfriamiento prematuro del material, que conlleva la pérdida de fluidez y la solidificación del mismo antes de llenar toda la cavidad del molde.

Las medidas que se pueden tomar para minimizar la aparición de este defecto y evitar que tenga lugar un llenado incompleto son:

- Elevar la temperatura de la masa fundida o del molde para favorecer la capacidad de fluir del polímero.
- Subir la presión con la que se inyecta el material para que presente menos problemas de cara a introducirse en el molde.
- Agregar algún aditivo al polímero que aumente su fluidez o emplear un lubricante.
- Aumentar el tamaño del canal de alimentación y darle forma cilíndrica.
- Emplear un polímero que tenga una menor viscosidad.

1.3.2. Rebabas:

Las rebabas son defectos que aparecen cuando parte del material polimérico que se ha inyectado escapa de la cavidad del molde y es capaz de introducirse y solidificarse en los resquicios del mismo. Esto ocurre principalmente cuando el polímero se encuentra en un estado demasiado fluido. En la Figura 1.3.2-1 se pueden observar las rebabas surgidas en una pieza moldeada por inyección, en la que el material ha sido capaz de introducirse entre las dos mitades del molde:



Figura 1.3.2- 1 Rebabas en una pieza fabricada mediante inyección [31]

Las principales causas que provocan la aparición de rebabas son:

- Exceso de temperatura del material a inyectar, que provoca que tenga una fluidez demasiado elevada y pueda meterse entre la unión de las placas del molde.
- Elección de una presión de inyección demasiado alta.
- Empleo de un polímero cuya viscosidad sea excesivamente baja y fluya demasiado.
- Error al cerrar el molde debido a la aplicación de baja fuerza de cierre, por defectos en las superficies de ambas mitades del molde que hacen que la unión no sea estanca o por deformaciones del molde debido a la aplicación de fuerzas excesivamente altas.

Las medidas a tomar para mitigar la aparición de rebabas son:

- Emplear una temperatura de inyección y del molde más baja para disminuir la fluidez del polímero.
- Disminuir el diámetro del canal de alimentación del molde.
- Disminuir la presión con la que se ejecuta la inyección.
- Usar un polímero que tenga una viscosidad mayor.
- Mecanizar de nuevo las superficies de unión del molde para asegurar una unión perfecta y estanca.
- Ejercer una fuerza de cierre suficientemente elevada como para soportar la presión que se transmitirá a través del polímero.

1.3.3. Rechupes:

Los rechupes se definen como defectos en los que tiene lugar un hundimiento o depresión en las superficies de la pieza [32]. En general, ocurren en las secciones más gruesas en las que la parte interior de la pieza tarda más en solidificar, hundiéndose a la parte exterior de la sección al contraerse durante su solidificación.

En la Figura 1.3.3-1 se pueden apreciar los rechupes en una superficie que debería ser plana de una pieza fabricada mediante un proceso de inyección:



Figura 1.3.3- 1 Pieza inyectada con rechupes en una de sus superficies [33]

Los principales motivos que dan lugar a rechupes en las piezas son:

- Falta de compactación del polímero debido al uso de canales de inyección demasiado estrechos.
- Contracción del material debida a, entre otras, un escaso tiempo de mantenimiento o una aplicación de una presión de mantenimiento demasiado baja, ambas dando lugar a que no se alimente durante el mantenimiento a la pieza con el material necesario para compensar la contracción que experimenta el polímero al solidificarse.
- Cálculo erróneo del tiempo de enfriamiento necesario y desmoldeo de la pieza antes de que esta se encuentre solidificada por completo.

Para evitar que aparezcan rechupes en las piezas fabricadas se pueden tomar las siguientes medidas:

- Mejorar el diseño de la pieza a fabricar evitando que existan grandes diferencias de espesor en las distintas secciones de la misma.
- Mejorar el diseño del molde, aumentando el grosor de los canales de inyección y ubicando los puntos de inyección en las paredes de mayor espesor, favoreciendo así la compactación en esas zonas [32].
- Mejorar la calidad de la etapa de mantenimiento, aumentando el tiempo de mantenimiento, la presión de mantenimiento o el material aportado en esta etapa.
- Reducir la temperatura del material o del molde, provocando un enfriamiento más lento y homogéneo que reducirá la contracción que experimentará la pieza.

1.3.4. Burbujas de aire retenido:

Las burbujas son un defecto en el que un gas, como el aire, no es capaz de salir por los canales de ventilación del molde y queda atrapado en el interior del flujo del polímero. Cuando el material se solidifica, este aire queda en el interior de la pieza en forma de burbuja, dejando dicha zona sin material. En la Figura 1.3.4-1 se puede observar una pieza inyectada con numerosas burbujas de aire atrapado:



Figura 1.3.4- 1 Pieza fabricada por inyección con burbujas de aire retenido [34]

La aparición de burbujas de aire retenido en piezas fabricadas mediante inyección tiene como principales causas:

- Alta humedad en el material a inyectar, si no se ha llevado a cabo un secado correcto en aquellos materiales que lo requieren.
- Uso excesivo de lubricante para facilitar el desmoldeo o la fluidez.
- Aire atrapado en el interior de la pieza debido una mala ventilación, a una inyección demasiado rápida o a la contracción de la pieza.

Para minimizar las burbujas de aire retenido se deben llevar a cabo las siguientes acciones:

- Mejorar y optimizar la ventilación mediante el uso de respiraderos.
- Reducir la velocidad con la que se inyecta el material.
- Realizar un correcto secado del material antes de que tenga lugar el proceso, para evitar que tenga humedad en el momento de inyectar.

- Llevar a cabo acciones que minimicen la contracción de la pieza, tales como elevar la temperatura de inyección o del molde, aumentar la presión de inyección o realizar un mayor mantenimiento, mediante un mayor tiempo de mantenimiento y una mayor presión de mantenimiento.
- Reducir la velocidad de rotación del husillo [34].

1.3.5. Contracción:

La contracción de las piezas fabricadas por procesos de inyección de polímeros es la reducción que experimentan en volumen las piezas durante la solidificación, dando lugar a que la pieza obtenida no tenga las mismas dimensiones que la cavidad del molde donde ha sido inyectada. Se trata de un proceso que es inevitable, pero que debe controlarse para que las piezas fabricadas cumplan con las especificaciones geométricas de su diseño, minimizando su magnitud e intentando que esta contracción ocurra de forma uniforme en todas las partes de la pieza, para evitar la aparición de tensiones residuales.

El motivo fundamental por el que tiene lugar la contracción de las piezas es que los polímeros presentan distinta densidad en estado fundido a altas temperatura y en estado sólido a temperatura ambiente [32]. Esto hace que durante el enfriamiento se dé una disminución del volumen específico de la pieza según esta se va solidificando.

Los principales motivos que dan lugar a contracción en las piezas inyectadas son:

- Tiempo de enfriamiento excesivo que favorece la formación de regiones cristalinas en la pieza. Cuanto mayores sean las regiones cristalinas de un polímero, mayor será la contracción que este experimenta.
- Etapa de mantenimiento demasiado corta o ejecutada con una presión insuficiente, puesto que entre los objetivos de esta fase se encuentran rebajar las tensiones residuales que aparecen en la pieza durante su enfriamiento y que provocan la contracción de la misma.
- Falta de fluidez en el material, debido a que este se inyecta con una temperatura demasiado baja. De esta forma el material se encuentra en un estado demasiado viscoso para que tenga lugar un llenado óptimo y uniforme del molde.

Entre las principales medidas a tomar para reducir la contracción que sufren las piezas destacan:

- Mejorar la fase de mantenimiento para reducir las tensiones residuales que aparecen y que provocan las contracciones. Para ello será necesario aumentar el tiempo de mantenimiento y la presión de mantenimiento.
- Elevar la temperatura a la que se inyecta el material, optimizado su valor para, por un lado, que sea suficientemente alta como para reducir la viscosidad del polímero con el objetivo de que fluya y llene la cavidad del molde sin problemas, pero por otro lado, no tan elevada como para dar lugar a un tiempo de enfriamiento muy grande que favorece a la contracción de la pieza.

1.3.6. Alabeo:

El alabeo es un defecto que deforma las piezas inyectadas curvando algunas de sus superficies. Tiene su origen en tensiones residuales que han aparecido en el interior de la pieza debido a una contracción no uniforme de las distintas zonas de la misma durante el enfriamiento [32]. Una distribución de contracciones no simétrica se debe a que el enfriamiento no ha tenido lugar de forma simétrica, porque no todas las superficies se encuentran a la misma temperatura, ya sea por un diseño erróneo de la pieza, de la ubicación de los puntos de inyección o del sistema de refrigeración. En la Figura 1.3.6-1 se observa una pieza que debería ser plana pero que ha sufrido alabeo y está curvada:



Figura 1.3.6- 1 Pieza inyectada que se ha alabeado durante su enfriamiento [35]

Las principales causas que provocan el alabeo en las piezas fabricadas mediante procesos de inyección son:

- Aparición de gradientes térmicos en el material fundido en el interior de la cavidad del molde debido a:
 - Diferencia de espesores muy notable entre las distintas partes de la pieza, que dan lugar a que unas zonas se enfríen mucho más rápido que otras.
 - Condiciones de enfriamiento no simétricas en la pieza, por una mala evacuación del calor en algunas zonas del molde.
 - Contraste de temperaturas muy elevado entre un material muy caliente y un molde muy frío, debido al uso de una temperatura de inyección excesivamente alta o a un molde que no se calienta lo suficiente.

Las medidas a tomar para reducir la aparición de este defecto y evitar que aparezca alabeo en las piezas son:

- Mejorar el diseño de la pieza para evitar una gran diferencia de secciones en sus diferentes zonas.
- Mejorar el diseño del molde para lograr un enfriamiento más efectivo y uniforme en todas las zonas de la pieza.
- Elevar la presión y el tiempo de mantenimiento para reducir las contracciones que experimenta el material, que cuando son asimétricas dan lugar a alabeo.

1.3.7. Líneas de soldadura:

La línea de soldadura es un defecto que aparece en la zona de unión de dos flujos de polímero que se encuentran frontalmente [32]. Es una zona que se caracteriza por una falta de homogeneidad en la estructura interna de la pieza, especialmente cuando los flujos se han unido cuando la temperatura del material ya se ha reducido considerablemente.

Como consecuencia de la falta de homogeneidad en esta zona, la línea de soldadura es un defecto que afecta en gran medida a las propiedades mecánicas de la pieza a fabricar, siendo la zona que soporta menores esfuerzos y por donde presumiblemente la pieza romperá cuando esté sometida a fuerzas externas. Por lo tanto, se deben diseñar los puntos de inyección para que la línea de soldadura no aparezca en las zonas que van a tener mayores sollicitaciones mecánicas. En la Figura 1.3.7-1 se muestra una pieza con una línea de soldadura visible:

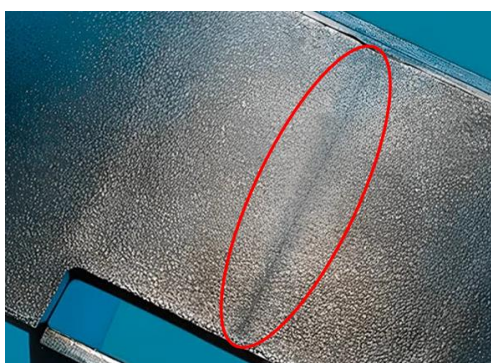


Figura 1.3.7- 1 Línea de soldadura en una pieza fabricada por inyección [35]

Entre las principales causas que dan lugar a la aparición de líneas de soldadura se encuentran:

- Falta de fluidez del material debido al uso de una temperatura de inyección demasiado baja.
- Reducida temperatura del molde que provoca la solidificación prematura del material antes de que se encuentren los flujos introducidos por distintos canales de alimentación.
- Presión de inyección empleada muy baja que hace que no se unan los flujos de material en la cavidad del molde en las mejores condiciones.
- Gran distancia entre los puntos por los que entra el flujo de material a la cavidad del molde y la zona en la que dichos flujos se deben unir.

Entre las acciones que se pueden aplicar para reducir las probabilidades de aparición de este defecto se encuentran:

- Conseguir reducir la fluidez del material mediante un incremento en su temperatura.
- Calentar el molde para evitar un enfriamiento prematuro del material inyectado.
- Elevar la presión con la que se inyecta el material.
- Mejorar el diseño del molde y de los canales de alimentación buscando minimizar la distancia que debe recorrer el flujo de material.

2. ANTECEDENTES:

El presente proyecto busca contribuir a la optimización de los procesos de inyección de polímeros mediante el análisis de los defectos que aparecen en las piezas durante su fabricación. Se busca relacionar la aparición de dichos defectos con el valor que toman los parámetros del proceso, identificando qué variables son más influyentes y qué valores de las mismas favorecen a la aparición de defectos.

En lo relativo a estudios desarrollados recientemente en esta línea de investigación, los más relevantes para este proyecto que pueden resultar de utilidad para el desarrollo del mismo son:

- Otieno, S.O., Wambua, J.M., Mwema, F.M. et al. (2024). *A predictive modelling strategy for warpage and shrinkage defects in plastic injection molding using fuzzy logic and pattern search optimization* [36].

En este caso, el trabajo desarrollado está centrado en el análisis del alabeo y la contracción de las piezas, ambos defectos en los que un enfriamiento correcto del material es clave para minimizarlos. En este proyecto se desarrolla un modelo predictivo en el que se determinan los valores de todos los parámetros de inyección que reducen los defectos mencionados.

- Vanek, J., Ovsik, M., Stanek, M., Hanzlik, J., Pata, V. (2024). *Study of Injection Molding Process to Improve Geometrical Quality of Thick-Walled Polycarbonate Optical Lenses by Reducing Sink Marks* [37].

Este trabajo también está centrado en la optimización de los parámetros de inyección para la minimización de defectos, pero en este caso particularizando el estudio para piezas de policarbonato con un espesor muy pequeño. Se determina que los defectos disminuyen al reducir la temperatura con la que se inyecta el material y aumentando la temperatura a la que se encuentra el molde, reduciendo el choque térmico que experimenta el polímero.

- Mourya, A., Nanda, A., Parashar, K., Sushant, N., Kumar, R. (2022). *An explanatory study on defects in plastic molding parts caused by machine parameters in injection molding process* [38].

En este caso se estudia la influencia de la geometría, del material utilizado y de las variables de la máquina de inyección en la aparición de defectos en las piezas moldeadas. Este estudio determina como variables considerablemente más influyentes la temperatura de inyección, la presión de inyección y el tiempo de ciclo, dando lugar con su variación a importantes cambios en burbujas de aire retenido, rechupes y líneas de soldadura.

- Coca-González, M., Jiménez, M. (2024). *Warpage: Causes, manufacturing processes and future challenges: A review* [39].

Este estudio se centra en el análisis en profundidad del alabeo experimentado por piezas inyectadas. Determina que las principales causas por las que aparece este defecto son tensiones residuales derivadas de fuertes variaciones térmicas, condiciones desiguales en el enfriamiento o presencia de humedad.

- Hatta N., Zain, A., Sallehuddin R., Rahim S. (2018). *Overview of the Injection Moulding Optimisation for Shrinkage Defect* [40].

En este trabajo se busca minimizar la aparición de defectos en piezas de plástico fabricadas por inyección mediante el uso de simulación. En el estudio se concluye que no siempre se obtienen resultados fiables al simular el proceso, pero que aquellos defectos en los que se observa una mayor relación con lo que ocurre en la fabricación real son los relativos a la contracción de las piezas.

- Onyiego, J., Wakiru, J. (2024). *A simulation-based optimization evaluating process and feed system effect in plastic injection molding* [41].

En este caso se busca estudiar la influencia del mayor número de parámetros de inyección posibles en la falta de llenado de la cavidad del molde y en la formación de rechupes. Para ello, se ha empleado la simulación del proceso y se ha determinado que para la falta de llenado los parámetros más relevantes resultan la temperatura de la masa fundida, la presión de inyección y la forma del canal de alimentación, mientras que para los rechupes toman gran importancia el tiempo de inyección y la forma del punto de inyección y de los canales de alimentación.

- Zhang, L., Zhao G., Dong, G., Li, S., Wang, G. (2015). *Bubble morphological evolution and surface defect formation mechanism in the microcellular foam injection molding process* [42].

Este trabajo está centrado exclusivamente en el proceso de nucleación y crecimiento de burbujas de aire en piezas fabricadas por inyección. En el estudio se determinó que de cara a la aparición de burbujas toman gran importancia las temperaturas de la masa fundida y del molde, así como la velocidad de inyección.

Asimismo, cabe destacar que este proyecto es la continuación de un trabajo previo desarrollado por Silvia Buitrago Galindo en el año 2023 en su Trabajo de Fin de Grado, denominado *Caracterización y eliminación de defectos en piezas de plástico para optimizar el proceso de inyección*. Las principales conclusiones obtenidas en este trabajo están relacionadas con la contracción de las piezas. En dichas conclusiones, se determinó que esta contracción es muy superior en la dirección del flujo y disminuye con la temperatura de inyección. Por otro lado, se identificó que un incremento en la presión de inyección aumenta la contracción en la dirección del flujo y la disminuye en las secciones con orificios, teniendo apenas influencia en dicha contracción las condiciones de mantenimiento.

Este estudio desarrollado anteriormente estuvo muy centrado en el análisis de la contracción de las piezas, mientras que el actual busca un análisis más global de todos los defectos. El presente proyecto prosigue con la línea de investigación del anterior, diferenciándose en la geometría que se va fabricar en el proceso de inyección. De esta manera, será posible realizar un nuevo análisis de defectos en la geometría modificada. Además, se podrán comparar los resultados obtenidos en ambos proyectos, con el fin de determinar la influencia de la geometría de la pieza en la aparición de defectos.

A su vez, este proyecto incorpora el estudio de nuevos defectos que no fueron evaluados y cuantificados anteriormente, como son las burbujas de aire retenido en las piezas. Adicionalmente, se va a analizar la influencia que tiene en la aparición de defectos la existencia de una imperfección en la superficie del molde, estudiando las condiciones de fabricación que maximizan y minimizan su efecto.

Otra de las novedades de este proyecto es el cálculo optimizado de parámetros del proceso, como el tiempo de enfriamiento, ya que en el trabajo previo se determinó que se empleaba un tiempo excesivamente largo que incentivaba las contracciones de la pieza.

Por último, es importante destacar que este trabajo forma parte de un proyecto más grande de investigación de tesis doctoral. Se busca contribuir mediante la toma de los datos que embeberán un modelo de inteligencia artificial en el que se quieren predecir los defectos de inyección con las variables del proceso de manera automática.

3. OBJETIVOS:

El proceso de inyección de polímeros es uno de los métodos de fabricación más utilizados en la industria, por lo que es una tarea fundamental lograr que funcione de forma óptima. De manera inevitable, en muchas de las piezas fabricadas aparecen defectos, entre los que destacan la contracción de las piezas, el alabeo de las mismas, la aparición de rebabas, de rechupes o de burbujas de aire retenido. Sin embargo, se trata de un proceso muy complejo en el que intervienen muchas variables relacionadas entre sí, como la temperatura y presión de inyección, el tiempo y la presión de mantenimiento, el tiempo de enfriamiento o la velocidad de inyección, entre otras. Por lo tanto, en muchas ocasiones no es posible identificar cuál de estas variables es la causante del defecto y cómo modificarlas para evitar su aparición.

Por ello, el objetivo principal de este proyecto es estudiar la influencia de los parámetros de inyección en la aparición de los distintos defectos, identificando qué valores de cada parámetro provocan mayor cantidad de piezas defectuosas, para cada tipo de defecto, así como estudiar cuáles son las variables de inyección más y menos influyentes para cada tipo de defecto.

Desde un punto de vista más amplio, conseguir recabar toda esta información permitirá identificar condiciones óptimas de fabricación que minimicen la aparición de defectos, permitiendo saber qué variables modificar si se necesita limitar la aparición de un tipo de defecto concreto, provocando que la industria ahorre muchos tiempos y costes derivados de realizar ensayos variando los diferentes parámetros de inyección. Además, se minimiza el número de residuos generados, buscando la viabilidad medioambiental que tanto preocupa actualmente a la industria del sector.

3.1. FINALIDAD DEL PROYECTO:

Este proyecto busca analizar la influencia de los parámetros de inyección en la aparición de defectos en una pieza de plástico producida mediante inyección.

La geometría escogida es una biela que presenta un cajeado en su base. Con ello, no solo se busca estudiar una pieza que tenga aplicación en la industria, sino también emplear una geometría que favorezca la aparición de defectos con elementos como cilindros, vaciados cilíndricos y diferencias notables de espesor entre unas zonas de la pieza y otras. Asimismo, modelos similares han sido empleados en proyectos previos, lo que permite la comparación de los resultados al hacer pequeños cambios en la geometría de la biela y ver la influencia de dichas variaciones. En la Figura 3.1-1 se muestra la geometría a emplear en el proyecto:



Figura 3.1- 1 Geometría a fabricar en el proyecto

En lo relativo al material a utilizar, se ha decidido emplear polipropileno, ya que es con amplia diferencia el polímero más utilizado para fabricar piezas por inyección, permitiendo así que las conclusiones que se saquen del proyecto sean válidas para un mayor número de industrias.

Los defectos a evaluar son aquellos que aparecen con mayor frecuencia en la producción de las piezas y que en muchas ocasiones provocan que sean descartadas al no cumplir las especificaciones de diseño. Estos defectos son falta de llenado, burbujas de aire retenido, rebabas, rechupes, contracción, alabeo y torsión.

3.2. ALCANCE DEL PROYECTO:

Toda la actividad presencial de este proyecto ha sido llevada a cabo en el Laboratorio de Fabricación de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), del que se muestra un plano general en la Figura 3.2-1, ya que era necesario el uso de maquinaria de este laboratorio, como la máquina de inyección o la máquina de coordenadas, así como de equipos de medida y toma de datos, como la cámara termográfica o el sensor láser.



Figura 3.2- 1 Laboratorio de Fabricación de la ETSII-UPM

Las actividades del proyecto que requieren presencialidad son la fabricación de las piezas, la medida de la temperatura del molde y la medición de los defectos con equipos como la máquina de coordenadas, el sensor láser o el micrómetro. Mientras que de forma no presencial se pueden llevar a cabo las simulaciones del proceso de inyección, la medida de defectos con un software de procesamiento de imágenes, el análisis de los resultados obtenidos en las mediciones y la redacción de la memoria.

Los principales objetivos de este trabajo son:

- Identificación de las variables del proceso de inyección más relevantes de cara a la aparición de defectos.
- Establecer la relación entre los parámetros de inyección y los defectos de las piezas resultantes.
- Análisis de la influencia que tienen las variaciones en la geometría de la pieza en la aparición de defectos, así como cuáles de ellos son los más afectados.
- Estudio de la influencia de una irregularidad en el molde en los defectos de piezas.
- Determinación de los parámetros que más afectan a cada defecto y qué valores deben tomar para minimizar la aparición de los mismos.

4. METODOLOGÍA:

En este apartado se explican las técnicas, equipos y ensayos que se han empleado durante el desarrollo del presente proyecto.

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL EMPLEADO:

En primer lugar, para comenzar el proyecto se debe elegir con qué polímero se va a trabajar, particularizando a este material el estudio de la aparición de defectos en las piezas. El material escogido fue el **polipropileno**, un polímero termoplástico parcialmente cristalino perteneciente a la familia de las poliolefinas.

Entre las ventajas con las que cuenta el polipropileno se encuentra una elevada reciclabilidad. Este fue un punto clave para su elección, ya que permitirá el triturado de las piezas una vez han sido estudiadas, para la obtención de nuevos *pellets*, a partir de los que realizar nuevas inyecciones. Otro motivo por el que se escogió el polipropileno fue la necesidad de emplear un material utilizado en la industria real, para que las conclusiones obtenidas en el estudio fueran aplicables en el sector de la inyección.

Sin embargo, dentro de la familia del polipropileno hay un gran número de plásticos comerciales diferentes con propiedades dispares a pesar de tener la misma estructura química. Por ello, es necesario caracterizar el material concreto con el que se van a realizar las inyecciones, con el objetivo de tener una mayor información del mismo y poder establecer unas condiciones de inyección adecuadas al polímero.

Para este proyecto, el material empleado ha sido el polipropileno homopolímero *ECOLEN*® *HZ40S*, de la compañía *Hellenic Petroleum S.A.* La ficha técnica de este material está recogida en el Anexo 1. De ella, se puede obtener la siguiente información: el material tiene una densidad de 0,902 kg/m³ en estado sólido, un índice de fluidez de 25 g/10 min (a 230°C). Asimismo, cuenta con un límite elástico a tracción de 32 MPa, una elongación del 13% y un módulo a flexión de 1500 MPa.

Sin embargo, con el fin de realizar una amplia matriz de ensayos, se lleva a cabo una evaluación térmica completa del material. Esta consta de un ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC, de sus siglas en inglés: *Differential Scanning Calorimetry*), un ensayo de termogravimetría (TGA, de sus siglas en inglés: *Thermogravimetric Analysis*) y un ensayo de fluidez.

4.1.1. Ensayo de calorimetría diferencial de barrido:

La calorimetría diferencial de barrido es una técnica empleada para determinar la temperatura de fusión y la temperatura de cristalización de un polímero termoplástico semicristalino. Asimismo, aporta información que permite el cálculo del grado de cristalinidad que presenta el material.

En este proyecto, se emplea para conocer la temperatura mínima de inyección, que debe corresponder con la temperatura de fusión, la temperatura de expulsión de la pieza, con el fin de calcular el tiempo de enfriamiento según la Ec. 1, que se debe corresponder con

la temperatura de cristalización y el grado de fase ordenada para conocer el efecto de la contracción en este polímero.

Este método se basa en la medición diferencial del flujo de calor entre un estado de referencia y el estado del material, durante el calentamiento y el enfriamiento del mismo. La temperatura de fusión del material se obtiene en el punto en el que se da el máximo flujo de calor durante el calentamiento, pico que tomará un valor positivo al ser un proceso endotérmico y realizarse el estudio desde el punto de vista del material. Por otro lado, la temperatura de cristalización es que aquella en la que el valor absoluto del flujo de calor durante el enfriamiento toma su valor máximo, siendo este pico negativo al tratarse de un proceso exotérmico.

Este equipo permite también obtener la variación de entalpía (ΔH_c) que tiene lugar durante el calentamiento, obtenido como el área bajo la curva del máximo cuyo pico es la temperatura de fusión del material. Este dato permite hallar la cristalinidad (X_c) del polímero, comparándolo con el valor de la entalpía teórica si fuera 100% cristalino (ΔH_m^0), como se muestra en la Ec. 6. Dicha cristalinidad es un dato muy importante, ya que afecta en gran medida a las propiedades mecánicas del material y a la contracción del polímero.

$$(Ec. 6) \quad X_c = \frac{\Delta H_c}{\Delta H_m^0} \quad [43]$$

El equipo empleado para la realización de este ensayo es el calorímetro diferencial de barrido *DSC Q200* de la compañía *TA Instruments*, que se muestra en la Figura 4.1.1-1. En lo relativo a las condiciones del ensayo, este comienza con el material estabilizado en 20°C, se calienta con una velocidad de 10°C/min hasta alcanzar los 210°C, se mantiene durante 30 segundos a dicha temperatura y se enfría con una velocidad de -10°C/min hasta alcanzar la temperatura inicial.



Figura 4.1.1- 1 Calorímetro diferencial de barrido *DSC Q200* de la compañía *TA Instruments* [44]

4.1.2. Ensayo de termogravimetría:

El análisis termogravimétrico es una técnica que tiene como objetivo en este estudio obtener la temperatura de degradación del polímero, estableciendo así el límite superior al que se puede procesar el material.

Para ello, se va calentando el material en una atmósfera oxidante o inerte, y se mide la masa del polímero que queda en el equipo en función del tiempo y la temperatura. Como resultado, se obtiene una curva del porcentaje de masa que queda con respecto a la inicial frente a la temperatura, mostrando la disminución de masa del material al volatilizarse algunos de sus componentes en el calentamiento. La derivada de dicha curva indica la velocidad de degradación y su máximo corresponde con la temperatura de degradación.

Para este estudio, como se buscaba una degradación completa del material, se empleó una atmósfera de aire. El calentamiento del material se llevó a cabo con una velocidad de 10°C/min hasta la temperatura de 900°C. El equipo empleado para la realización de esta prueba fue el analizador termogravimétrico *TGA Q50* de la compañía *TA Instruments*, que se muestra en la Figura 4.1.2-1:

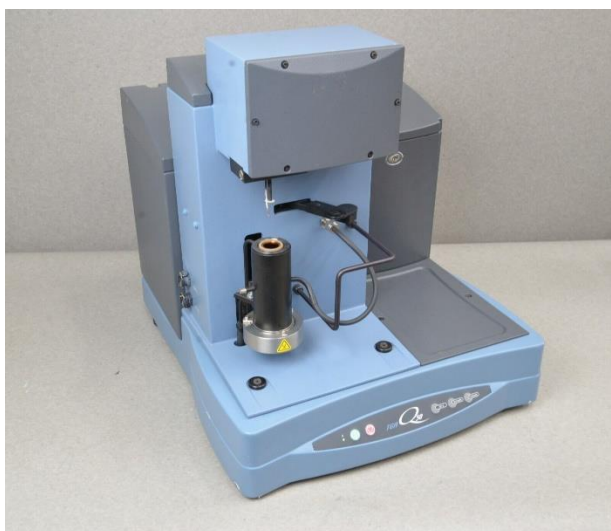


Figura 4.1.2- 1 Analizador termogravimétrico *TGA Q50* de la compañía *TA Instruments* [45]

4.1.3. Ensayo de fluidez:

Se ha desarrollado un ensayo de fluidez MFI, por sus siglas en inglés *Melt Flow Index*, con el objetivo fundamental de obtener la viscosidad del polipropileno a emplear durante el proyecto y determinar así el rango de temperaturas al que puede trabajar el polímero. Este índice se define como la masa de polímero extruido a distintas temperaturas a través de un tubo capilar de una geometría determinada, durante un tiempo determinado y aplicando una fuerza concreta.

Durante el desarrollo de este ensayo se introduce material en el equipo, se calienta hasta estabilizarlo en la temperatura a la que se quiere obtener el MFI y se aplica presión, ejercida por el peso de 2,16 kg y transmitida al material a través de un pistón, que se desplaza en el interior del cilindro en el que se encuentra el material. A continuación, se

procede a la apertura del orificio y se observa la cantidad de material que es capaz de fluir y caer por este. Por último, se procede al pesaje de la masa extruida en una báscula. Con esta información se expresa el índice de fluidez, cuyas unidades son g/10 min. En la Figura 4.1.3-1 se muestra el equipo empleado para la realización de este ensayo, el *KINSGEO*® *tester*:



Figura 4.1.3- 1 *KINSGEO*® *tester*, equipo empleado para la obtención del MFI

4.2. INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA A FABRICAR:

La pieza que se va a fabricar en el proceso de inyección es una biela que presenta un cajeadado en su base. El motivo por el que se ha escogido esta geometría es su predisposición a sufrir defectos cuando se produce con parámetros de inyección no óptimos. Ente las zonas que favorecen la aparición de defectos destacan los cilindros, al tener un espesor mayor que otras zonas de las piezas y un vaciado en su centro, factores que pueden dar lugar a problemas en el enfriamiento, y la base del cajeadado, ya que tiene un espesor extremadamente pequeño que puede provocar problemas de fluidez. En la Figura 4.2-1 se puede observar una imagen de esta geometría, que cuenta con una longitud de 182 mm, un ancho de 32 mm, un alto de 20,5 mm.



Figura 4.2- 1 Geometría a fabricar durante el proyecto

Como ya se ha mencionado, este estudio es la continuación de un proyecto previo en el que se analizó la aparición de defectos en una biela idéntica, pero sin cajeadado en su base. En la Figura 4.2-2 se muestra dicho diseño. Por tanto, se busca identificar la influencia de esta modificación en la geometría en la aparición de defectos.

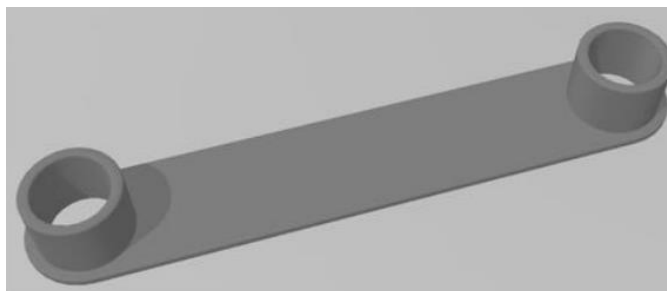


Figura 4.2- 2 Diseño de la biela sin cajeadado en su base

En el Anexo 2 se encuentra el plano de la biela con el cajeadado en su base, que ha sido empleada en el desarrollo de este proyecto. Por otro lado, el Anexo 3 recoge el plano de la pieza sin el cajeadado en la base fabricada en el proyecto anterior.

En lo relativo al molde, ha sido fabricado en el Laboratorio de Fabricación por mecanizado de aluminio, debido a su buena conductividad térmica, su facilidad de fabricar mediante arrancado de viruta y su coste reducido.

Se trata de un molde multicavidad, que permite la fabricación simultánea en cada ciclo de inyección de la pieza con cajeadado en su base y sin cajeadado en su base. En la Figura 4.2-3 se observa la placa fija del molde, en la que se pueden apreciar las dos cavidades mencionadas:

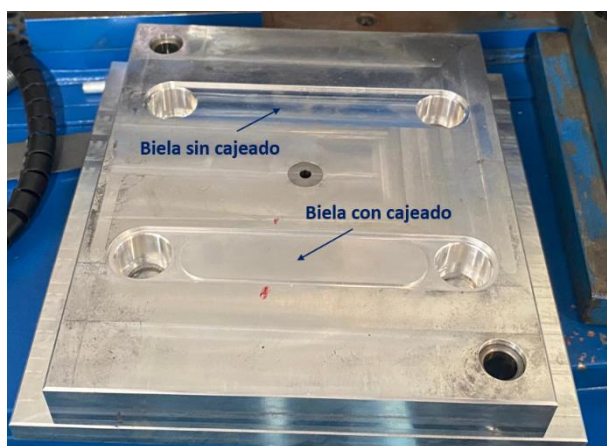


Figura 4.2- 3 Placa fija del molde empleado en el proyecto

En el diseño y fabricación del molde es necesario tener en cuenta que la cavidad debe estar sobredimensionada con respecto a la geometría de la pieza a fabricar, ya que durante su enfriamiento el material experimenta una contracción inevitable que reduce su volumen. Por otro lado, sobre las cavidades del molde no se llevó a cabo el pulido de las superficies, debido a su elevado coste y a la poca influencia que tendría en la aparición de defectos en las piezas, únicamente reduciendo la calidad superficial de las mismas. Este hecho se denota porque aparecen pequeñas marcas del mecanizado en el molde, que posteriormente se apreciarán en las piezas inyectadas

En lo relativo al desmoldeo de las piezas, consta de una placa expulsora, además de varillas expulsoras localizadas únicamente en la parte de los canales de alimentación y el bebedero. Es importante remarcar que las varillas no contactan directamente con la pieza porque introducen deformaciones adicionales en esta. Como el objetivo de este estudio es el análisis de la influencia de los parámetros de inyección en los defectos, no se puede permitir que elementos externos introduzcan deformaciones, que al ser medidas posteriormente puedan falsear los resultados.

A su vez, el molde empleado se caracteriza por su versatilidad, puesto que permite la posibilidad de escoger si se quiere inyectar material en las dos cavidades del mismo o solamente en una. Asimismo, permite elegir si el proceso se realiza con dos puntos de inyección ubicados en los laterales de la pieza o con un único punto de inyección en su parte central.

Para la producción de las piezas, se escogió el diseño con dos puntos de inyección, que permite estudiar los defectos que aparecen en la zona de unión de los flujos de polímero, especialmente en condiciones en las que el material tiene poca fluidez. En la Figura 4.2-4 se ilustra el diseño de los canales de alimentación empleados, que desembocan en dos puntos de inyección en los laterales de la biela:

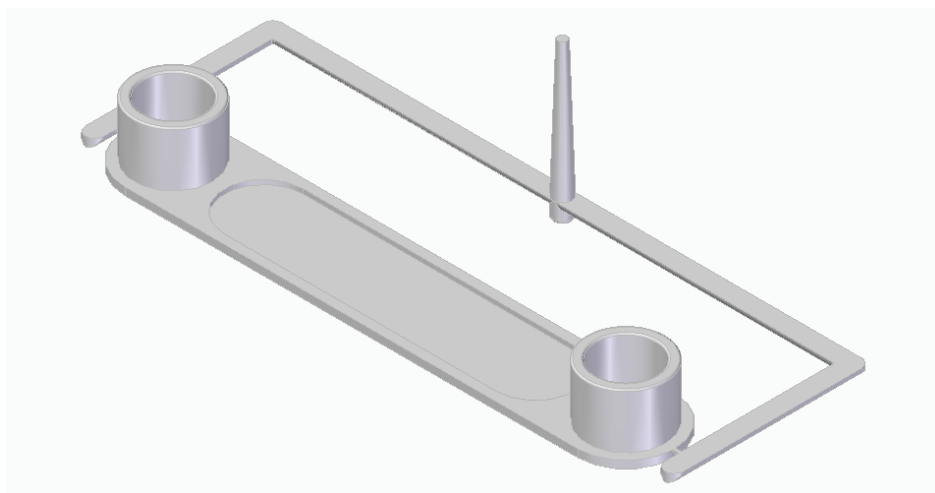


Figura 4.2- 4 Diseño de la pieza y los canales de alimentación empleados

4.3. PROCESO DE INYECCIÓN:

Una de las etapas fundamentales del proyecto es la fabricación de las piezas. Esta fase permite entender en profundidad el proceso de inyección y el funcionamiento de una máquina de inyección.

El objetivo fundamental es la producción de piezas con distintos valores de los parámetros del proceso, para observar los defectos que aparecen en ellas.

Tras ello, en la siguiente etapa, se procederá a la medición de los defectos y al análisis de los datos obtenidos, con el fin de establecer una relación entre el valor de las distintas variables de inyección y los defectos que aparecen, identificando la influencia de cada una de ellas. En este apartado se explican los elementos utilizados y las tareas realizadas durante la fabricación de las piezas.

4.3.1. Inyectora *Mateu & Solé Meteor 165/55H 30 Φ*:

La máquina de inyección empleada para la fabricación de las piezas es la inyectora *Meteor 165/55H 30 Φ*, de la compañía *Mateu & Solé*, que se muestra en la Figura 4.3.1-1. Se trata de una máquina que puede funcionar de forma automática (realiza ciclos de inyección uno tras otro), semiautomática (realiza todas las operaciones de un ciclo de inyección y se detiene) o manual (el operador regula cada movimiento de la máquina).



Figura 4.3.1- 1 Máquina de inyección *Meteor 165/55H 30 Φ* de la compañía *Mateu & Solé*

En lo relativo a los datos técnicos de la inyectora, esta dispone de un husillo de diámetro igual a 30 mm y longitud igual 615 mm. La máxima presión de inyección que puede aplicar la máquina es de 170,5 bar, el volumen máximo que puede inyectar es de 95 cm³ y su fuerza de cierre de 550 kN. En el Anexo 4 se encuentra la ficha técnica de la máquina, que recoge el resto de características técnicas de la misma.

A la hora de trabajar con una máquina de inyección, es importante verificar la idoneidad de la máquina para el polímero empleado. Para ello, se usa un parámetro de la máquina definido como la relación entre la longitud del husillo y su diámetro (L/D). En el caso de los polímeros convencionales, como el polipropileno, el parámetro L/D debe tomar un valor entre 20 y 24 para que la máquina sea apropiada. Dicho parámetro en la inyectora escogida tiene un valor de 20,5, por lo que se concluye que sí es idónea para trabajar con polipropileno.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que esta máquina de inyección tiene dos presiones con las que trabajar: la presión hidráulica que ejerce la unidad de inyección y la presión a la que se encuentra el material cuando es inyectado. Ambas variables están relacionadas por el factor de intensidad hidráulica, que depende del área del pistón y se define como se recoge en la Ec. 7:

$$(Ec. 7) \quad \text{Factor de intensidad hidráulica} = I = \frac{\text{Presión en el material}}{\text{Presión hidráulica en la máquina}}$$

En el caso de la inyectora *Meteor 165/55H 30 Φ*, el factor de intensidad hidráulica toma un valor de 10. De modo que si se requiere una presión en el material de 400 bar para que la inyección tenga éxito, la unidad de inyección deberá aportar una presión hidráulica de 40 bar. Es importante realizar esta distinción para evitar malentendidos, ya que el

parámetro que se modifica en la máquina es la presión hidráulica, mientras que los programas de simulación trabajan con la presión en el material.

4.3.2. Análisis térmico del molde y de la pieza:

Durante la fabricación de las piezas se busca recabar la máxima información posible del proceso. Para ello, se toma la temperatura del molde y de la pieza.

En lo relativo a la temperatura del molde, esta se mide antes y después de cada inyección. Se persigue el estudio de la influencia de la temperatura a la que se inyecta el material en la temperatura del molde, así como la evolución de calentamiento del molde según se van fabricando las piezas.

En lo relativo a la temperatura de las piezas, esta se mide inmediatamente después del desmoldeo de la misma. El objetivo es evaluar el proceso de enfriamiento y la influencia tanto de la temperatura de inyección como de la temperatura del molde en la calidad de dicho enfriamiento.

4.3.2.1. Cámara termográfica:

El equipo empleado para medir la temperatura del molde y de la pieza es la cámara termográfica *E40* de la marca *FLIR*, que se muestra en la Figura 4.3.2.1-1. Esta cámara cuenta con una resolución de 160 x 120 píxeles y una sensibilidad térmica de 0,07°C.



Figura 4.3.2.1- 1 Cámara termográfica *E40* de la marca *FLIR*

Conocida la emisividad del material a medir, es posible hallar su temperatura en un punto concreto, así como las temperaturas máxima y mínima captadas por la cámara. En la cámara existe un parámetro que permite cambiar la emisividad del material a medir. Por tanto, para la medición de las temperaturas es necesario ajustar este parámetro. El polipropileno presenta una emisividad de 0,97, mientras que el aluminio tiene una emisividad de 0,09 [46].

La medición de la temperatura se realiza en la parte central tanto de la pieza como del molde. En la Figura 4.3.2.1-2 se muestran ejemplos de las imágenes tomadas por la cámara termográfica, a la izquierda una imagen tomada sobre el molde y a la derecha una imagen tomada sobre la pieza:

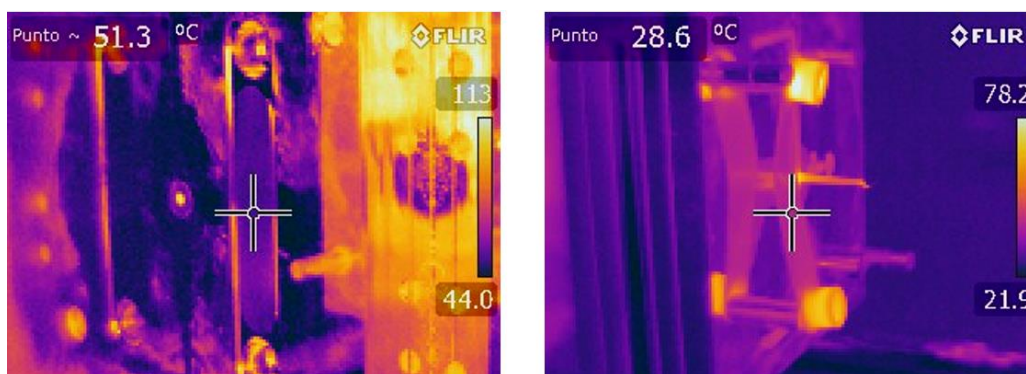


Figura 4.3.2.1- 2 Imágenes tomadas por la cámara termográfica sobre el molde (izquierda) y sobre una pieza (derecha)

4.3.3. Parámetros de la máquina de inyección:

La máquina de inyección con la que se va a trabajar durante el desarrollo del proyecto permite al usuario variar una gran cantidad de parámetros del proceso de inyección. Sin embargo, de cara a su influencia en la aparición de defectos no es posible estudiarlos todos, ya que el número de piezas que sería necesario fabricar para realizar un análisis correcto sería demasiado elevado.

Por ello, se han dividido los parámetros configurables en la inyectora en dos grandes grupos: parámetros constantes y parámetros de estudio. Los parámetros a fijar son aquellos cuya variación se ha considerado menos influyente en la aparición de defectos y, por tanto, se ha calculado su valor óptimo para mejorar la calidad del proceso de inyección y de las piezas obtenidas, basándose en recomendaciones y estudios previos, recogidos en el Apartado 1.1.4. Por otro lado, se han definido como parámetros de estudio aquellas variables cuya variación afecta considerablemente a la calidad de las piezas obtenidas, resultando más relevante analizar su influencia en la aparición de defectos.

El valor de todos estos parámetros es introducido en la máquina mediante la consola de la que dispone, que cumple la función de interfaz usuario-máquina. En la Figura 4.3.3-1 se puede observar dicho elemento:

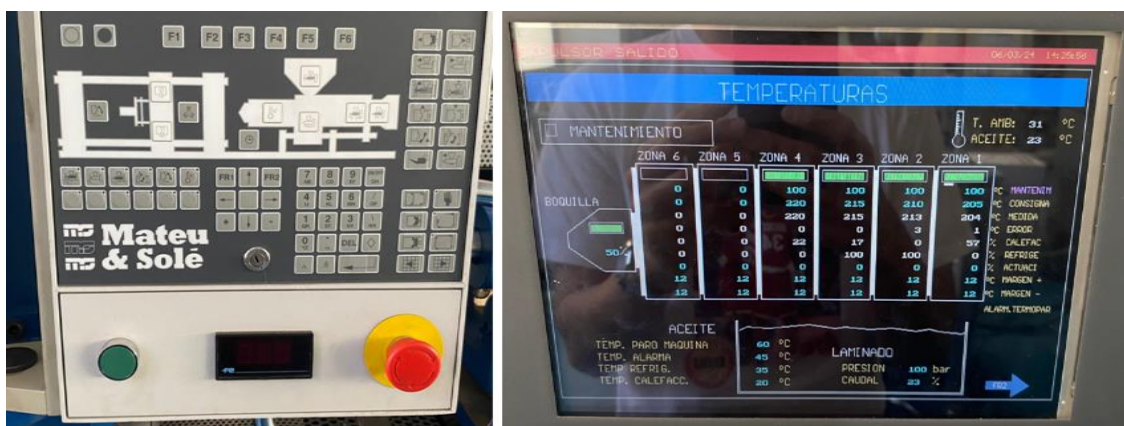


Figura 4.3.3- 1 Consola de la máquina de inyección

4.3.4. Desarrollo de los ensayos:

Una vez se ha definido el valor que debe tomar cada una de las variables en las piezas a inyectar, se procede a la fabricación de las mismas. Para ello, se emplean como materia prima los *pellets* de polipropileno explicados en el Apartado 4.1 y como inyectora la máquina definida en el Apartado 4.3.1.

Durante los ensayos se busca fabricar las piezas, identificarlas según los parámetros de inyección que se han empleado y almacenarlas para posteriormente poder realizar sobre ellas las distintas mediciones de los defectos que aparezcan.

Otra tarea fundamental que se debe desarrollar durante esta etapa es la de conseguir la máxima información posible del proceso de inyección. Para ello, se emplea la cámara termográfica descrita en el Apartado 4.3.2.1, que permite obtener la temperatura del molde y la temperatura de la pieza en cada una de las inyecciones. Asimismo, se realiza una inspección visual de la pieza y se anota una descripción cualitativa de los defectos observados.

Se lleva a cabo un registro en el que se recoge:

- El número con el que se marca la pieza para su identificación.
- El valor de los parámetros con los que ha sido fabricada.
- La temperatura del molde.
- La temperatura de la pieza tras el desmoldeo.
- Las referencias de las imágenes tomadas por la cámara termográfica.
- La descripción de los defectos observados.

En la Figura 4.3.4-1 se muestra un ejemplo de dicho registro para una de las piezas, en la izquierda, así como la marcación que se hace sobre ellas para identificarlas, en la derecha:


Pieza 193	T=240°C	P=50 bar	Pmant=50%	Tmant=2s	tenfr=10,2s	
Imagen Polip.	2875		Temp. Polip.	29°C		
Imagen Molde	2879 (antes), 2881 (después)		Temp. Molde	56°C(antes), 57°C(después)		
Comentarios	Ligero alabeo. Rechupes en los cilindros. Burbujas en los laterales. Gran burbuja en la zona central causada por el defecto del molde. Un poco de material sobrante en el centro.					

Figura 4.3.4- 1 Registro de las piezas fabricadas (izquierda) y numeración para identificarlas (derecha)

Durante el desarrollo de las inyecciones, se ha observado que existe una imperfección en una de las superficies del molde. No se trata de una protuberancia sino de una depresión, por lo que no es posible su mecanizado para eliminarla. Por lo tanto, se decidió que también se va a estudiar la influencia de esta pequeña depresión en el molde en los defectos de las piezas.

Dicho defecto en el molde modifica el flujo de polímero y da lugar a la aparición de una burbuja en esa zona de la pieza. El tamaño de esta burbuja depende en gran medida del valor que toman los parámetros de inyección. En la Figura 4.3.4-2 se observa el defecto provocado por esta imperfección en el molde. En la zona izquierda de la imagen se observa una burbuja casi imperceptible, en la zona central una burbuja de tamaño medio y en la derecha se aprecia una burbuja de gran tamaño que se extiende hasta los cilindros de la pieza:



Figura 4.3.4- 2 Burbujas que aparecen en las piezas fabricadas debido a una pequeña imperfección en el molde

4.3.5. Simulación del proceso de inyección con el software *MoldFlow*:

De manera adicional, se ha empleado el software *MoldFlow* de la compañía *Autodesk*. Este programa permite la simulación del proceso de inyección de polímeros, tal y como lo hacen en la industria, pues es el software más empleado en el sector de la inyección con plásticos. El objetivo es simular la fabricación de las piezas para ciertos valores de los parámetros de inyección y hallar mediante la simulación qué defectos aparecen en ellas. Con ello, se busca determinar si los resultados obtenidos en las simulaciones se corresponden con los resultados obtenidos en los ensayos.

Para la simulación del proceso, el programa requiere la geometría a fabricar, incluyendo los canales de alimentación, el punto en el que se realiza la inyección, el material utilizado y las condiciones de fabricación, tales como temperatura de inyección, tiempo de inyección, presión de mantenimiento o tiempo de mantenimiento, entre otros.

Como resultado se obtienen las zonas de aparición de los defectos, así como una cuantificación de los mismos. Los defectos que permite medir este software son falta de llenado, líneas de soldadura, burbujas, contracción o alabeo, entre otros.

El problema fundamental a la hora de simular el proceso es el relativo a la elección del material. *MoldFlow* cuenta con una base de datos en la que no se encuentra el material empleado en la fabricación de las piezas reales. Asimismo, para introducirlo manualmente se requieren muchos parámetros que son conocidos únicamente por su fabricante, puesto que no aparecen en la ficha técnica y no se dispone de los medios para hallarlos. Por lo tanto, la decisión tomada para realizar las simulaciones es realizar una búsqueda en la base de datos del programa y escoger un material que sea lo más similar posible al empleado en la realidad, una vez este ha sido caracterizado.

Los principales requisitos que debe verificar son:

- Polipropileno.
- Sin fibras.
- Índice de Viscosidad de 25 g/10 min o un valor cercano (a 230°C y con carga de 2,16 kg).
- Densidad: 0,902 kg/m³.

Con todo ello, se escogió como material para realizar las simulaciones el *SABIC PP QR 673K*. Este cuenta con un índice de viscosidad 25 g/10 min y una densidad de 0,901 kg/m³. A su vez, el *SABIC PP QR 673K* presenta una temperatura de cristalización similar a la del polipropileno real a ensayar, con un valor de 117°C. Esta temperatura aparece en el programa de simulación como “Temperatura de Transición” y se debe tener en cuenta que significa una cosa u otra según el tipo de material con el que se está trabajando: para materiales semicristalinos, como el polipropileno, representa la temperatura de cristalización, mientras que para materiales amorfos representa la temperatura de transición vítrea.

4.4. MEDICIÓN DE DEFECTOS EN LAS PIEZAS FABRICADAS:

Una vez se han fabricado todas las piezas, se procede a la medición de sus defectos, empleando distintas técnicas en función de la naturaleza del mismo. El resultado de dichas mediciones permitirá observar tendencias y relaciones entre los parámetros de estudio y los defectos que aparecen.

Tras la medición de los defectos en las piezas, estas son trituradas para obtener nuevos *pellets* de polipropileno reciclado, que podrán ser empleados de nuevo en procesos de inyección para la fabricación de nuevas piezas.

En este apartado, se describen los equipos y las técnicas que se han empleado para la medición de los distintos defectos.

4.4.1. Inspección visual:

La inspección visual se ejecuta de manera simultánea a la fabricación de las piezas. Como ya se ha mencionado, se fabrican cinco piezas para cada condición de fabricación y se lleva a cabo una observación de las mismas para escoger las más representativas, identificando los defectos que aparecen en un mayor número de piezas.

Se trata de una etapa en la que únicamente se identifican los defectos de manera cualitativa. Asimismo, se apunta cualquier incidencia que ha tenido lugar en el proceso de fabricación que puede afectar a los defectos. Por ejemplo, se anota la facilidad o dificultad con la que se ha ejecutado el desmoldeo de la pieza, para poder estudiar posteriormente su influencia en el alabeo convexo o cóncavo que sufren las piezas.

Falta de llenado:

El principal objetivo de la inspección visual realizada es identificar aquellas condiciones de fabricación con las que tiene lugar un llenado incompleto de la cavidad. Esta falta de llenado del molde se debe a que para esos parámetros de fabricación el polímero presenta una fluidez deficiente y la presión aplicada no es suficiente para vencer la fricción del material con las paredes de los canales de alimentación y de la cavidad.

En la Figura 4.4.1-1 se observan piezas que han sufrido un llenado incompleto del molde. En la parte izquierda de la imagen, se observa una pieza cuyas condiciones de fluidez han dado lugar a que esté muy lejos del llenado del molde, mientras que en la pieza de la derecha los flujos de material han estado cerca de unirse.

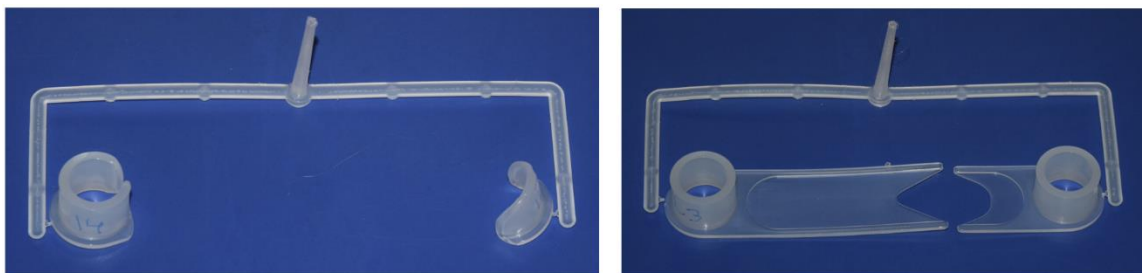


Figura 4.4.1- 1 Piezas fabricadas que presentan un llenado incompleto de la cavidad del molde

En algunas ocasiones, el flujo de material de las piezas fabricadas ha llegado a unirse, pero no ha rellenado toda la base de la pieza, como se muestra en la Figura 4.4.1-2. En estos casos, también se considera que ha tenido lugar un llenado incompleto de la cavidad:

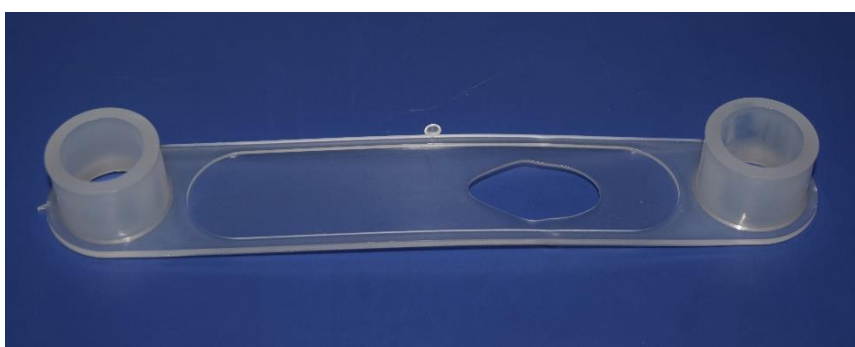


Figura 4.4.1- 2 Biela fabricada que presenta falta de llenado en su base

El objetivo de esta etapa es la obtención de una tabla que recoja todas las combinaciones de parámetros de estudio, determinando si dan lugar a un llenado completo o incompleto del molde. Para ciertas condiciones ocurre que en algunas inyecciones se llena el molde y en otras no llena, sin estabilizarse. Estas se determinan como condiciones de “llenado sin confianza”.

Sobre las piezas que no han llenado el molde no se llevarán a cabo más mediciones para evaluar otros defectos, puesto que son piezas que no presentan integridad.

4.4.2. Software *ImageJ*:

Para la medición y cuantificación de los defectos de aire retenido y rebabas sobre las piezas fabricadas, se emplea el software *ImageJ*. Se trata de un programa informático de procesamiento digital de imágenes desarrollado por la agencia gubernamental estadounidense *National Institutes of Health*.

Para ello, se fotografían todas las piezas en las que ha tenido lugar un llenado completo de la cavidad. Estas fotografías se deben hacer con un fondo negro y con poca iluminación, para que cambie ligeramente el brillo de la pieza en las diferentes superficies. Asimismo, la cámara se debe colocar de forma perpendicular a la pieza, con el objetivo de no distorsionar la geometría de la misma. Se emplea un soporte para asegurar dicha perpendicularidad.

En la Figura 4.4.2-1 se muestra una de las fotografías tomadas para ser procesada por el software:



Figura 4.4.2- 1 Fotografía tomada para su análisis con el software *ImageJ*

Mediante el uso de este software, los defectos que se busca medir son burbujas de aire retenido y rebabas. Para establecer una relación entre las variables del proceso de inyección y dichos defectos, se debe cuantificar en todas las piezas el área de las burbujas generadas y el número de estas, así como el área de rebabas que presentan las piezas.

Burbujas de aire retenido:

En las piezas fabricadas, según las condiciones con las que han sido inyectadas, se observa que presentan resultados muy dispares en lo relativo a las burbujas que aparecen en ellas.

En algunas de las piezas no aparecen burbujas de aire retenido, mientras que en otras hay numerosas burbujas, de muy pequeño diámetro, ubicadas en los laterales de la base de la biela, zona que cuenta con mayor espesor que el resto de la base. En la Figura 4.4.2-2 se puede ver un ejemplo de pieza con dichas burbujas:

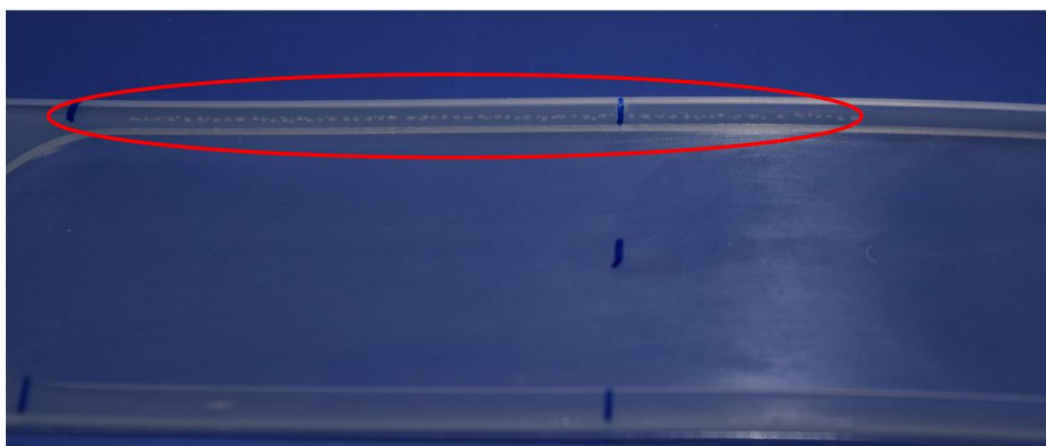


Figura 4.4.2- 2 Burbujas de aire retenido en una de las piezas fabricadas

Por otro lado, como ya se ha mencionado en el Apartado 4.3.4, existen numerosas piezas en las que aparece una única burbuja ubicada en la zona central de su base, de mayor o menor tamaño. Esta se produce por una desviación del flujo de material debida a un

defecto en el molde y su magnitud depende mucho de las condiciones de inyección. En la Figura 4.4.2-3 se muestra una burbuja de gran tamaño causada por este motivo:

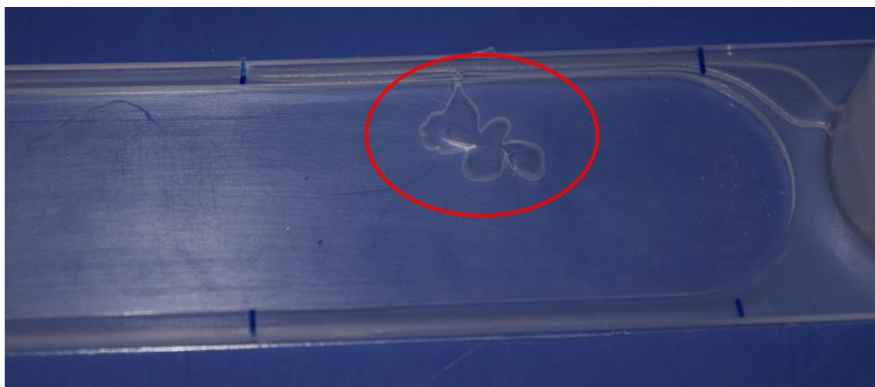


Figura 4.4.2- 3 Burbuja de gran tamaño en una de las piezas fabricadas causada por el defecto en el molde

De cara a la medición de este defecto con *ImageJ*, se sigue siempre el mismo procedimiento para todas las piezas. Se abre la imagen de la pieza con el software y se descompone en sus planos Red-Green-Blue (RGB). Se escoge uno de ellos para trabajar, con el objetivo de que destaque más el brillo de las distintas zonas de las piezas.

A continuación, se procede a escalar la imagen. Este punto es fundamental para obtener un área correcta y real de las burbujas. Para ello, se traza una línea recta entre dos puntos de la pieza cuya distancia es conocida y se le asigna dicho valor, para que el programa establezca la escala en toda la imagen. En la Figura 4.4.2-4 se muestra este paso:

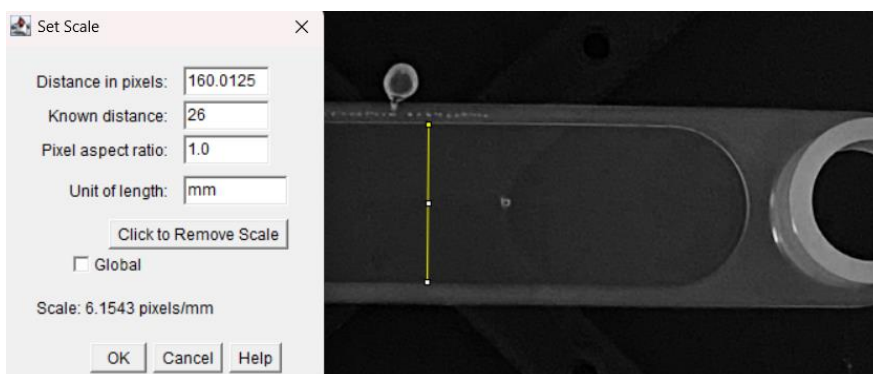


Figura 4.4.2- 4 Establecimiento de la escala de la imagen en *ImageJ*

Tras ello, se procede a segmentar la imagen en píxeles, tomando estos un color blanco o negro según el brillo de los mismos. Se debe realizar un ajuste estableciendo el rango de intensidades de los píxeles en los que estos serán de color blanco o negro. Este ajuste se realiza buscando que en la zona de análisis los únicos píxeles iluminados sean aquellos de las burbujas.

En la Figura 4.4.2-5 se observa el resultado de esta etapa antes y después de realizar el ajuste, en la parte izquierda y derecha de la imagen, respectivamente.



Figura 4.4.2- 5 Imágenes procesadas con el software *ImageJ* con el objetivo de aislar los píxeles con burbujas

El último paso consiste en recortar y conservar únicamente la zona en la que se encuentran las burbujas, siendo en el caso de la imagen anterior la parte superior de la misma. Después de ello, el programa procede a contar los píxeles y realizar un cálculo que devuelve el área total de burbujas y el número de las mismas. En la Figura 4.4.2-6 se muestran los resultados proporcionados por el programa en el análisis de cada pieza. En el caso del ejemplo, la pieza cuenta con 38 burbujas que suman un área de 15,321 mm².

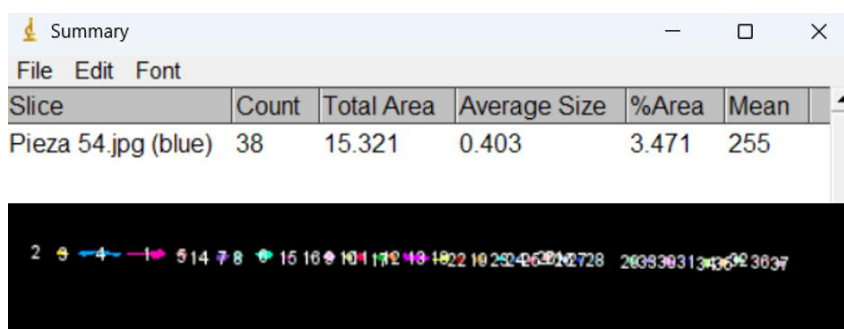


Figura 4.4.2- 6 Resultados proporcionados por *ImageJ* en la medición de las burbujas de una pieza

Rebabas:

En lo relativo a las rebabas, muchas de las piezas presentan un exceso de material que escapa de la cavidad del molde, debido a que ha sido inyectado en unas condiciones que provocan una fluidez excesiva. En la Figura 4.4.2-7 se muestra una pieza que presenta mucha área de rebabas:

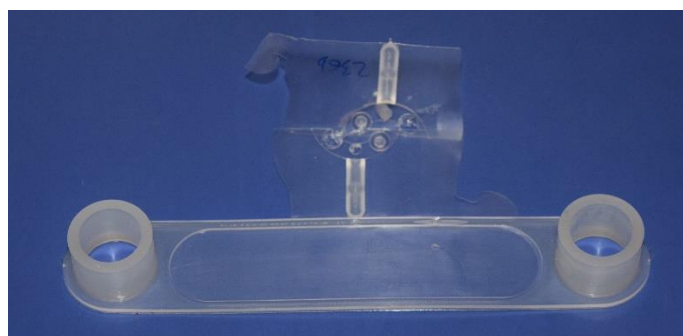


Figura 4.4.2- 7 Pieza fabricada que presenta muchas rebabas

Para su medición con *ImageJ* se lleva a cabo un procedimiento muy similar al realizado con las burbujas. En primer lugar, se abre la imagen con el software, se escoge un canal del plano RGB para trabajar y se escala la imagen estableciendo una dimensión conocida, como se ha explicado en el análisis de las burbujas de aire retenido.

Tras ello, se segmenta la imagen en píxeles según el brillo de los mismos, pero en este caso se realiza un ajuste para que toda el área de la rebaba quede de color blanco. En la Figura 4.4.2-8 se muestra el resultado de la operación. A la izquierda sin realizar el ajuste del brillo y a la derecha una vez se ha realizado:

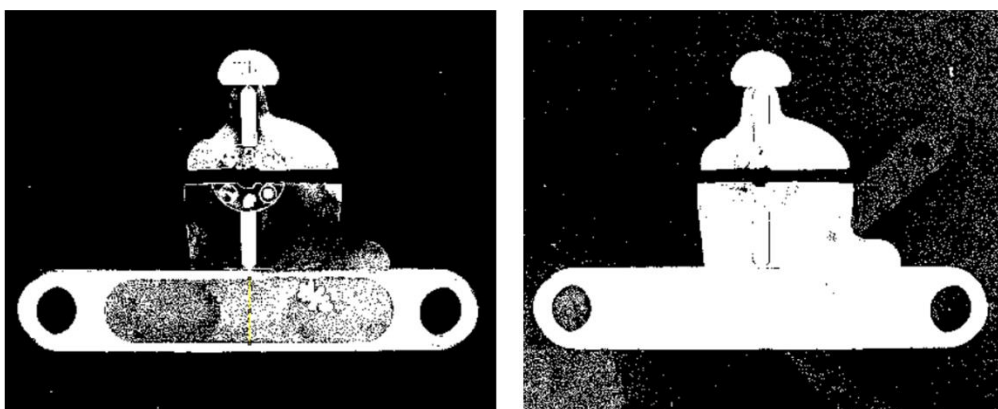


Figura 4.4.2- 8 Imágenes procesadas con el software *ImageJ* para analizar el área de rebabas en una pieza

Por último, se recorta la zona en la que se encuentran las rebabas, el software procede a contar los píxeles iluminados y mediante la escala impuesta es capaz de devolver el área total de rebaba. En la Figura 4.4.2-9 se muestra un ejemplo de las rebabas recortadas que debe analizar, a la izquierda, y los resultados proporcionados por el programa, a la derecha. En este ejemplo, la pieza tiene un área total de rebabas de 37,427 cm².

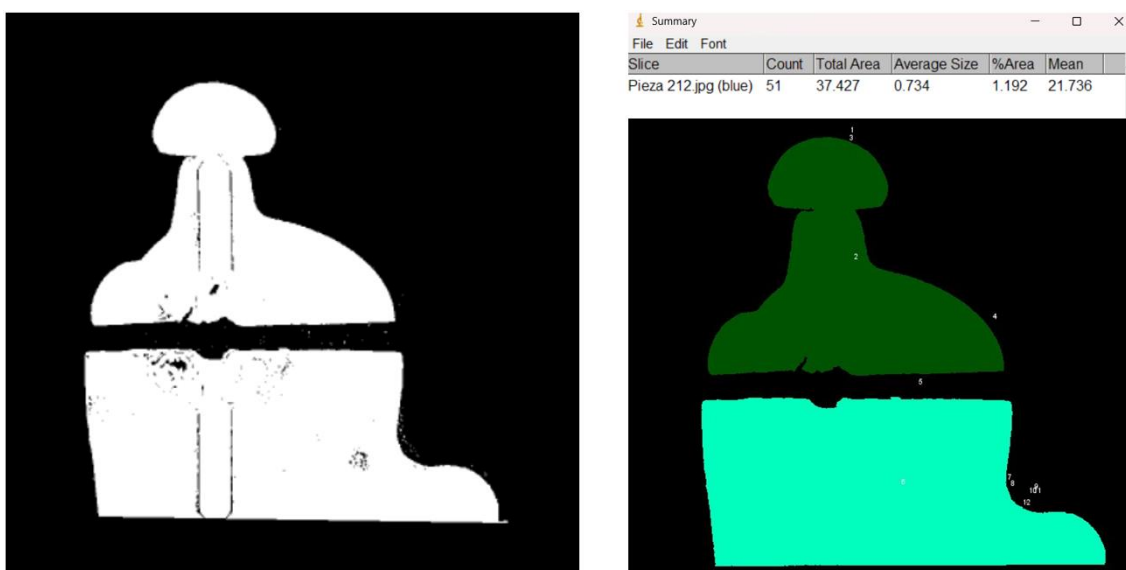


Figura 4.4.2- 9 Área de rebabas que se quiere medir (izquierda) y resultados proporcionados por *ImageJ* (derecha)

4.4.3. Micrómetro:

Sobre las piezas fabricadas también se realizan mediciones con micrómetro para medir la contracción transversal de la pieza. Se trata de un instrumento de medida de precisión, que se emplea para medir pequeños espesores.

El micrómetro que se emplea durante el proyecto es un micrómetro exterior de la marca *Mitutoyo*, que cuenta con una resolución de 0,01 mm y un rango de medida de 25 mm a 50 mm. Para una mayor precisión en la medida, este se monta sobre un soporte que garantiza su sujeción siempre en la misma posición. En la Figura 4.4.3-1 se muestra una imagen del montaje de ambos elementos:



Figura 4.4.3- 1 Micrómetro empleado en el proyecto junto con su elemento de soporte

Contracción del ancho de la pieza:

En lo relativo a la medición de los defectos que aparecen en las piezas, el micrómetro se emplea para medir el ancho de las bielas fabricadas, determinando así la contracción que han experimentado las mismas. Para ello, se realizan tres mediciones del ancho de la biela a lo largo de su base. Estas mediciones se hacen en la parte central de la misma, así como a 50 mm a derecha e izquierda de este punto. Se realiza con el objetivo de estudiar si tiene lugar una contracción uniforme en toda la base de la biela, o si por el contrario hay influencia en la contracción de la cercanía a los puntos de inyección.

De manera previa a la medición de las piezas fabricadas, estas son marcadas en aquellos puntos en los que se evalúa el ancho, empleándose un calibre para ubicar dichas secciones. Un ejemplo de las marcas en las secciones cuyo ancho debe ser medido con el micrómetro se puede observar en la Figura 4.4.3-2:

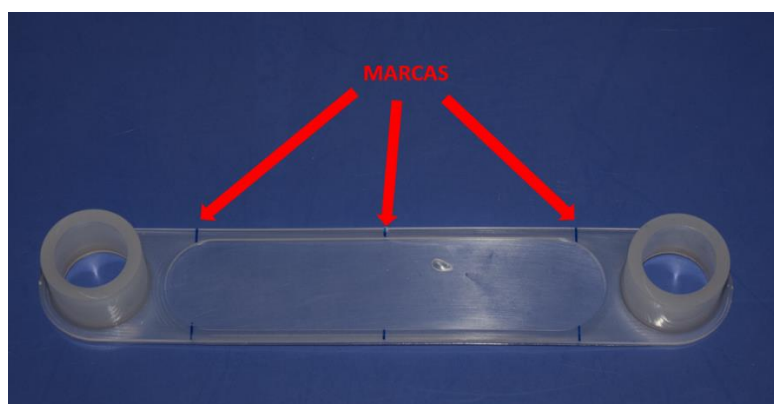


Figura 4.4.3- 2 Marcas sobre las piezas en las secciones a medir con micrómetro

Conocido el ancho de la cavidad del molde en cada uno de estos puntos (31,95 mm en la izquierda, 31,99 mm en el centro y 31,96 mm en la derecha), con esta medición del ancho de la pieza se puede calcular la contracción experimentada por la misma en cada uno de los puntos.

Esta medición se realiza sobre todas las piezas fabricadas en las que ha tenido lugar un llenado completo de la cavidad, para relacionar el valor de los parámetros de inyección con la contracción experimentada por las piezas.

4.4.4. Máquina de coordenadas *Mitutoyo CRYSTA - Plus M544*:

Otro de los equipos empleados para obtener datos de los defectos en las piezas fabricadas es una máquina de medición por coordenadas. Se trata de un equipo de elevada precisión, capaz de tomar medidas sobre objetos y determinar con exactitud la posición de cada elemento medido con respecto a un sistema de referencia, previamente definido. En el desarrollo del proyecto, se ha empleado la máquina de coordenadas *CRYSTA - Plus M544* de la compañía *Mitutoyo*. En la Figura 4.4.4-1 se puede observar este equipo:



Figura 4.4.4- 1 Máquina de coordenadas *CRYSTA - Plus M544* de la compañía *Mitutoyo*

Este equipo se caracteriza por su flexibilidad, ya que permite la toma de medidas sobre piezas de formas, tamaños y materiales muy dispares. Cuenta con una mesa de granito sobre la que se colocan las piezas, definida por su rigidez y planitud. Trabaja con tres ejes para ubicar los diferentes puntos de la pieza a medir en el espacio, empleando cojinetes neumáticos que aseguran un movimiento suave y preciso de los mismos. Asimismo, dispone de un palpador táctil. Este palpador se encuentra ubicado al final del cabezal que mueve el operador de la máquina. El palpador es el único elemento encargado de tocar la pieza en los puntos de los que se quiere obtener sus coordenadas. En la Figura 4.4.4-2 se muestra el cabezal de la máquina que contiene el palpador, en la izquierda, y una ampliación sobre dicho palpador, en la derecha:

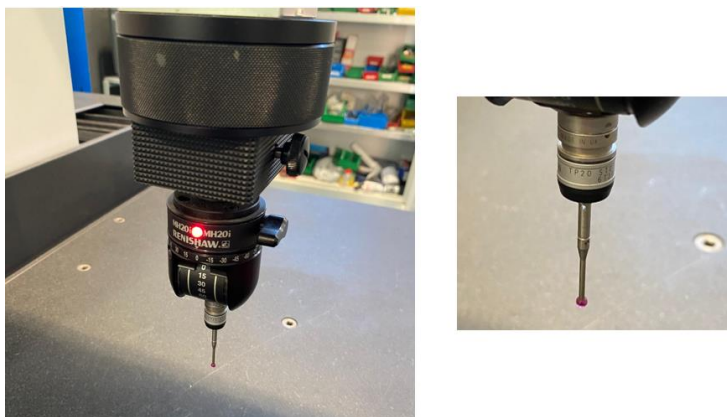


Figura 4.4.4- 2 Cabezal que contiene el palpador de la máquina de coordenadas (izquierda) y ampliación sobre dicho palpador (derecha)

La máquina de coordenadas emplea el software *MCosmos*. El procedimiento para trabajar con él es el siguiente: en primer lugar, se debe indicar de qué tipo de elemento se van a tomar coordenadas para modelarlo en el espacio, por ejemplo, un plano, un cilindro o una circunferencia, así como el número de puntos que se van a tomar sobre él. A continuación, se hace contacto con el palpador en los puntos del elemento a modelar, estando estos lo más distribuidos posible. De este modo, el software toma las coordenadas de cada punto y ubica el elemento en el espacio, con respecto al sistema de referencia que se haya establecido previamente. Tras ello, el programa permite la creación de nuevos elementos a partir de las intersecciones de los cuerpos modelados, la toma de medidas sobre dichos cuerpos, o la toma de medidas entre cuerpos diferentes. Por ejemplo, definidos dos planos permite crear la recta de intersección, definido un círculo permite medir su diámetro o definidos dos puntos permite hallar la distancia a la que se encuentran.

En lo relativo a las piezas fabricadas, la máquina de coordenadas se va utilizar para dimensionar y posicionar los cilindros interiores de las bielas. Con ello se obtiene información de su diámetro y de su inclinación, que son datos que cuantifican la contracción experimentada por las piezas en los cilindros y la desviación angular de los mismos debida al alabeo y a la torsión de las piezas. Esta información permite estudiar la influencia de los parámetros de inyección en la aparición de los defectos mencionados.

Contracción de los cilindros de la pieza:

La contracción de las piezas fabricadas por inyección es inevitable en la fase de enfriamiento. Sin embargo, esta se debe controlar y se deben buscar condiciones de fabricación en las que se minimice.

Se emplea la máquina de coordenadas para medir el diámetro interior de los cilindros de las bielas y calcular la contracción que estos han experimentado. Para ello, se toman medidas en ambos cilindros a dos alturas con respecto a la base: 10 mm y 16 mm.

Para calcular la contracción, simplemente es necesario restar la dimensión obtenida y la dimensión del macho del molde que genera ese agujero. En la Tabla 4.4.4-1 se muestran los diámetros del molde para cada altura:

Tabla 4.4.4- 1 Diámetro de los cilindros de los machos del molde a la altura de las mediciones

Altura (mm)	Diámetro cilindro izquierdo (mm)	Diámetro cilindro derecho (mm)
10	19,45	19,47
16	19,23	19,20

Como se puede observar, el diámetro a la altura de 10 mm es notablemente superior. Esto se debe a que los machos realmente no son cilindros, sino que son troncos de cono para facilitar el desmoldeo de la pieza.

Para la medición del diámetro interior de los cilindros de las piezas, estas se colocan sobre la mesa de la máquina y se fijan con plastilina. Se empela este material porque es capaz de retener a la pieza, pero sin inducir deformaciones en ella. A continuación, se establece el sistema de referencia palpando la mesa de la máquina. Tras ello, se procede a medir los cilindros. Se ubica el palpador en su interior y se fija su cota de altura en los valores de 10 mm y 16 mm. Se le indica al software que se va a medir una circunferencia tomando cinco puntos y se toca con el palpador el interior del cilindro en cinco puntos distintos. En la Figura 4.4.4-3 se muestra la pieza fijada en la mesa con plastilina y el cabezal de la máquina fijado a la cota de 16 mm en el interior del cilindro:

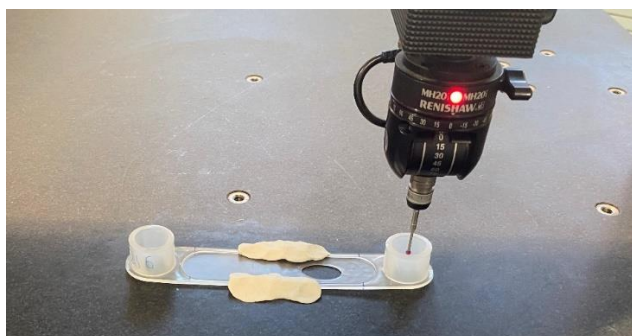


Figura 4.4.4- 3 Medición del diámetro interior del cilindro de las piezas con la máquina de coordenadas

Este procedimiento se repite en cada pieza en las dos cotas de los dos cilindros. En cada uno de ellos, con las coordenadas de los puntos, el software *MCosmos* hace una aproximación gaussiana de una circunferencia y da como resultado su ubicación y orientación con respecto al sistema de referencia, así como su diámetro.

A la hora de palpar el interior de los cilindros, es importante no tocar en zonas donde hay rechupes considerables, puesto que al estar aproximando la circunferencia por puntos, introducirían un error al no estar realmente alineados con el resto de puntos la circunferencia del cilindro. En la Figura 4.4.4-4 se muestran los rechupes que aparecen en el exterior de los cilindros de las bielas, pero que aparecen de igual manera en el interior de estos.



Figura 4.4.4- 4 Rechupes en los cilindros de las piezas fabricadas

Alabeo y torsión: desviación angular de los ejes:

Los cilindros de las piezas fabricadas experimentan también una desviación angular de sus ejes. Esto se debe a que, durante el enfriamiento de las piezas, estas sufren una contracción desigual en sus distintas zonas, que da lugar a tensiones residuales que provocan alabeo y torsión, desviando los ejes de los cilindros. A su vez, en ocasiones las piezas se quedan pegadas parcialmente al molde durante su desmoldeo, lo que induce mayores deformaciones y desviaciones.

El alabeo que experimentan las piezas puede ser cóncavo o convexo, provocando que los ejes de los cilindros se cierren o se abran, respectivamente. En la Figura 4.4.4-5 se muestra una pieza con alabeo cóncavo, en la parte izquierda de la imagen, y una pieza con alabeo convexo, en la parte derecha:



Figura 4.4.4- 5 Piezas con alabeo cóncavo (izquierda) y convexo (derecha)

Con la máquina de coordenadas se toman puntos en el interior del cilindro para definir dicho cuerpo, sacar su eje y calcular los ángulos que forma con los planos del sistema de referencia, correspondientes a su alabeo y a su torsión.

A su vez, se pretende obtener la distancia entre los ejes de los cilindros a dos alturas diferentes, siendo nuevamente 10 mm y 16 mm. Para ello, se emplean las circunferencias definidas para medir la contracción de los cilindros, calculando la distancia entre sus centros. Los valores obtenidos para cada pieza se comparan con las distancias entre los ejes de los machos del molde a esas alturas, recogidas en la Tabla 4.4.4-2:

Tabla 4.4.4- 2 Distancias entre los ejes de los machos del molde a la altura de las mediciones

Altura (mm)	Distancia entre los ejes (mm)
10	150,05
16	150,04

En este caso, resulta aún más clave la fijación de las piezas a la mesa de la máquina. Se realiza nuevamente con plastilina, pero cambia la ubicación de la misma en función del alabeo de la pieza. Es muy importante que esta no se deforme en su fijación, ya que modificaría la inclinación de los cilindros, distorsionando totalmente el resultado. En la Figura 4.4.4-6 se muestra cómo se fijan las piezas. En la imagen izquierda se ilustra cómo las piezas con alabeo cóncavo se fijan con plastilina en la parte central de su base, mientras que en la imagen derecha se refleja cómo las piezas con alabeo convexo se fijan con plastilina en los extremos de su base:



Figura 4.4.4- 6 Fijación de piezas cóncava (izquierda) y convexa (derecha) para su medición con la máquina de coordenadas

El procedimiento para medir no varía. Se establece la mesa como plano de referencia y se fija el palpador en el interior de los cilindros a las alturas definidas. Se indica que se va a medir un cilindro con diez puntos y se hace contacto con el interior del cilindro con el palpador. Con las coordenadas obtenidas el software realiza una aproximación gaussiana nuevamente y obtiene la ubicación e inclinación de los cilindros definidos.

Para cada una de las piezas medidas, el software permite sacar los ángulos que forma el eje de cada cilindro con los planos de referencia, siendo el ángulo formado con el plano de la mesa el correspondiente al alabeo, mientras que el ángulo formado con el plano frontal corresponde a la torsión. También permite obtener la distancia entre los ejes de los cilindros para cada cota. Toda esta información queda recogida en un informe que proporciona *MCosmos*. A modo de ejemplo, en el Anexo 5 se encuentra el informe generado en la medición de una de las piezas.

4.4.5. Sensor láser:

Para completar la medición del defecto de alabeo en las piezas, otro equipo que se ha empleado es un sensor láser. Este equipo permite obtener la distancia desde el punto emisor del láser hasta la superficie en la que se refleja. Para ello, se dispone de un sensor láser de la marca *SICK* que ha sido montado sobre una fresadora de eje vertical. Este emplazamiento permite que el láser se encuentre en una posición fija apuntando hacia una superficie perpendicular en la que se pueden colocar las piezas, la mesa de trabajo de la máquina.

El montaje permite ubicar las piezas a medir siempre en la misma posición, mediante la colocación de utillajes en la mesa de trabajo. Además, el movimiento de uno de los ejes horizontales de la máquina permite que la pieza se desplace con respecto al láser, recogiendo información de toda la longitud de la biela. En la Figura 4.4.5-1 se muestra el sensor láser montado sobre la fresadora:



Figura 4.4.5- 1 Montaje del sensor láser sobre la fresadora

Para trabajar con este sensor láser se emplea el software *LabView*. Se debe definir el rango de distancias en las que se encontrará la pieza a medir. El sensor devolverá como tensión de salida 0 V cuando la pieza se encuentre en el umbral inferior del rango definido y 10 V cuando se encuentre en el umbral superior, distribuyendo uniformemente el valor de la salida en dicho rango. Si el objeto se coloca fuera del mismo, el sensor satura y no es posible medir, por lo que se debe hacer una buena calibración para escoger el rango de medida. *LabView* recoge y graba la salida del sensor, que posteriormente debe ser tratada para convertir la tensión en distancia.

En este proyecto, el sensor láser se emplea para cuantificar el alabeo de las piezas, permitiendo obtener la máxima diferencia en altura entre puntos de la base de la biela que deberían estar alineados. Asimismo, permite obtener un perfil del alabeo, identificando si es cóncavo o convexo. Con esta información, se busca estudiar qué valores de los parámetros de inyección provocan un mayor alabeo, así como cuáles tienen más influencia en la aparición del mismo.

Alabeo:

En la Figura 4.4.5-2 se muestran piezas que presentan alabeo, tanto cóncavo, en la imagen inferior, como convexo, en la imagen superior:

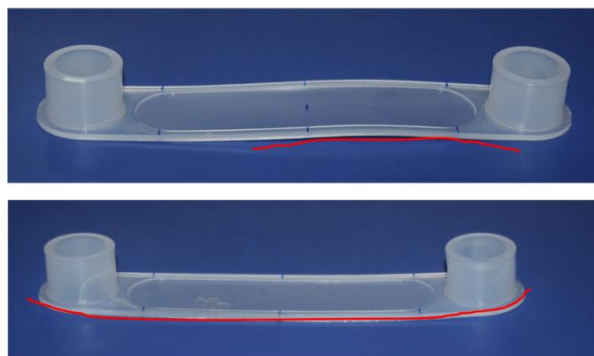


Figura 4.4.5- 2 Piezas fabricadas que presentan alabeo en su base, convexo (arriba) y cóncavo (abajo)

Para cuantificar el alabeo, se mide con el sensor láser la distancia hasta cada uno de los puntos de su base. Sin embargo, el polipropileno no da lugar a piezas opacas, por lo que el láser no se refleja al chocar contra ellas y no es posible medirlas. De modo que es necesario acondicionar las piezas para su medición. Para ello, se coloca una cinta negra sobre la base de estas, como se muestra en la Figura 4.4.5-3, que sí permite la reflexión de la luz emitida por el láser:



Figura 4.4.5- 3 Pieza acondicionada para ser medida con el sensor láser

Una vez está la pieza acondicionada, se procede a su medición con el láser. Para ello, la biela se coloca sobre la mesa de la fresadora, apoyándola sobre unos utillajes que aseguran que todas las piezas se presenten la misma orientación.

En primer lugar, se procede a establecer el rango de medición del sensor. Se establecen unos límites de 28 mm y 32 mm, que dan lugar a tensiones de salidas del sensor de 0 V y 10 V, respectivamente.

A continuación, se toman datos de la pieza. El láser permanece fijo en el cabezal de la fresadora, mientras que la mesa de trabajo se desplaza a velocidad constante de manera automática, provocando que el láser mida toda la longitud de la pieza. En la Figura 4.4.5-4 se puede observar la medición con el láser del alabeo de una de las piezas, colocada sobre los utillajes mencionados:



Figura 4.4.5- 4 Medición del alabeo de una de las piezas con el sensor láser

Con el software *LabView* se graban los valores de la salida del sensor láser para cada pieza. Graficando los resultados, se obtiene una gráfica tensión frente a tiempo que es proporcional al perfil de la pieza medida. En la Figura 4.4.5-5 se puede observar la salida del mencionado programa:

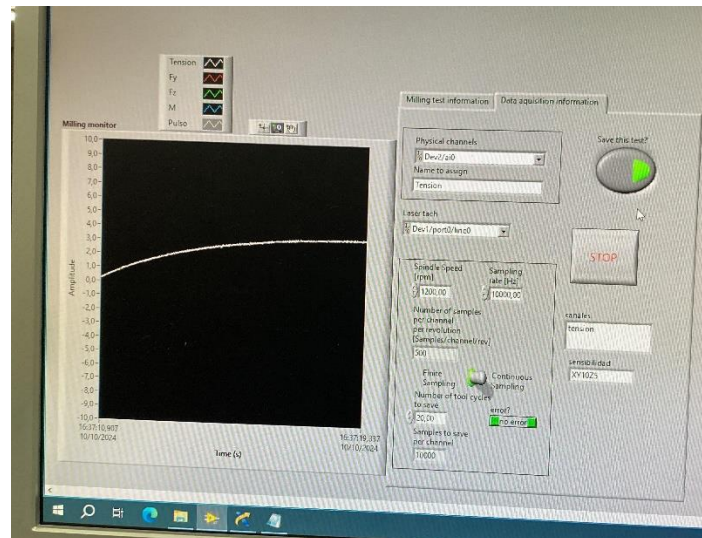


Figura 4.4.5- 5 Software *LabView* durante la medición del alabeo de una pieza

Una vez se han medido todas las piezas, para concluir la medición del alabeo, es necesario hacer un tratamiento de los datos. Para cada pieza, se hace una transformación lineal para convertir la tensión de salida del sensor (U) en distancia desde el emisor del láser hasta la superficie de la pieza (d). Como el rango de medida es de 28 mm a 32 mm y la tensión de salida es de 0 V a 10 V, distribuyéndose de forma uniforme en dicho rango, se aplica la transformación recogida en la Ec.8:

$$(Ec. 8) \quad d(\text{mm}) = \frac{32-28}{10-0} \cdot U(V) + 28 = 0,4 \cdot U(V) + 28$$

Por último, se calcula para cada pieza la distancia máxima entre dos puntos de su base, que es una medida cuantitativa del alabeo que experimenta. Asimismo, se apunta para cada pieza si el alabeo obtenido es cóncavo o convexo, con el objetivo de relacionarlo con las condiciones de inyección con las que se produjo.

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS:

En este apartado se exponen los principales resultados obtenidos durante el presente proyecto.

5.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL EMPLEADO:

El material empleado en la fabricación de las piezas fue evaluado en investigaciones previas con el objetivo de caracterizarlo. A continuación, se muestran los resultados de los ensayos realizados sobre el polipropileno *ECOLEN*® *HZA0S*, de la compañía *Hellenic Petroleum S.A.* Esta caracterización experimental se realizó con anterioridad a este proyecto en el Instituto IMDEA Materiales y la labor realizada en este trabajo consiste en analizar los resultados de la misma.

5.1.1. Ensayo de calorimetría diferencial de barrido:

El ensayo de calorimetría diferencial de barrido se ha llevado a cabo con el fin de obtener la temperatura de fusión, la temperatura de cristalización y el grado de cristalinidad que presenta el polímero que se va emplear en el proyecto. Para ello, se somete el material a ciclos de calentamiento y enfriamiento, mientras se recoge la información del flujo de calor en el material frente a la temperatura a la que se encuentra. La curva del primer calentamiento se recoge en la Figura 5.1.1-1:

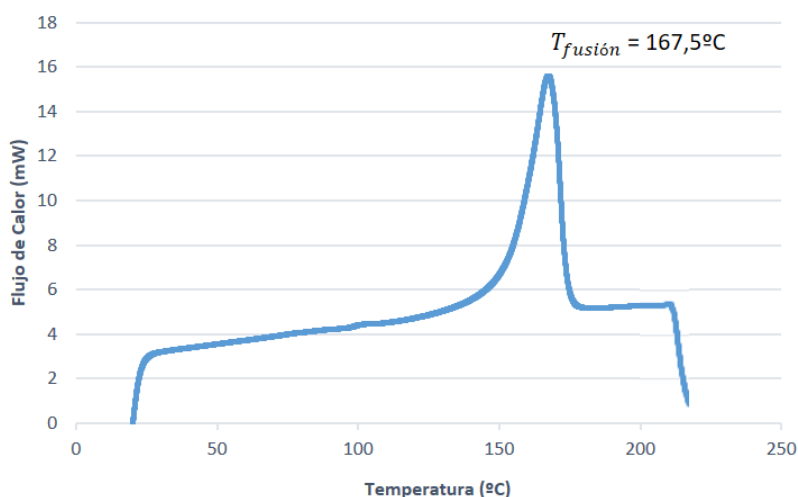


Figura 5.1.1- 1 Primer calentamiento en el ensayo DSC

Dicha curva está representada desde el punto de vista del material, por lo que se puede observar que el flujo de calor toma valores positivos, al tratarse de un proceso endotérmico. El máximo de la curva obtenida tiene lugar con una temperatura de 167,5°C, que se corresponde con el momento en el que tiene lugar la fusión del polímero. De modo que se determina que la temperatura de fusión del material es de **167,5°C**. Esta es la mínima temperatura a la que se puede trabajar en la inyección.

La curva del primer enfriamiento se recoge en la Figura 5.1.1-2:

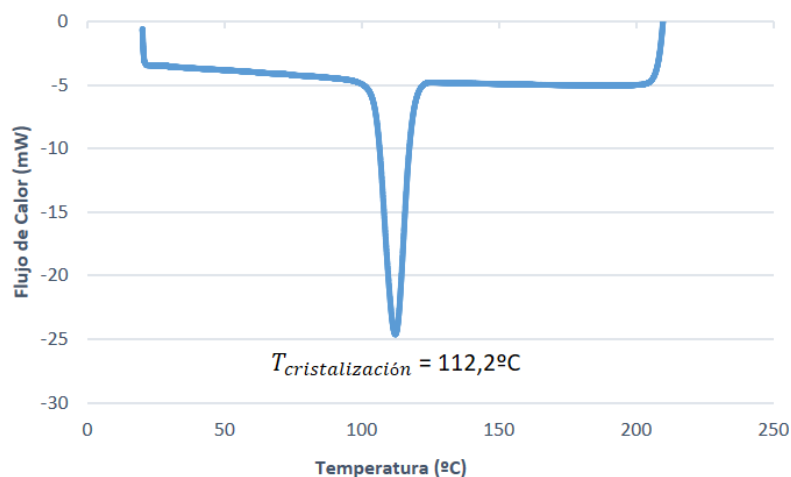


Figura 5.1.1- 2 Primer enfriamiento en el ensayo DSC

En este caso, al tratarse de un proceso exotérmico y representarse la información desde el punto de vista del material, el flujo de calor toma valores negativos. Durante dicho enfriamiento se produce la solidificación del material, observándose un pico negativo en $112,2^{\circ}\text{C}$ que se corresponde con el momento en el que tiene lugar la solidificación de la parte cristalina del polímero. De modo que se determina que la temperatura de cristalización del polímero toma un valor de $112,2^{\circ}\text{C}$. Esta es la máxima temperatura a la que se puede desmoldar la pieza sin sufrir deformaciones.

Por último, este ensayo permite la obtención de información útil para el cálculo del grado de cristalinidad que presenta el polipropileno analizado. Para ello, es necesario obtener la variación de entalpía que experimenta el material en el primer calentamiento. Esta entalpía se corresponde con el área bajo la curva del máximo flujo de calor en el material frente a temperatura. El cálculo de dicha área se muestra en la Figura 5.1.1-3:

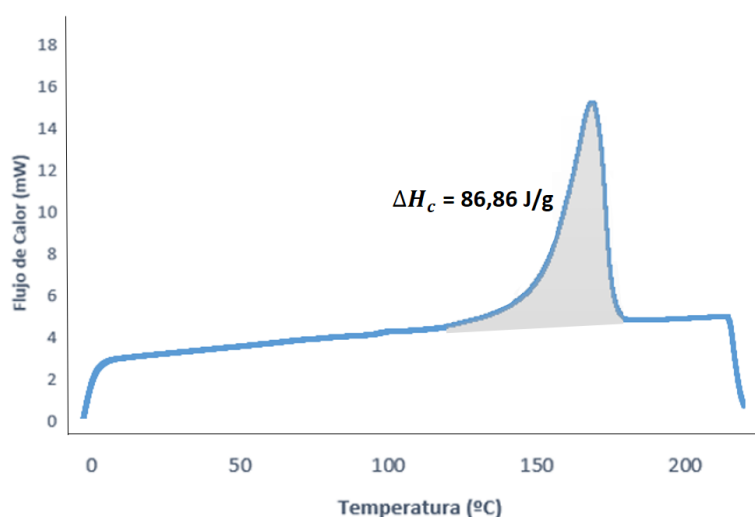


Figura 5.1.1- 3 Área bajo la curva del pico máximo del primer calentamiento del ensayo DSC

Como se puede observar, el valor obtenido de variación de entalpía durante el calentamiento (ΔH_c) es de $86,86 \text{ J/g}$. Para el cálculo del grado de cristalinidad (X_c), se emplea la Ec. 6 recogida en el Apartado 4.4.1, recordando que este se define como el cociente entre la mencionada entalpía y el valor de la entalpía teórica que se obtendría si

el polímero fuera 100% cristalino (ΔH_m^0), que para el polipropileno toma un valor de 209 J/g. Por lo tanto, el grado de cristalinidad del material analizado es:

$$X_c = \frac{\Delta H_c}{\Delta H_m^0} = \frac{86,86}{209} = 0,4156 = \mathbf{41,56\%}$$

En conclusión, toda la información que permite caracterizar el material mediante la calorimetría diferencial de barrido se recoge en la Tabla 5.1.1-1:

Tabla 5.1.1- 1 Resultados obtenidos en la calorimetría diferencial de barrido

Temperatura de fusión (°C)	167,5
Temperatura de cristalización (°C)	112,2
Grado de cristalinidad (%)	41,56

La temperatura de fusión es aquella en la que el material pasa a un estado termoplástico y debe ser superada en el proceso de inyección para que fluya de manera óptima. La temperatura de cristalización es aquella en la que los polímeros semicristalinos experimentan una disminución considerable y repentina de su volumen durante su enfriamiento. Mientras que el grado de cristalinidad representa qué porcentaje del material cuenta con regiones cristalinas caracterizadas por la ordenación y compacidad de las moléculas. Este grado de cristalinidad influye fuertemente en las propiedades mecánicas del material.

5.1.2. Ensayo de termogravimetría:

El ensayo de termogravimetría se ha utilizado en este proyecto con el objetivo de obtener la temperatura de degradación del polímero empleado para la fabricación de las piezas. Para ello, se calienta el material en una atmósfera de aire y se recoge la medición de la masa de polímero restante en el equipo según este se va degradando, en función de la temperatura a la que se encuentra. En la Figura 5.1.2-1 se muestra la curva TGA, que recoge la variación del porcentaje de masa de material con respecto a la masa inicial, para cada temperatura:

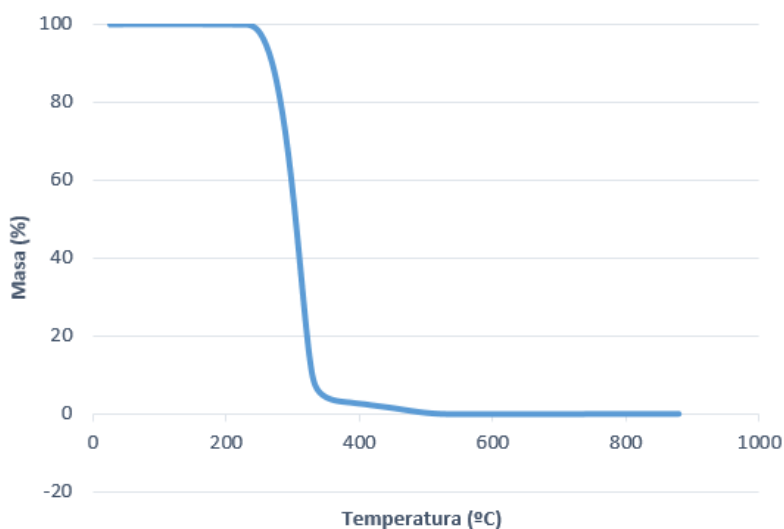


Figura 5.1.2- 1 Curva TGA del polipropileno estudiado

Por otro lado, derivando dicha curva con respecto a la temperatura se obtiene la velocidad de degradación del polímero en función de la temperatura. La curva que representa dicha derivada se denomina curva DTG y se muestra en la Figura 5.1.2-2:

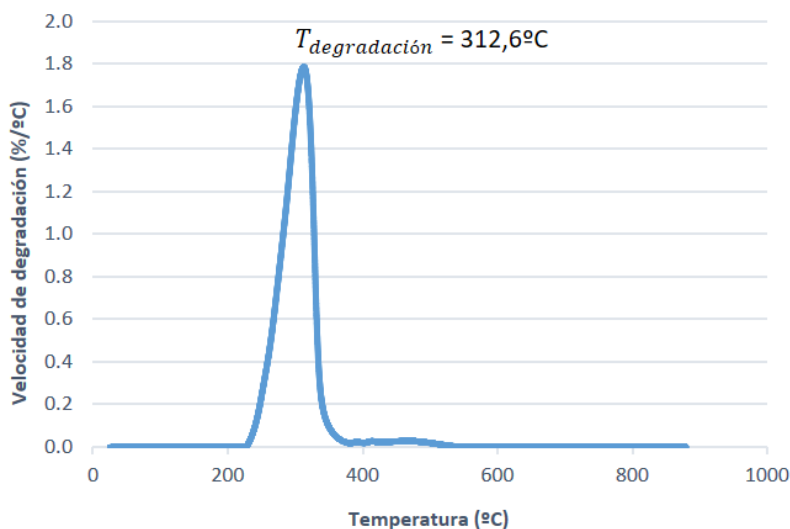


Figura 5.1.2- 2 Curva DTG del polipropileno estudiado

La temperatura con la que tiene lugar el máximo valor de velocidad de degradación se corresponde con la temperatura de degradación del polímero. Como se observa en la gráfica, esta toma un valor de **312,6°C**.

En conclusión, de este ensayo se obtiene que la temperatura de degradación del material es de 312,6°C. De cara al proceso de inyección, es importante controlar la temperatura a la que se encuentra el cilindro para nunca superar este valor, puesto que provocaría la degradación del polímero con la consiguiente pérdida de sus propiedades.

5.1.3. Ensayo de fluidez:

La realización del ensayo de fluidez tiene como objetivo fundamental el estudio del comportamiento viscoso del polímero a distintas temperaturas. La selección de las temperaturas del ensayo se hizo partiendo de la premisa de que el material debe estar fundido.

Para cada temperatura se toman hasta doce muestras. Dado que en la inyección el material debe encontrarse a una temperatura al menos 10°C superior a la temperatura de fusión con el fin de garantizar la homogeneización del estado líquido del material, se comenzaron a hacer los ensayos a 180°C. Sin embargo, no se detectó fluidez suficiente del material, por lo que se desechó esta temperatura de trabajo. Como límite superior, a temperaturas mayores de 250°C el material fluía excesivamente, además de generar gran cantidad de gases durante el ensayo, denotando que no conviene trabajar a temperaturas tan altas. En la Figura 5.1.3-1 se tiene una representación visual los índices de fluidez obtenidos para cada temperatura analizada:

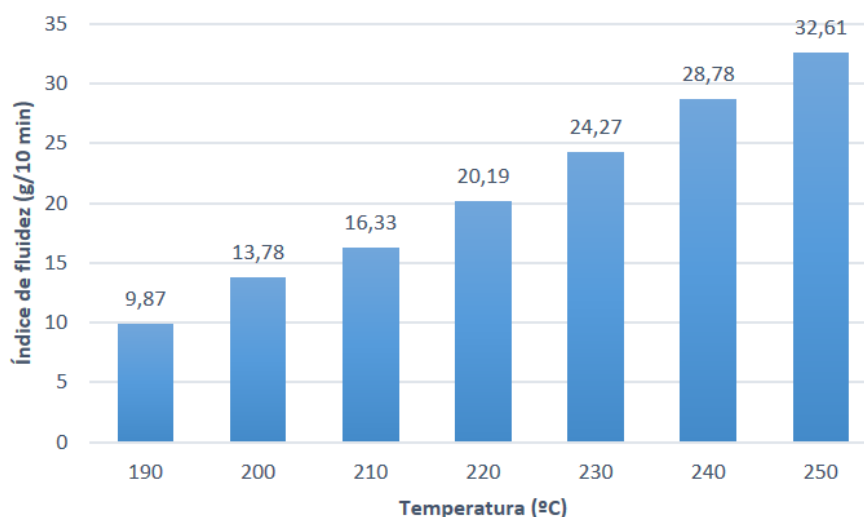


Figura 5.1.3- 1 Índice de fluidez según la temperatura

Como se puede observar, el índice de fluidez aumenta de manera lineal con la temperatura del polímero, incrementándose aproximadamente con un ritmo de 4 g/10 min cada 10°C. Esto se debe a que el calentamiento del material da lugar a una disminución de su viscosidad, al reducirse las fuerzas intermoleculares existentes entre las cadenas poliméricas.

El índice de fluidez cuantifica la facilidad que presenta el polímero para fluir, por lo que para ejecutar su inyección sin la necesidad de emplear presiones muy elevadas conviene que tenga un valor alto. En resumen, cuanto mayor sea la temperatura de inyección, más facilidad para fluir presenta el polipropileno y menos presión es necesaria emplear para inyectarlo con éxito. Sin embargo, tiene un límite, pues a temperaturas excesivamente altas hay un alto riesgo de presencia de rebabas y de generación de gases durante el proceso.

Cabe destacar la gran concordancia entre la ficha técnica del material (índice de fluidez de 25 g/10 min) y el ensayo experimental (24,27 g/10 min).

5.2. PARÁMETROS DEL PROCESO DE INYECCIÓN:

En esta sección se muestran los valores obtenidos para ser introducidos en la máquina de inyección, con el fin de regular el proceso.

5.2.1. Parámetros a fijar:

En este apartado se muestran aquellas variables cuyo valor se ha introducido en la máquina y se ha mantenido constante en la fabricación de las piezas. A continuación, se muestra para cada parámetro cómo se ha calculado y el valor obtenido:

Desplazamiento del husillo:

El desplazamiento del husillo determina la cantidad de material que se va a inyectar en la cavidad del molde. Para ello, es necesario calcular el volumen de la pieza y los canales de alimentación, ya que este deberá ser el volumen de polipropileno a inyectar. Mediante

el software *MoldFlow* de *Autodesk* y el modelo CAD de la pieza se obtuvo que el volumen total a inyectar es de $21,0215 \text{ cm}^3$.

Sin embargo, en la máquina no se puede introducir el volumen a inyectar, es necesario calcular el desplazamiento del husillo equivalente. La inyectora con la que se va a trabajar tiene una capacidad total de inyección de 95 cm^3 por cada inyección y presenta un desplazamiento total del husillo de 160 mm . Por lo tanto, se obtiene que el desplazamiento total del husillo necesario para inyectar $21,0215 \text{ cm}^3$ es de **$35,4 \text{ mm}$** . En la Figura 5.2.1-1 se puede observar el indicador del desplazamiento del husillo, donde se aprecia que su valor máximo es 160 mm :

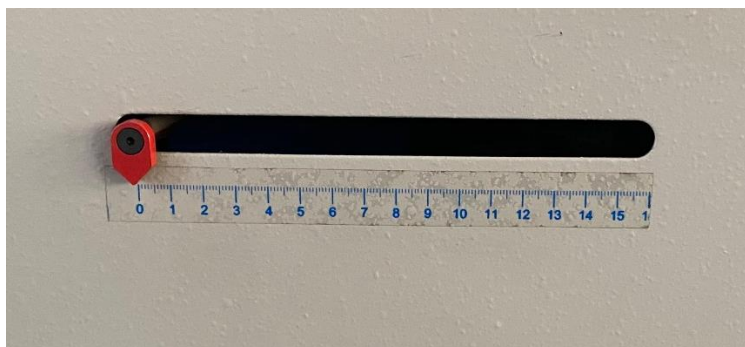


Figura 5.2.1- 1 Indicador del desplazamiento del husillo de la unidad de inyección

Cojín de inyección:

Para la obtención del valor a utilizar de cojín de inyección se debe tener en cuenta la ocupación de la unidad de inyección. En este caso, como la máquina trabaja con una ocupación menor al 50% de su capacidad (se inyectarán 21 cm^3 , siendo 95 cm^3 los correspondientes a la ocupación total), el cojín debe ser un 10% del volumen total a inyectar, según las recomendaciones recogidas en el Apartado 1.1.4.

Por lo tanto, se obtiene un cojín de **$2,102 \text{ cm}^3$** , que se traduce en un desplazamiento adicional del husillo de **$3,54 \text{ mm}$** .

En la inyectora es necesario introducir el valor total que se debe desplazar el husillo, incluyendo el cojín de inyección. De modo que si se suman los desplazamientos debidos al cojín de inyección y al volumen a inyectar se obtiene un desplazamiento total del husillo de $38,94 \text{ mm}$, que se redondea a **39 mm** . Este será el valor a introducir en la máquina.

Descompresión:

El cálculo de las descompresiones necesarias en el proceso de inyección estará también basado en las recomendaciones del Apartado 1.1.4. La primera descompresión siempre toma un valor igual al 20% del volumen inyectado, sin contabilizar el cojín de inyección. Se obtiene un volumen de $4,2043 \text{ cm}^3$. Nuevamente, en la máquina se debe introducir el desplazamiento del husillo equivalente, es decir, **$7,08 \text{ mm}$** .

El cálculo de la segunda descompresión es dependiente del diámetro del husillo. En el presente proyecto se dispone de una máquina con un husillo de diámetro igual a 30 mm . Al ser este diámetro menor que 75 mm , la segunda descompresión deberá ser igual al 10% del mencionado diámetro. De modo que se tiene una segunda descompresión de **3 mm** .

Contrapresión:

Para polímeros convencionales, como el polipropileno, se emplea una contrapresión media, comprendida entre 10 bar y 20 bar. En este caso se opta por **18 bar**.

Tiempo de enfriamiento:

El tiempo de enfriamiento necesario es un parámetro fuertemente dependiente de la temperatura a la que se inyecta el material. Por lo tanto, no se puede tomar como constante en todas las piezas. A pesar de ello, para minimizar su influencia en la obtención de los resultados se ha optado por calcular un tiempo de enfriamiento único para cada una de las temperaturas de inyección que se van a emplear. Para su cálculo, se ha empleado la Ec. 1 recogida en el Apartado 1.1.4. Esta fórmula permite el cálculo del tiempo de enfriamiento a partir de los siguientes datos:

- Espesor de la pieza (h): Para considerar el caso más restrictivo se ha escogido el mayor espesor que presenta la pieza, que es la zona que requiere más tiempo de enfriamiento. Este espesor es igual a 3 mm.
- Temperatura del molde (T_w): Tras algunas pruebas, se ha escogido la temperatura media a la que se encuentra el molde en el transcurso de las inyecciones. Esta temperatura es de 50°C.
- Temperatura de eyección del material (T_e): Se define como la temperatura de cristalización del polímero empleado. Su valor es de 112°C y su procedimiento de cálculo queda recogido en el Apartado 5.1.1.
- Temperatura del material al comienzo del enfriamiento (T_m): Su valor es igual a la temperatura de inyección del material. Esta temperatura varía en los distintos ensayos y sus valores son 190°C, 200°C, 210°C, 220°C, 230°C, 240°C y 250°C, como se explica en el Apartado 5.2.3.
- Difusividad térmica del polipropileno (α): Para su cálculo se ha empleado la Ec. 2 recogida en el Apartado 1.1.4. De la ficha técnica del material se obtiene el valor de su densidad ($\rho = 0.902 \text{ kg/m}^3$), mientras que de las propiedades térmicas típicas que suele presentar el polipropileno se aproxima el valor de calor específico y de conductividad térmica ($C_p = 2 \text{ J/kgK}$, $k = 0,22 \text{ W/mK}$, respectivamente). Con ello, la difusividad obtenida es igual a:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} = \frac{0,22}{0,902 \cdot 2} = 0,122 \text{ m}^2/\text{s}$$

Con todo ello, el cálculo del tiempo de enfriamiento (t_c) para cada temperatura de inyección (T_m) queda como:

$$t_c = \frac{h^2}{\alpha \cdot \pi^2} \cdot \ln \left(\frac{4}{\pi} \cdot \left(\frac{T_m - T_w}{T_e - T_w} \right) \right) = \frac{3^2}{0,122 \cdot \pi^2} \cdot \ln \left(\frac{4}{\pi} \cdot \left(\frac{T_m - 50}{112 - 50} \right) \right)$$

Por tanto, en la Tabla 5.2.1-1 se recoge el valor del tiempo de enfriamiento necesario para cada temperatura de inyección:

Tabla 5.2.1- 1 Tiempo de enfriamiento requerido para cada temperatura de inyección

Temperatura de inyección (°C)	190	200	210	220	230	240	250
Tiempo de enfriamiento (s)	7,9	8,4	8,9	9,3	9,8	10,2	10,6

Tiempos de apertura y cierre del molde:

Al variar la geometría a fabricar, pero no el molde empleado, se toman los tiempos utilizados en el proyecto anterior, siendo **2,2 segundos** tanto el tiempo de apertura del molde como el tiempo de cierre.

A modo de resumen, en la Tabla 5.2.1-2 se muestra el valor de todos los parámetros que permanecerán constantes durante la fabricación de las piezas:

Tabla 5.2.1- 2 Valor de los parámetros constantes en el proceso de inyección

Parámetros constantes en el proceso de inyección	Valores fijados
Desplazamiento total del husillo	39 mm
Primera descompresión	7,08 mm
Segunda descompresión	3 mm
Contrapresión	18 bar
Tiempo apertura molde	2,2 s
Tiempo cierre molde	2,2 s
Tiempo inyección	3 s

5.2.2. Parámetros de estudio:

Para la realización de este estudio, es necesario identificar aquellas variables de las que se desea evaluar su influencia en la aparición de defectos en las piezas fabricadas.

Los parámetros del proceso de inyección que se han considerado para evaluar su impacto en la aparición de los distintos defectos en las piezas son:

- Temperatura del polímero en el momento de la inyección (°C).
- Presión de inyección (bar).
- Presión de mantenimiento (% respecto a la presión de inyección).
- Tiempo de mantenimiento (s).

Se han escogido estos parámetros porque son aquellos que tienen una relación más directa con las condiciones en las que se encuentra el polímero durante el llenado del molde y por tanto con la aparición de defectos durante el enfriamiento del mismo, tal y como se demostró en el Apartado 1.3.

5.2.3. Matriz de ensayos:

Una vez definidas las variables a estudiar, se debe decidir qué valores tomarán estas durante el estudio. El objetivo es definir una matriz de ensayos con todas las posibles combinaciones de estos parámetros. A continuación, se explica el procedimiento seguido en cada una de las variables para definir los valores que tomarán en el proyecto:

Temperatura de inyección (°C):

El rango de temperatura escogido es el comprendido entre 190°C y 250°C, puesto que debe estar entre la temperatura de fusión y de degradación del polímero. Asimismo, mediante el ensayo de fluidez recogido en el Apartado 5.1.3 se ha comprobado que para estas temperaturas el polímero presenta una viscosidad adecuada para su inyección.

A su vez, se define una diferencia entre ellas de 10°C, puesto que se requiere una variación suficientemente grande como para poder observar cambios significativos en los resultados. En conclusión, se realizarán ensayos para los siguientes valores de temperatura: 190°C, 200°C, 210°C, 220°C, 230°C, 240°C y 250°C.

Presión de inyección (bar):

Para obtener los valores de presión de inyección con los que se desarrollarán los ensayos se han realizado pruebas previas. En el estudio que se va a llevar a cabo, siempre se busca lograr el llenado completo de la cavidad del molde, puesto que si no se obtiene una pieza íntegra, no se pueden analizar sus defectos. Por lo tanto, para definir las presiones de inyección mínima y máxima de dichos ensayos, se deben determinar los siguientes valores de presión:

- Presión más baja que garantiza el llenado para la temperatura máxima (250°C). De esta prueba se obtendrá la **presión mínima** de la matriz de ensayos. Si esta presión es la más pequeña que garantiza el llenado en las condiciones más favorables para la fluidez del material (máxima temperatura), cualquier presión con un valor inferior dará lugar a un llenado incompleto para cualquiera de las temperaturas de ensayo, ya que no sería capaz de llenar el molde ni siquiera en el caso más favorable.
- Presión más baja que garantiza el llenado para la temperatura mínima (190°C). De este caso se obtendrá la **presión máxima** de los ensayos. El razonamiento es similar al caso anterior: se obtiene una presión que garantiza el llenado en el caso más desfavorable desde el punto de vista de la fluidez (mínima temperatura), de modo que cualquier presión superior llenará completamente la cavidad del molde para dicha temperatura y para el resto de temperaturas de ensayo, que son casos más favorables.

Para obtener la presión mínima de los ensayos se realizaron inyecciones con las condiciones más favorables para que el polipropileno fluya: se inyectó a 250°C, con una duración de la fase de mantenimiento suficientemente larga para garantizar que se llena de material hasta la solidificación del punto de entrada. Los resultados obtenidos muestran que con una presión de 40 bar tiene lugar el llenado completo de la cavidad, sin embargo, con una presión de 35 bar se obtiene un llenado incompleto. Por lo tanto, la presión mínima de los ensayos será de 40 bar. En la Figura 5.2.3-1 se muestra un ejemplo

de dichas muestras. En la parte superior aparece una pieza inyectada con 35 bar que no garantiza el llenado, mientras que en la parte inferior aparece una pieza inyectada a 40 bar que sí llena el molde:



Figura 5.2.3- 1 Piezas inyectadas a 250°C con presiones de inyección de 35 bar (superior) y 40 bar (inferior)

Por otro lado, para obtener la presión máxima de los ensayos se realizaron inyecciones con las condiciones más desfavorables para la fluidez del polipropileno: se inyectó a 190°C, con una fase de mantenimiento muy breve para que no tenga gran influencia en el llenado de la pieza.

Los resultados obtenidos muestran que con una presión de 70 bar la cavidad del molde se llena completamente, pero que con 65 bar tiene lugar un llenado incompleto. De modo que la presión máxima de los ensayos será de 70 bar. En la Figura 5.2.3-2 aparecen dos muestras representativas de esta prueba. En la parte superior de la imagen aparece una pieza inyectada a 65 bar que da lugar a una falta de llenado y en la parte inferior de la imagen aparece una pieza inyectada a 70 bar que da lugar a un llenado completo:



Figura 5.2.3- 2 Piezas inyectadas a 190°C con presiones de inyección de 65 bar (superior) y 70 bar (inferior)

Por último, se definen dos presiones intermedias dentro del rango establecido por las presiones mínima y máxima. Dichas presiones toman los valores de 50 bar y 60 bar. Se considera que con estos saltos de presión entre un ensayo y otro se pueden observar diferencias significativas en las piezas sin perder información.

En conclusión, se realizarán ensayos para los siguientes valores de presión de inyección: 40 bar, 50 bar, 60 bar y 70 bar.

Presión de mantenimiento (%):

La presión de mantenimiento se representa como un porcentaje de la presión de inyección. Para poder evaluar su influencia, se define un caso con una elevada presión de mantenimiento, cercana a la presión de inyección, un caso con un valor muy bajo de presión de mantenimiento y un caso intermedio.

Por lo tanto, los valores escogidos de presión de mantenimiento son 80%, 50% y 20%, todos ellos porcentajes con respecto a la presión de inyección.

Tiempo de mantenimiento (s):

Para analizar la influencia del tiempo de mantenimiento se toman variaciones de 2 segundos, realizando ensayos con un tiempo de mantenimiento de 2 segundos, de 4 segundos y de 6 segundos.

En un principio se iban a desarrollar también ensayos con un tiempo de mantenimiento muy elevado, del orden de 12 segundos. Sin embargo, en las pruebas realizadas para la elaboración de la matriz de ensayos se detectó que a partir de los 6 segundos de tiempo de mantenimiento no se observan diferencias significativas en el resultado final de la pieza.

Esto puede observarse en la Figura 5.2.3-3, en la que se muestran dos piezas que se han inyectado a 250°C, con una presión de 45 bar y una presión de mantenimiento del 80%. La pieza que se encuentra en la parte superior de la imagen ha tenido un tiempo de mantenimiento de 6 segundos, mientras que la pieza de la parte inferior ha tenido un mantenimiento de 12 segundos. Como se puede apreciar en la imagen, no se observa ninguna variación importante en la pieza, porque se ha producido con anterioridad el sellado del punto de entrada del material. Por lo tanto, cualquier aumento de la duración de esta fase supone incrementos innecesarios en el ciclo de inyección.

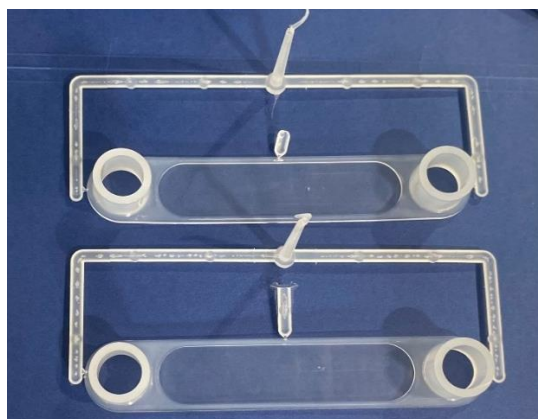


Figura 5.2.3- 3 Piezas inyectadas cuyo único parámetro distinto es el tiempo de mantenimiento: 6 s (superior) y 12 s (inferior)

Matriz de ensayos:

Con toda esta información, en la Tabla 5.2.3-1 se muestra la matriz de ensayos obtenida. En dicha tabla se pueden observar los valores que tomarán los parámetros de inyección a estudiar:

Tabla 5.2.3- 1 Matriz de ensayos del proyecto

Temperatura de inyección (°C)	Presión de inyección (bar)	Presión de mantenimiento (%)	Tiempo de mantenimiento (s)
190	40	20	2
200	50	50	4
210	60	80	6
220	70		
230			
240			
250			

El número total de combinaciones es 252, que será por tanto el número total de condiciones de fabricación con las que se deberán inyectar las piezas para estudiar sus defectos. Para asegurar que las piezas sobre las que se van a realizar las mediciones son fiables, para cada combinación de parámetros se fabrican cinco piezas, guardándose las dos que resulten más representativas. En ocasiones, existe mucha variabilidad en los defectos que aparecen en las piezas, por lo que es necesario producir más hasta que se observe una tendencia. Por lo tanto, el número total de piezas fabricadas asciende a cerca de 1300 piezas. Las piezas sobrantes también son almacenadas para su posterior triturado, que posibilita la obtención de nuevos pellets de material reciclado.

5.3. ANÁLISIS TÉRMICO DEL MOLDE Y DE LA PIEZA:

Este apartado busca analizar los resultados derivados de la medición de la temperatura de las superficies del molde y de las piezas durante la fabricación.

En lo relativo a la temperatura del molde, se observan cambios notables exclusivamente con la modificación de dos variables. Una de ellas es la temperatura de inyección y la otra es el número de inyecciones realizadas. En ambos casos, los cambios significativos en la temperatura del molde no requieren excesivo tiempo para ser apreciados, debido a la elevada conductividad térmica del aluminio, que da lugar a una baja inercia térmica. A su vez, no se aprecia variación entre la temperatura del molde antes y después de cada inyección.

Con los resultados obtenidos, se observa que aumentos en la temperatura a la que se inyecta el polímero dan lugar a incrementos en la temperatura del molde. Esto se debe a que el aluminio del molde es el encargado de evacuar el calor de la pieza durante su enfriamiento. Por lo tanto, cuanto mayor sea la temperatura de inyección, mayor es la energía térmica que tiene la pieza y que es transferida en forma de calor al molde. A su vez, para temperaturas más altas se establece un mayor tiempo de enfriamiento, lo que provoca un aumento en el tiempo que la pieza está en contacto con el molde, incrementando el tiempo en el que se está transfiriendo calor de la pieza al molde.

En la Figura 5.3-1 se observa la variación de la temperatura del molde con la temperatura de inyección. Se muestra el promedio y la desviación típica para cada temperatura de inyección:

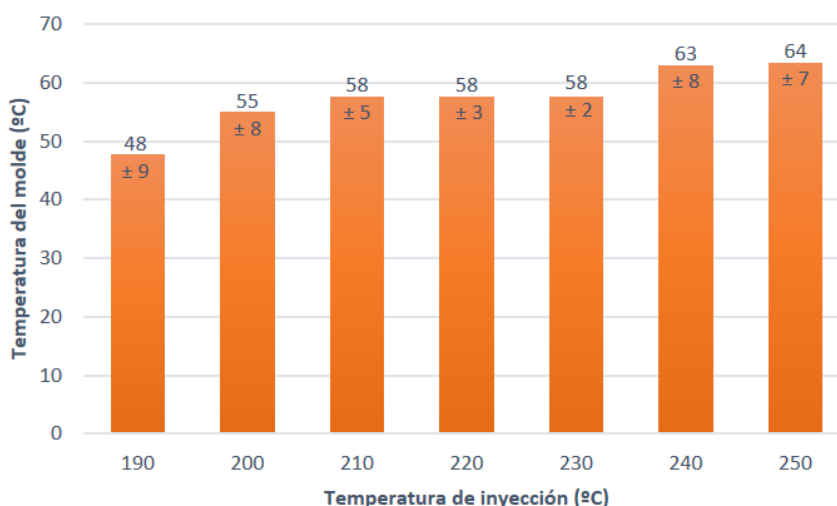


Figura 5.3- 1 Promedio de la temperatura del molde para cada temperatura de inyección

El otro parámetro que modifica considerablemente la temperatura del molde es el número de pieza inyectadas. Esto confirma la baja inercia térmica del aluminio empleado para la fabricación del mismo, provocando que se caliente con facilidad y rapidez. En la ejecución de este proyecto, el número de piezas inyectadas de forma consecutiva se encuentra en torno a 100. En estos periodos, no se aprecia una estabilización de la temperatura del molde, siendo siempre creciente. A modo de ejemplo, en la Figura 5.3-2 se aprecia el perfil de temperaturas a las que se encuentra el molde en función del número de piezas inyectadas de manera consecutiva, en este ejemplo, para una temperatura de inyección de 200°C:

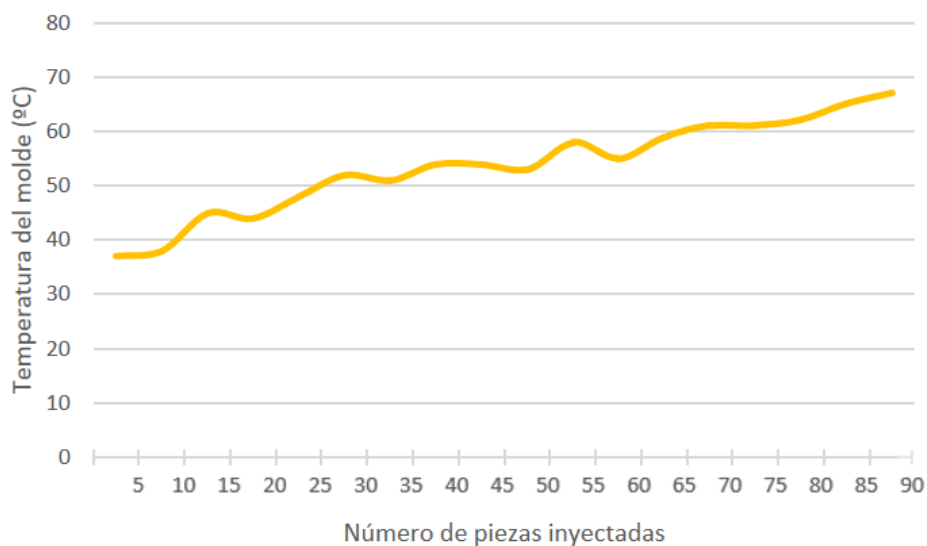


Figura 5.3- 2 Temperatura del molde según el número de piezas consecutivas inyectadas

Por otro lado, en lo relativo a la temperatura que tiene la pieza en el momento de su desmoldeo, se ha observado que no presenta apenas variación con el resto de parámetros. Esta se encuentra siempre en torno a los 29°C, con oscilaciones de $\pm 2^\circ\text{C}$ que no presentan tendencia alguna con la temperatura de inyección, la presión de inyección o las condiciones de mantenimiento.

En principio, puede parecer que un aumento de la temperatura de inyección debería elevar la temperatura de la pieza tras el proceso, sin embargo, como se ha realizado una corrección para cada temperatura del tiempo de enfriamiento necesario para que tenga lugar una solidificación óptima, se observa que la temperatura a la que la pieza es eyectada permanece constante.

5.4. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE LA PIEZA EN LA APARICIÓN DE DEFECTOS:

En esta sección se busca determinar la influencia que tienen los distintos elementos geométricos con los que cuenta la biela en la aparición de defectos sobre las piezas. Se ha identificado cómo afectan cada uno de los siguientes elementos, detectando qué defectos se ven favorecidos en estas zonas:

- En los **cilindros** tiene lugar una alta concentración de rechupes. Esto puede tener su origen en el mayor espesor de esta zona de la pieza. En primer lugar, se da la solidificación de las capas exteriores. Posteriormente, cuando ocurre la solidificación de las capas internas, estas experimentan una contracción que tira del material solidificado en el exterior, provocando hendiduras en dichas superficies. A su vez, los cilindros cuentan con agujeros que también promueven la aparición de rechupes. Esto se debe a que alrededor de los machos del molde el material no se distribuye de manera uniforme, provocando que unas zonas se solidifiquen después que otras, deformando a las primeras en su contracción. También ocurre línea de soldadura, al ser el punto de encuentro de dos flujos, aunque no se ha podido cuantificar la presencia de este defecto.
- En la **base de la biela**, debido a su menor espesor y a su mayor distancia hasta los puntos de inyección, es donde se concentran las zonas donde falta material cuando tiene lugar un llenado incompleto de la cavidad. Esto se debe a que pequeños espesores aumentan la fricción en el polímero, reduciendo su capacidad para fluir. Además, durante el proceso de inyección hay una caída de presión, experimentando la menor presión en las últimas zonas de llenado de la cavidad. A su vez, el tiempo necesario para que tenga lugar la solidificación es función del espesor. Por tanto, pequeños espesores provocan la solidificación prematura del material antes de llenar toda la cavidad, siendo necesario para evitarlo un aumento de la temperatura de inyección o de la presión con la que se inyecta.

Esta zona también experimenta alabeo, es decir, se curva una superficie que debería ser plana. Se debe a que es un elemento que cuenta con una longitud muy superior a las otras, dando lugar a un enfriamiento desigual a lo largo de dicha dimensión, induciendo en el enfriamiento tensiones residuales que deforman la pieza. Adicionalmente, también hay línea de soldadura en la base de la biela por el empleo de dos puntos de inyección

- En la **zona lateral de la base de la pieza** se detecta que aparecen muchas burbujas de aire retenido de muy pequeño diámetro, para bastantes condiciones de inyección. Se trata de una zona de poca anchura y espesor pequeño, aunque mayor que en la zona del cajeadado. Esto da lugar a que funcione como un conducto estrecho. Los conductos favorecen la formación de burbujas debido a que cuentan

con más dificultades de ventilación. Este aumento de burbujas en conductos se observa también en los canales de alimentación del molde.

En lo relativo a cómo ha afectado el cambio introducido en la geometría de la biela en este proyecto con respecto a estudios anteriores, es decir, el cajeadado en la base de la biela, se han identificado tendencias claras en la aparición de defectos debido esta modificación.

En primer lugar, los laterales de la biela dan lugar a un aumento muy significativo en las burbujas que aparecen en la pieza. El análisis de estas burbujas se lleva a cabo en el Apartado 5.5.2, pero cabe destacar que para un alto número de condiciones de fabricación son muchas las burbujas que surgen concentradas en estos laterales. Sin embargo, las burbujas que se formaban en las piezas sin cajeadado eran considerablemente menores y aparecían de forma aislada.

Asimismo, la considerable reducción del espesor en la base debido al cajeadado da lugar a una gran disminución en los rechupes que aparecen en la base de las bielas. Muchas de las piezas fabricadas con la geometría sin cajeadado presentaron rechupes notables en su base, sin embargo, prácticamente la totalidad de las bielas fabricadas con el cajeadado no presentan rechupes en la base. Los pequeños espesores reducen los rechupes debido a que no hay gradientes térmicos en dicho espesor, solidificándose simultáneamente y por tanto, dando lugar a que la contracción ocurra a la vez en todo el espesor.

Por otro lado, también ha sido posible determinar la influencia de una imperfección existente en una de las superficies del molde, siendo esta una pequeña depresión. El defecto al que da lugar es burbujas de aire retenido. Esto se debe a que el flujo de polímero cambia su dirección al pasar por la depresión, volviéndose más turbulento y atrapando aire en su interior que no puede ser evacuado por el sistema de ventilación.

Se ha detectado que las condiciones de inyección tienen una elevadísima influencia en el efecto que tiene esta imperfección del molde. En todos los casos se genera una única burbuja, pero su área es enormemente dependiente de la temperatura de inyección y de la presión de inyección. En la Figura 5.4-1 se muestra el promedio del área de esta burbuja para cada temperatura de inyección, mientras que en la Figura 5.4-2 se muestra lo propio para cada presión de inyección, reflejando la alta dispersión de los resultados.

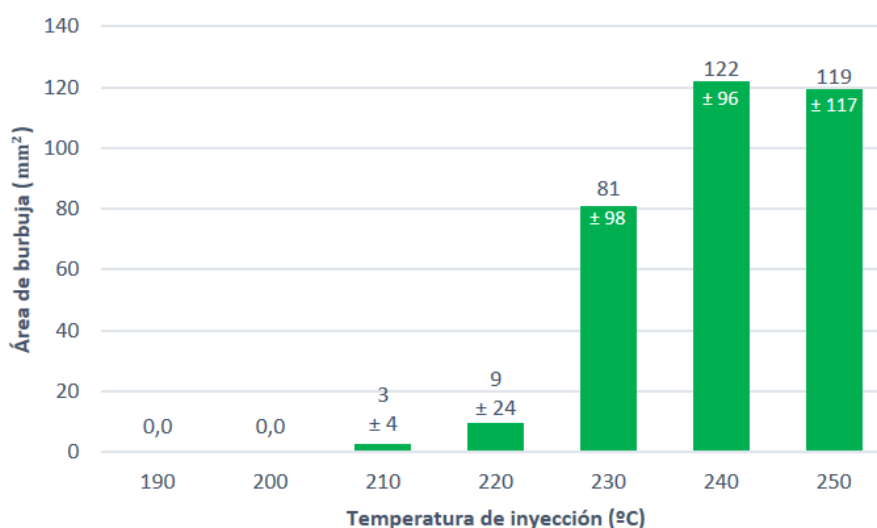


Figura 5.4- 1 Promedio del área de la burbuja generada por la depresión en el molde para cada temperatura de inyección

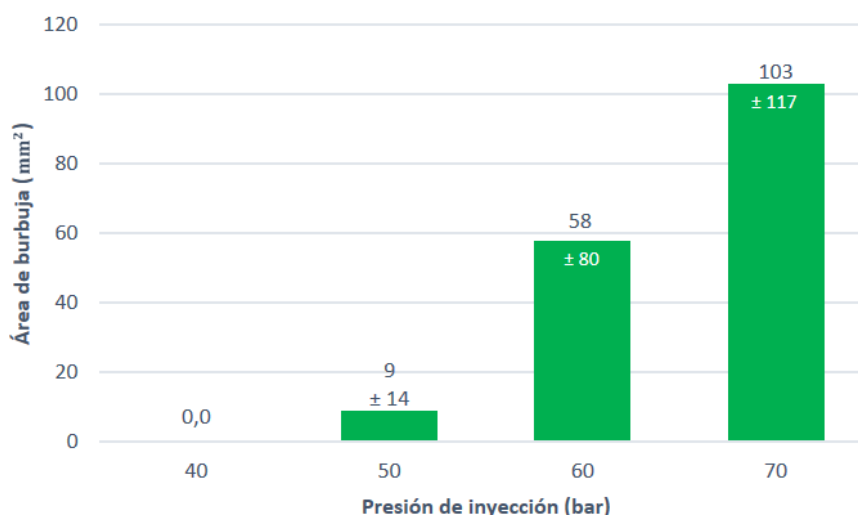


Figura 5.4- 2 Promedio del área de la burbuja generada por la depresión en el molde para cada presión de inyección

Como se puede observar, en ambos casos el área de la burbuja aumenta notablemente con la temperatura y con la presión de inyección, siendo nula para las temperaturas y presiones más bajas. Esto es debido a que altas temperaturas incrementan la fluidez del polímero en la inyección. De modo que cuanto menor sea la viscosidad del material, más le afectará a su flujo cualquier pequeño cambio en la superficie del molde, aumentando la turbulencia del mismo y favoreciendo la creación y crecimiento de la burbuja. Las altas presiones también contribuyen a que sea mayor la turbulencia al pasar por la depresión del molde.

5.5. ANÁLISIS DE DEFECTOS EN LAS PIEZAS FABRICADAS:

Toda la información obtenida en las mediciones efectuadas sobre las piezas ha sido analizada, con el objetivo de estudiar la influencia de cada uno de los parámetros del proceso de inyección en la aparición de defectos. Se busca evaluar qué parámetros son aquellos que tienen más influencia en cada uno de los defectos, así como qué valores de cada variable favorecen y minimizan la aparición de los mismos.

En la presente sección, se muestran los resultados obtenidos en las mediciones y el análisis realizado sobre ellos para cada uno de los defectos que aparecen en las piezas. Para clarificar el análisis de los resultados, para cada uno de los defectos se establece una valoración numérica en una escala de 0 a 10. Se asigna el valor 0 al mínimo de los datos tomados para cada defecto y 10 al máximo, distribuyendo linealmente los valores intermedios.

5.5.1. Falta de llenado:

Se ha detectado que para numerosas condiciones de fabricación tiene lugar un llenado incompleto de la cavidad del molde. Tras los ensayos realizados, se ha comprobado que sólo afecta a la falta de llenado la combinación de temperatura y presión de inyección. Los valores que toman las variables relacionadas con la etapa de mantenimiento resultan irrelevantes de cara a la aparición de este defecto.

En la Figura 5.5.1-1 se muestra una matriz que recoge todas las posibles combinaciones de presión y temperatura de inyección. Toman color rojo aquellas combinaciones de parámetros que dan lugar a falta de llenado, color verde aquellas que dan lugar a un llenado completo del molde y color naranja aquellas que provocan un llenado sin confianza, es decir, en algunas ocasiones llena y en otras no, sin observarse ninguna estabilización:

		Presión de inyección (bar)			
		40	50	60	70
Temperatura de inyección (°C)	190	Red	Red	Red	Green
	200	Red	Red	Green	Green
	210	Red	Red	Green	Green
	220	Red	Orange	Green	Green
	230	Red	Green	Green	Green
	240	Red	Green	Green	Green
	250	Green	Green	Green	Green

Figura 5.5.1- 1 Llenado completo o incompleto de las piezas según sus parámetros de inyección

Como se puede observar, cuanto mayor es la temperatura del polímero en su inyección, menor presión es necesaria aplicar para que esta se produzca con éxito. Con la temperatura más elevada, 250°C, cualquier presión de inyección empleada en el estudio logra llenar el molde, sin embargo, con la temperatura más baja, 190°C, es necesario aplicar la presión más elevada para llenar el molde.

El motivo fundamental por el que ocurre esto se encuentra en la fluidez que presenta el polímero en la inyección. En el proceso, se impulsa al polipropileno en estado fundido para que rellene el molde, sin embargo, cuanto menor es el índice de fluidez de este, más fricción interna y rozamiento con las paredes experimenta, provocando que no fluya y se solidifique antes de llenar el molde.

Las altas temperaturas aumentan la fluidez del material al romper las fuerzas intermoleculares existentes entre las cadenas poliméricas del polipropileno, facilitando así el llenado del molde y requiriendo menos fuerza, en forma de presión, para lograrlo.

Para una temperatura dada, se demuestra que elevar la presión ayuda a llenar el molde, puesto que contribuye a vencer las resistencias que presenta el flujo de polímero causadas por su viscosidad.

5.5.2. Burbujas de aire retenido:

En lo relativo a las burbujas de aire retenido que aparecen en las piezas, se estudian dos variables para caracterizarlas: el área total de burbujas y el número de burbujas. En la Tabla 5.5.2-1 se recogen algunos datos relevantes de las burbujas que presentan las piezas fabricadas:

Tabla 5.5.2- 1 Resultados de la medición de burbujas de aire retenido

Área media de burbujas (mm ²)	Área mínima de burbujas (mm ²)	Área máxima de burbujas (mm ²)	Número medio de burbujas	Número mínimo de burbujas	Número máximo de burbujas
76 ± 93	0	332,84	10 ± 20	0	96

De cara al análisis del área total de burbujas, en la Figura 5.5.2-1 se observa la valoración numérica de 0 a 10 de las mediciones ejecutadas en todas las piezas. Dicha gráfica se encuentra recogida en el Anexo 6, ampliada para verla con mayor claridad.

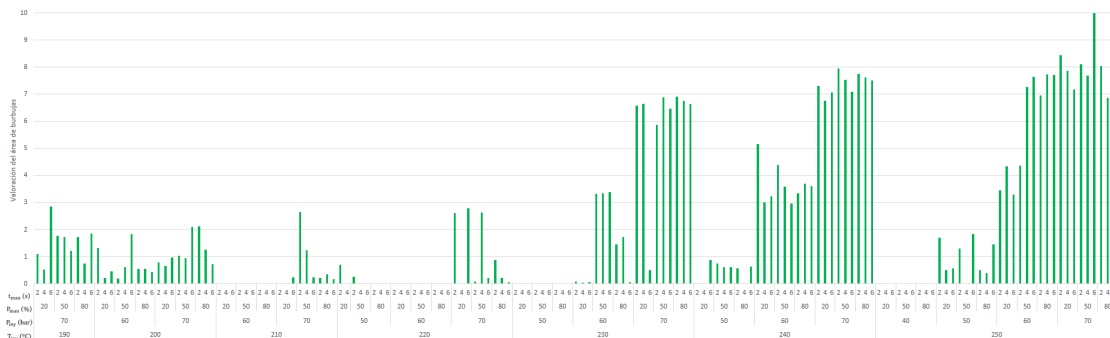


Figura 5.5.2- 1 Valoración del área de burbujas de aire retenido de todas las piezas fabricadas según sus parámetros de inyección

Se puede apreciar una tendencia clara del área de burbujas en las piezas con la temperatura de inyección, así como con la presión de inyección dentro de cada una de las temperaturas. Para realizar un análisis más correcto, se va a estudiar la influencia de estas dos variables por separado.

En la Figura 5.5.2-2 se muestra el promedio de la valoración numérica del área de las burbujas según la temperatura a la que ha sido inyectada la biela:

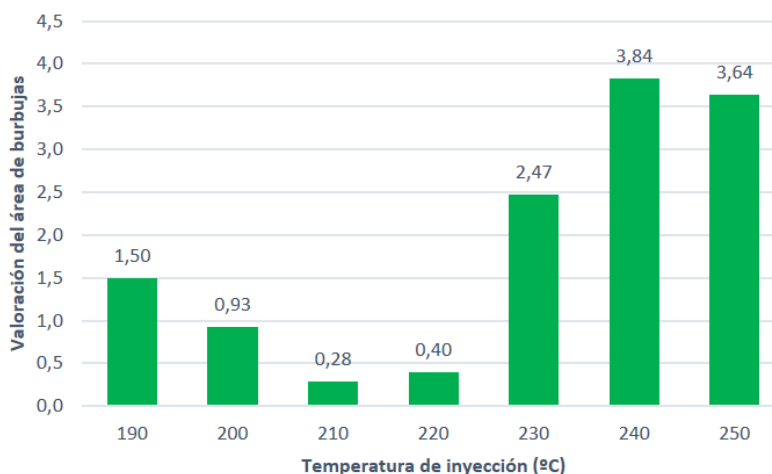


Figura 5.5.2- 2 Promedio de la valoración del área de burbujas para cada temperatura de inyección

Es posible detectar una tendencia clara, por un lado, las temperaturas de inyección medias minimizan el área de burbujas, siendo las piezas inyectadas a 210°C las que menor área presentan. Las temperaturas más bajas provocan un área de burbujas considerable, pero

son las temperaturas elevadas las que dan lugar a un gran aumento en el área total de burbujas en las piezas, estabilizándose a partir de 240°C.

Por otro lado, la Figura 5.5.2-3 recoge el promedio de dicha valoración según la presión de inyección empleada:

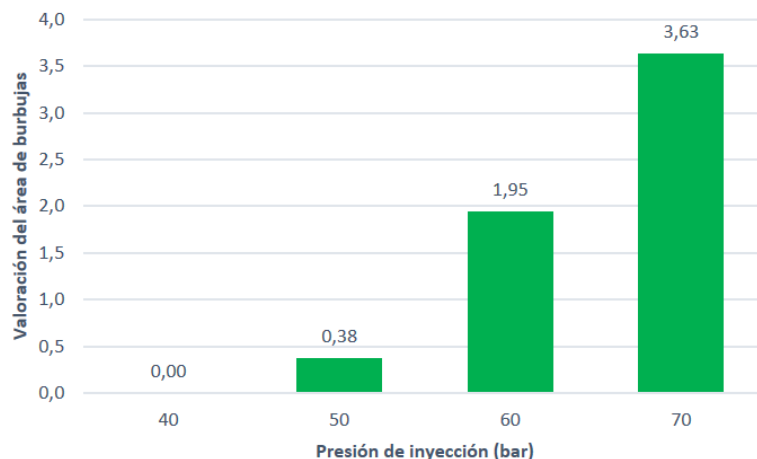


Figura 5.5.2- 3 Promedio de la valoración del área de burbujas para cada presión de inyección

En esta gráfica se observa claramente que la aparición de burbujas está muy influenciada por la presión de inyección. La extensión de las burbujas se ve favorecida por aumentos en la presión. Con 40 bar este defecto no aparece, sin embargo, con 60 bar las piezas ya cuentan con un área de burbujas elevada, que llega a duplicarse con 70 bar.

En lo relativo a las condiciones de mantenimiento, no se han observado tendencias en el tratamiento de los datos, por lo que se concluye que no tienen influencia en el área de las burbujas generadas.

En cuanto al número de burbujas, en la Figura 5.5.2-4 se recoge la valoración, nuevamente de 0 a 10, de los resultados de las mediciones, encontrándose ampliada en el Anexo 7 para una mayor definición.

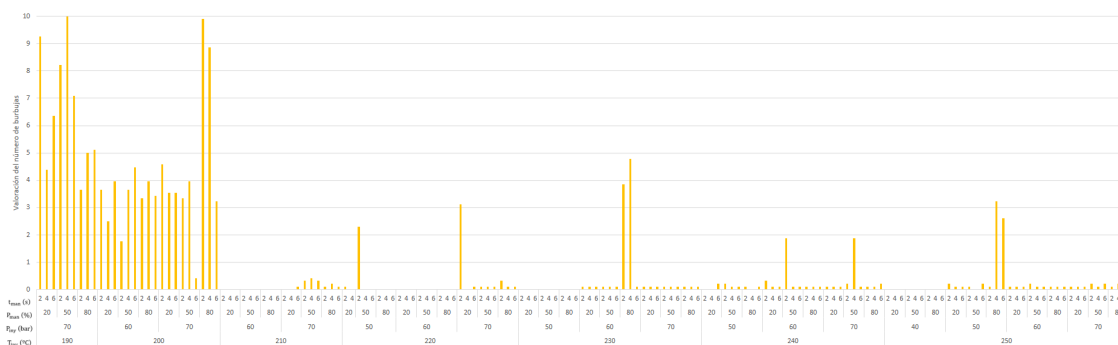


Figura 5.5.2- 4 Valoración del número de burbujas de aire retenido de todas las piezas fabricadas según sus parámetros de inyección

En el caso del número de burbujas, se observa que las piezas con un número mayor de burbujas se concentran en las temperaturas más bajas de inyección, siendo muy notable la diferencia con el resto de temperaturas estudiadas. Esto se confirma en el Figura 5.5.2-

5, que muestra el promedio de la valoración del número de burbujas según la temperatura de inyección:

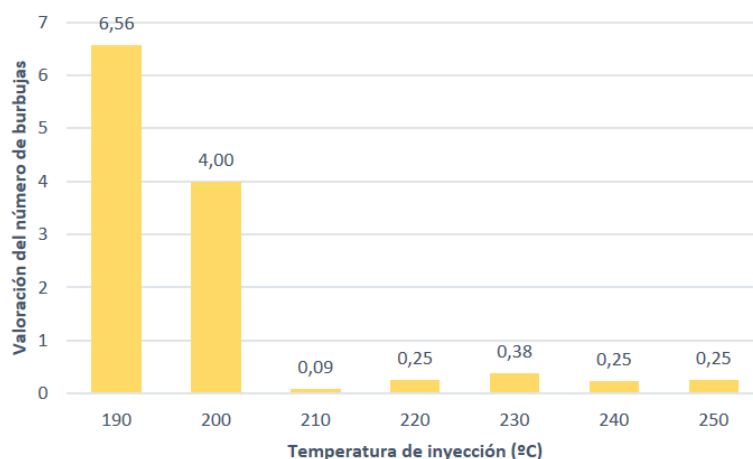


Figura 5.5.2- 5 Promedio de la valoración del número de burbujas para cada temperatura de inyección

Se observa que con bajas temperaturas aparecen muchísimas burbujas, sin embargo, a partir de 210°C se reducen drásticamente, encontrándose en torno a 1 o 2 burbujas.

El efecto de la presión de inyección se observa en la Figura 5.5.2-6:

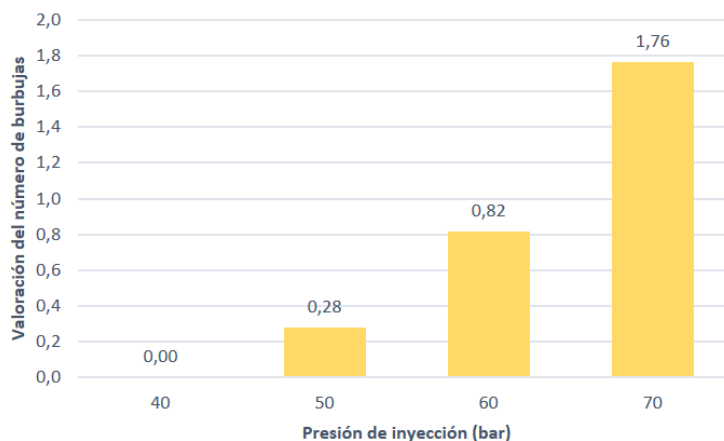


Figura 5.5.2- 6 Promedio de la valoración del número de burbujas para cada presión de inyección

Para comprender los resultados obtenidos es necesario analizar en conjunto el área y el número de burbujas generadas, para entender la naturaleza de las mismas. En la Figura 5.5.2-7 se muestra el promedio de las valoraciones numéricas de ambas variables para cada temperatura de inyección, mientras que en la Figura 5.5.2-8 se hace lo propio según la presión de inyección:

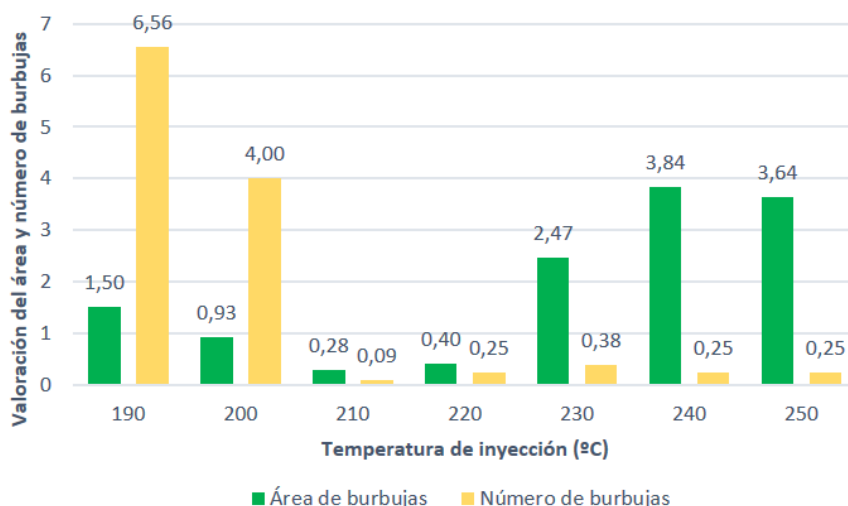


Figura 5.5.2- 7 Promedio de la valoración del área y número de burbujas para cada temperatura de inyección

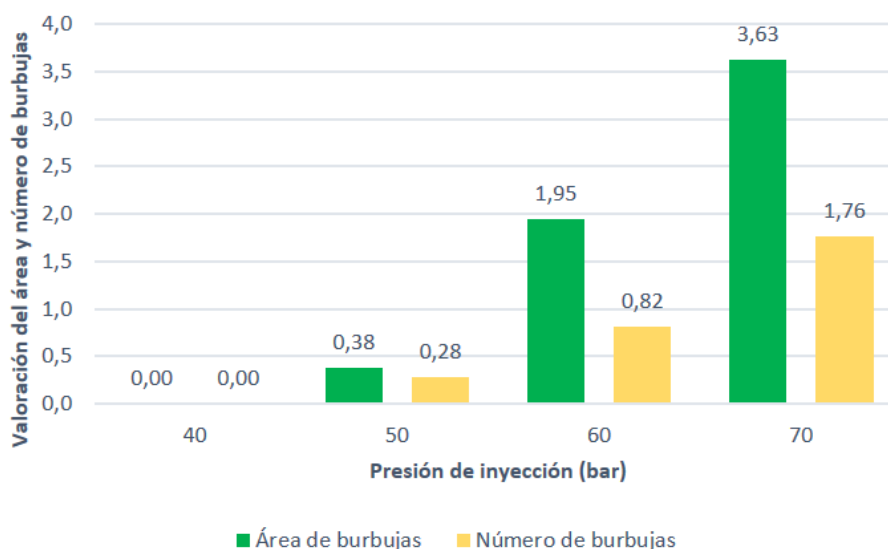


Figura 5.5.2- 8 Promedio de la valoración del área y número de burbujas para cada presión de inyección

Se detecta que con la presión de inyección aumentan significativamente tanto el área de burbujas como el número de burbujas, haciéndolo además en la misma proporción. Con ello, se puede concluir que para disminuir las burbujas de aire retenido es necesario emplear la mínima presión que garantiza el llenado de la cavidad.

Sin embargo, se observa que la temperatura de inyección influye de manera opuesta en el área de burbujas y en el número de estas. Con bajas temperaturas surgen muchísimas burbujas de pequeño diámetro. Según aumenta la temperatura, el número de burbujas disminuye y con ello el área, encontrándose el punto óptimo con 210°C y 220°C. A partir de aquí, aumenta radicalmente el área de una única burbuja: la provocada por el defecto del molde y analizada en el Apartado 5.4.

De modo que se llega a la conclusión de que aumentos en la temperatura reducen el número de pequeñas burbujas. Por tanto, si se trabaja con un molde perfectamente pulido, lo ideal es aumentar la temperatura para reducir las burbujas. Sin embargo, cuando el

molde cuenta con pequeñas imperfecciones, temperaturas elevadas amplifican el efecto que estas tienen en el flujo, dando lugar a burbujas de gran tamaño. Por tanto, lo ideal en este caso es trabajar con temperaturas intermedias que mitigan ambos efectos.

La justificación teórica en la que se apoyan los resultados obtenidos se resume en los siguientes puntos:

- Las altas presiones reducen la fluidez del material durante la inyección, al comprimirse y causar un mayor enmarañamiento de sus cadenas poliméricas. Esto favorece la formación de pequeñas bolsas de aire, al presentar el material una mayor dificultad para deslizarse y evacuarlo.
- Por el contrario, las altas temperaturas aumentan la fluidez del polímero, disminuyendo las bolsas de aire que se forman y facilitando su evacuación. Sin embargo, esta mayor fluidez facilita los cambios direccionales experimentados por el flujo al encontrarse con imperfecciones en el molde, que provocan la nucleación de una burbuja en esa zona. Este es el motivo por el que con la temperatura disminuye el número y aumenta el área de burbujas, ya que este incremento es provocado sólo por la burbuja generada en el defecto del molde.
- El efecto de las condiciones de mantenimiento se ve opacado por el efecto de la presión y la temperatura de inyección, sin provocar cambios significativos, al no afectar en gran medida a la fluidez.

5.5.3. Rebabas:

Las mediciones del área de rebabas en las piezas, debido al escape de material de la cavidad del molde, tienen como resultados principales los recogidos en la Tabla 5.5.3-1:

Tabla 5.5.3- 1 Resultados de las medición de rebabas

Área media de rebabas (cm ²)	Área mínima de rebabas (cm ²)	Área máxima de rebabas (cm ²)
13 ± 12	0	41,17

En la Figura 5.5.3-1 se muestra la valoración numérica del área de rebabas para cada una de las piezas fabricadas, recogiendo la gráfica ampliada en el Anexo 8:

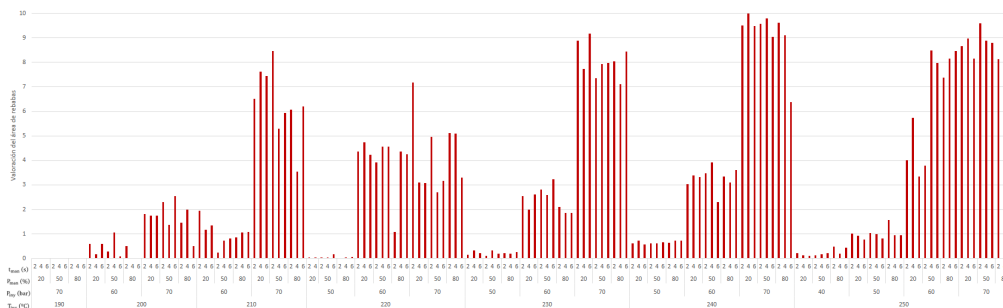


Figura 5.5.3- 1 Valoración del área de rebabas de todas las piezas fabricadas según sus parámetros de inyección

Se detecta claramente que el tamaño de las rebabas se ve potenciado nuevamente por la temperatura y la presión de inyección. Especialmente las presiones más elevadas aplicadas en cada temperatura dan lugar a fuertes aumentos en el área de rebabas.

Para aislar la influencia de la temperatura de inyección, en la Figura 5.5.3-2 se muestra el promedio de las valoraciones del área de rebabas en las piezas según la temperatura con la que fueron inyectadas:

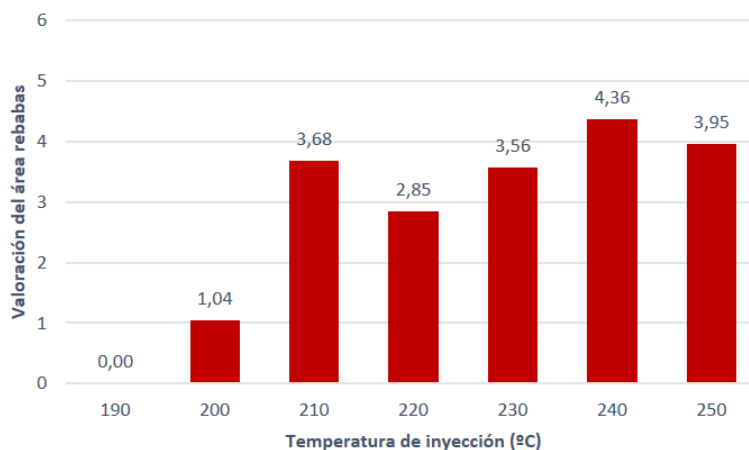


Figura 5.5.3- 2 Promedio de la valoración del área de rebabas para cada temperatura de inyección

Se confirma que las temperaturas más bajas dan lugar a muy pocas rebabas, mientras que con las temperaturas más elevadas se obtienen rebabas muy extensas. Esto se debe a que la elevada fluidez del material, que conlleva una baja viscosidad, cuando se encuentra a alta temperatura provoca que escape con facilidad por la unión entre las placas de molde.

Sin embargo, tampoco se observa una tendencia clara siempre creciente. Esto es debido a que temperaturas más elevadas permiten el uso de presiones de inyección más bajas, que como se mostrará a continuación reducen el área de rebabas. Por lo tanto, se concluye que la presión de inyección es bastante más influyente en la formación de rebabas al mitigar los efectos de incrementar la temperatura de inyección.

Esta influencia de la presión de inyección se muestra en la Figura 5.5.3-3 con el promedio de las valoraciones del área de rebabas para cada presión analizada:

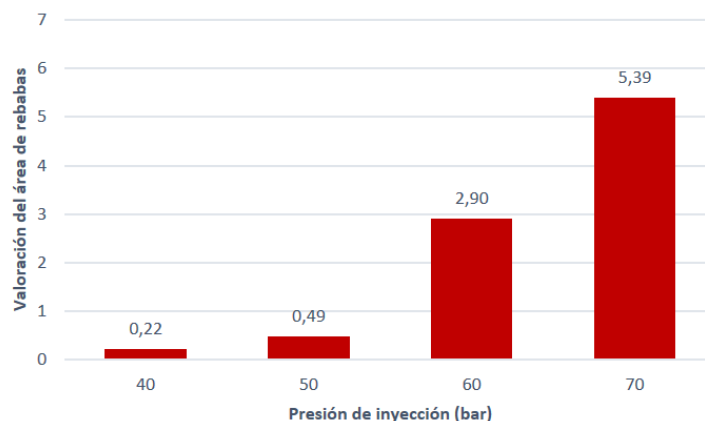


Figura 5.5.3- 3 Promedio de la valoración del área de rebabas para cada presión de inyección

Se observa una aparición casi nula de rebabas cuando se emplean las presiones más bajas de inyección, 40 bar y 50 bar. Las presiones elevadas disparan esta área, debido a que el polímero fundido es impulsado con demasiada fuerza en la inyección y logra escapar de la cavidad por las juntas del molde. Por tanto, para minimizar las rebabas en las piezas obtenidas se debe trabajar con las presiones más bajas posibles para cada temperatura de inyección.

Nuevamente, el efecto del tiempo de mantenimiento y de la presión de mantenimiento queda opacado por las otras variables, sin detectarse grandes variaciones en las rebabas obtenidas con su modificación.

5.5.4. Contracción del ancho de la pieza:

Para la medición de la contracción en la base de la pieza se tomaron medidas del ancho de la misma en tres puntos distintos: centro de la base, 50 mm a la izquierda del centro de la base y 50 mm a la derecha del centro de la base. Los principales resultados de las mediciones se recogen en la Tabla 5.5.4-1:

Tabla 5.5.4- 1 Resultados de la medición de la contracción del ancho de las piezas

	Izquierda	Centro	Derecha
Valor medio de contracción (mm)	0,30 ± 0,04	0,28 ± 0,03	0,32 ± 0,03
Valor mínimo de contracción (mm)	0,07	0,05	0,130
Valor máximo de contracción (mm)	0,41	0,38	0,98

Estos datos muestran claramente una diferencia en la contracción que experimenta la base de la biela a lo largo de su longitud. La contracción se minimiza en el centro de la pieza, punto más alejado de los canales de alimentación, y se amplifica en los extremos de la base, existiendo en uno de ellos una contracción más pronunciada. Esta diferencia en la contracción experimentada en las distintas secciones de la base se muestra en la Figura 5.5.4-1:

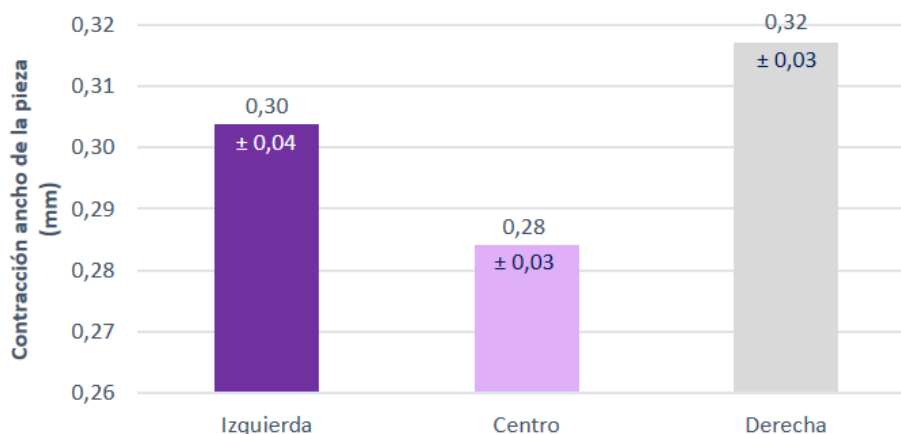


Figura 5.5.4- 1 Promedio de la contracción en la base de la biela para cada sección medida

La causa principal por la que la zona central experimenta menos contracción se encuentra en la ubicación de los puntos de inyección. El material entra por los extremos, de modo que esas zonas son las que se encuentran a mayor temperatura cuando comienza el enfriamiento, mientras que en la zona central el material está más frío. Las zonas más calientes tardan más en enfriarse, es decir, experimentan un enfriamiento más lento que aumenta el grado de cristalinidad del material. Cuanto mayor sea el grado de cristalinidad, mayor es la contracción experimentada al pasar la temperatura de cristalización, puesto que cuenta con más regiones cristalinas [47].

Por otro lado, la contracción experimentada en la sección derecha es superior que en la izquierda. En el análisis con el software *MoldFlow* recogido en el Apartado 5.6 se detectó que el canal de alimentación del molde en la derecha es ligeramente más ancho, lo que da lugar a la entrada de más material y a un aumento de la temperatura de la masa fluida en dicha zona, provocando una mayor contracción al enfriarse más lentamente, como ya se ha explicado anteriormente.

En lo relativo a la influencia de las variables de inyección en la contracción experimentada, se han detectado tendencias para todas ellas. En la Figura 5.5.4-2 se muestra el promedio de la valoración de la contracción en la sección izquierda para cada temperatura. El mismo efecto se aprecia en el resto de las secciones analizadas.

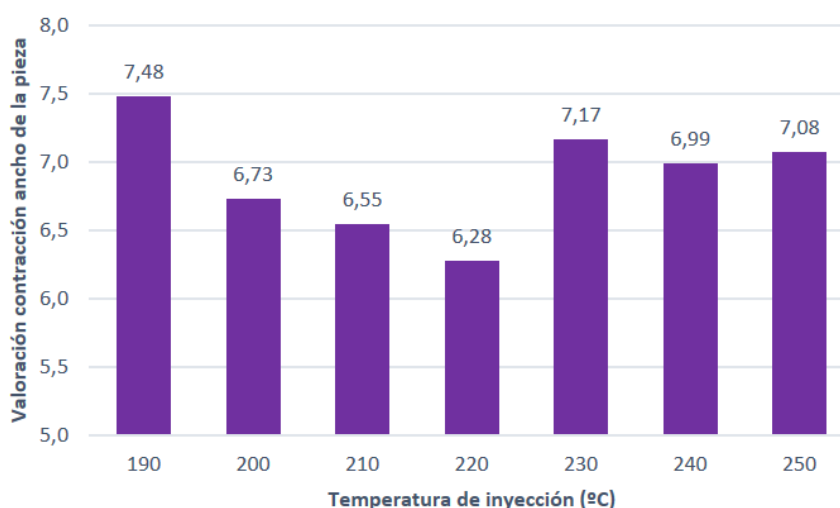


Figura 5.5.4- 2 Promedio de la valoración de la contracción en la sección izquierda de la base para cada temperatura de inyección

Se observa que la contracción del ancho es elevada tanto para las temperaturas más bajas como para las más altas, reduciéndose hasta más de un 10% en las temperaturas de inyección intermedias. Como ya se ha explicado, altas temperaturas provocan una menor velocidad de enfriamiento, aumentando la extensión de las regiones cristalinas que incrementan la contracción del polímero. Por el contrario, temperaturas excesivamente bajas dan lugar a una menor compactación del polímero a inyectar, puesto que este se encuentra menos fluido. A menos compactación, existe menos oposición a la contracción del polímero [48]. A su vez, se ha detectado que con bajas temperaturas la diferencia de contracción entre los extremos y el centro es más notable. Esto se debe a la disminución de fluidez experimentada por el material, que provoca que se distribuya de una manera menos uniforme por la cavidad del molde.

Por otro lado, en la Figura 5.5.4-3 se muestra el promedio de la valoración de la contracción en la sección izquierda para cada presión de inyección. Se ha escogido una sección para facilitar la explicación del análisis, pero nuevamente las tendencias observadas se cumplen en todas.

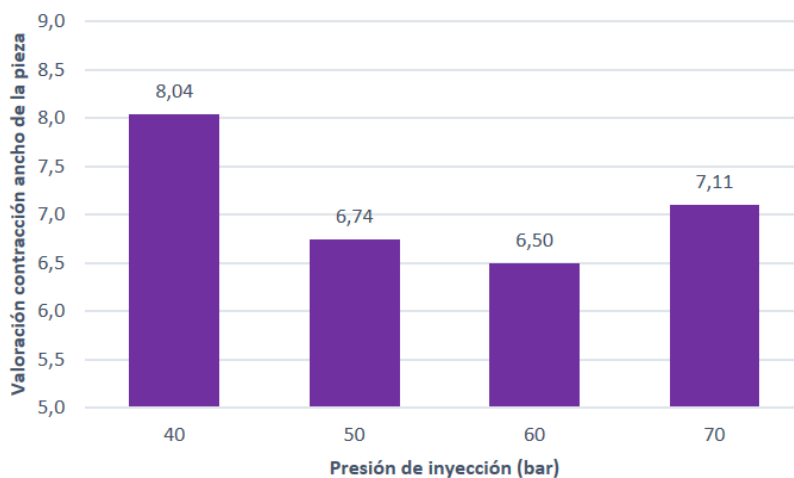


Figura 5.5.4- 3 Promedio de la valoración de la contracción en la sección izquierda de la base para cada presión de inyección

En este caso, nuevamente se detecta que los valores extremos contribuyen a que la pieza se contraiga en mayor medida, mientras que los valores de presión intermedios reducen la contracción aproximadamente un 10%. Bajas presiones de inyección provocan una menor compactación del polímero que, como ya se ha explicado, aumenta la contracción al hacer que muchas zonas tengan menor densidad de la debida. Por otro lado, la justificación por la que altas presiones de inyección incrementan la contracción se encuentra en el uso inapropiado de estas. Si esta elevada presión se le aplica a un polímero que se encuentra suficientemente fluido y que podría ser inyectado con menos presión, lo único que hará es inducir tensiones residuales en él que amplifican los efectos de la contracción en el enfriamiento.

Para minimizar la contracción en el ancho de las piezas se debe trabajar con temperaturas y presiones de inyección intermedias porque los valores extremos, por motivos diferentes, la amplifican. Se observa una menor contracción en piezas fabricadas con temperaturas de inyección de 210°C o 220°C, junto con una presión de inyección de 60 bar o 50 bar.

La contracción experimentada por las piezas es un defecto en el que sí resultan relevantes las condiciones en las que se ejecuta la etapa de mantenimiento. Para la representación de los resultados, se grafica de manera conjunta la influencia de la presión de mantenimiento y del tiempo de mantenimiento. En la Figura 5.5.4-4 se muestra la variación del promedio de la contracción experimentada por las piezas en los tres puntos de medida con la presión de mantenimiento y con el tiempo de mantenimiento:

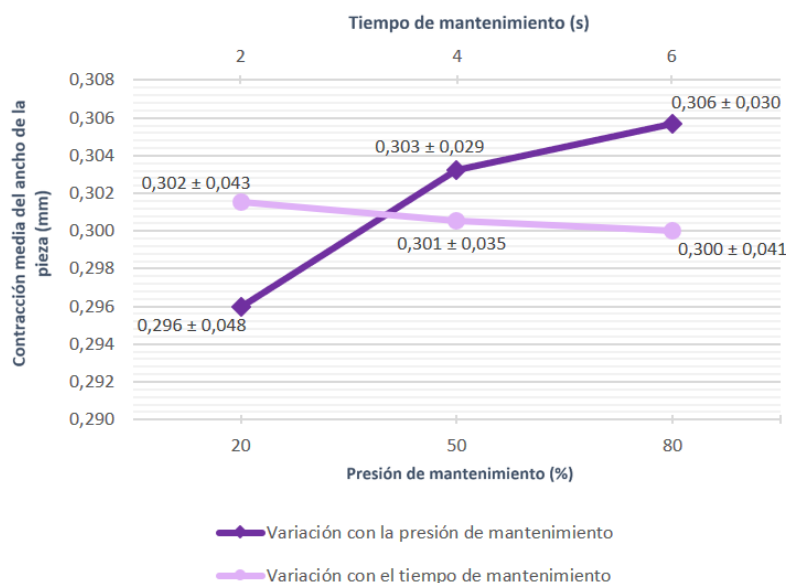


Figura 5.5.4- 4 Promedio de la contracción en la base para cada presión y cada tiempo de mantenimiento

Los resultados obtenidos con la presión de mantenimiento no son los esperados. Aumentos en la presión de mantenimiento deben reducir la contracción, puesto que su objetivo es rebajar las tensiones residuales en la pieza. Sin embargo, las mediciones efectuadas muestran que en las piezas inyectadas aumenta la contracción de la base con la presión de mantenimiento. La explicación de esto se encuentra en la orientación molecular de las cadenas poliméricas. Una mayor presión de mantenimiento favorece a que las cadenas poliméricas se orienten en la dirección del flujo [49], reduciendo la contracción en dicha dirección, pero aumentándola en la dirección perpendicular al flujo [50]. En la geometría de estudio, la dirección transversal al flujo es el ancho de la pieza, ya que los puntos de inyección están ubicados en los extremos.

Por otra parte, incrementos en el tiempo de mantenimiento sí cumplen con su cometido, aunque de manera muy pobre. Se detecta una ligera disminución de la contracción a causa de la relajación de tensiones residuales durante el enfriamiento. Sin embargo, esta disminución es de 1 μm , cuando con otros parámetros se llegan a observar variaciones de hasta 30 μm . De este modo, se determina que el tiempo de mantenimiento tiene mucha menos influencia que la presión de mantenimiento en la contracción de las piezas en dirección perpendicular al flujo.

5.5.5. Contracción de los cilindros de la pieza:

En la medición de la contracción de los cilindros de la pieza se tomaron medidas en los dos cilindros a dos alturas diferentes: a 10 mm y 16 mm de la superficie inferior de la base. Los resultados obtenidos en las mediciones realizadas se muestran en la Tabla 5.5.5-1:

Tabla 5.5.5- 1 Resultados de la medición de la contracción de los cilindros de las piezas

	Cilindro izquierdo (16 mm)	Cilindro izquierdo (10 mm)	Cilindro derecho (16 mm)	Cilindro derecho (10 mm)
Valor medio de contracción (mm)	0,17 ± 0,08	0,3 ± 0,2	0,18 ± 0,08	0,4 ± 0,1
Valor mínimo de contracción (mm)	0,01	0,002	0,009	0,183
Valor máximo de contracción (mm)	0,299	1,163	0,457	1,272

Se puede detectar que existe una contracción ligeramente superior en los cilindros de la zona derecha de la pieza. Esto es debido, al igual que en la contracción del ancho de la base, a la mayor temperatura que se alcanza en esa zona debido a la entrada de más material por el canal de alimentación sobredimensionado en la derecha.

Asimismo, existe una notable diferencia entre la contracción experimentada a las dos alturas de medida, siendo mucho mayor en la altura más baja. La posible causa por la que ocurre esto es la ubicación de los puntos de inyección, en la zona inferior de la pieza. La cota de 10 mm se encuentra más cerca de los puntos de inyección, lo que se traduce en una mayor temperatura que requiere un mayor tiempo de enfriamiento, dando lugar a un mayor grado de cristalinidad y a una mayor contracción. Sin embargo, la diferencia en las contracciones es más notable de lo que se podría prever por este efecto.

No ha sido posible detectar una tendencia de la contracción experimentada con la temperatura, sin embargo, sí se ha hecho lo propio con la presión de inyección, el tiempo de mantenimiento y la presión de mantenimiento.

En la Figura 5.5.5-1 se muestra la variación de la valoración de la contracción en los cilindros con la presión de inyección. Para el ejemplo, se han tomado los datos de la contracción en el cilindro derecho a 16 mm:

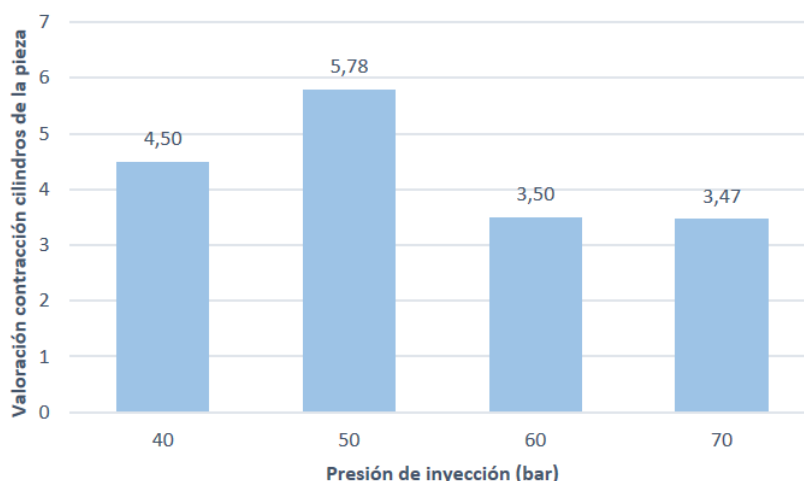


Figura 5.5.5- 1 Promedio de la contracción en el cilindro derecho a 16 mm para cada presión de inyección

Se observa que las presiones más elevadas son las que dan lugar a la menor contracción, debido a la falta de compactación que tiene la masa fluida con bajas presiones de inyección. Lograr una buena compactación resulta clave para evitar defectos en los

cilindros al ser una zona en la que el flujo debe rodear los machos del molde y volver a unirse.

En cuanto a las condiciones de mantenimiento, se verifica lo esperado teóricamente. El tiempo y la presión de mantenimiento reducen la contracción mediante la relajación de las tensiones residuales derivadas de un posible enfriamiento desigual. En la Figura 5.5.5-2 se muestra la variación de la contracción en los cilindros en función de la presión de mantenimiento, mientras que en la Figura 5.5.5-3 se muestra en función del tiempo de mantenimiento:

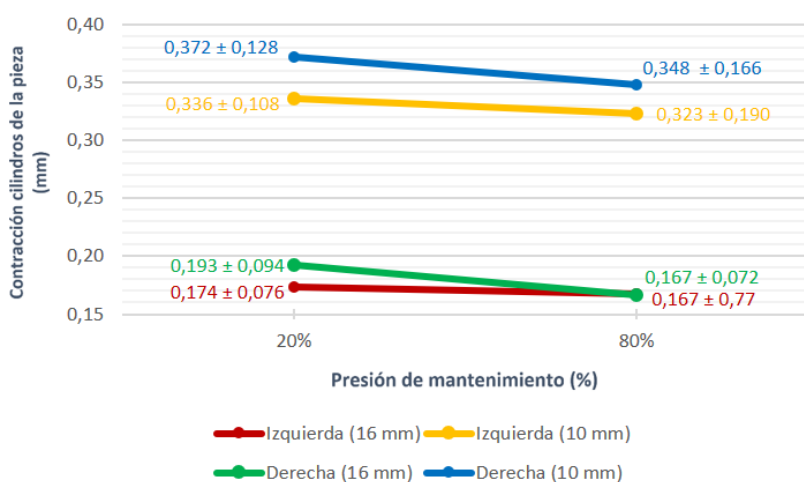


Figura 5.5.5- 2 Promedio de la contracción en los cilindros para cada presión de mantenimiento

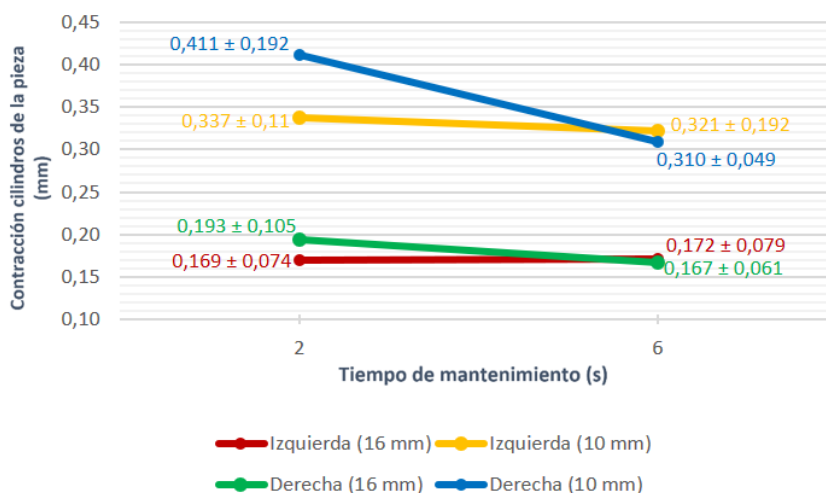


Figura 5.5.5- 3 Promedio de la contracción en los cilindros para cada tiempo de mantenimiento

5.5.6. Desviación angular de los ejes:

Con la medición de la desviación angular de los ejes se han obtenidos resultados en tres aspectos distintos de las piezas: torsión de la pieza, alabeo de la pieza y contracción en la distancia entre los ejes de los cilindros de la biela. En la medición de las piezas se han empleado sólo las presiones y tiempos de mantenimiento máximos y mínimos.

Torsión:

Para cuantificar la torsión sufrida por las piezas se ha definido el ángulo de torsión como aquel existente entre el eje de los cilindros de las piezas y el plano que une el centro de los cilindros y es perpendicular a la base. En la Figura 5.5.6-1 se muestran los resultados de todas las mediciones ejecutadas. Una vez más, se recoge la valoración del defecto en una escala de 0 a 10. Dicha gráfica se recoge en el Anexo 9 ampliada:

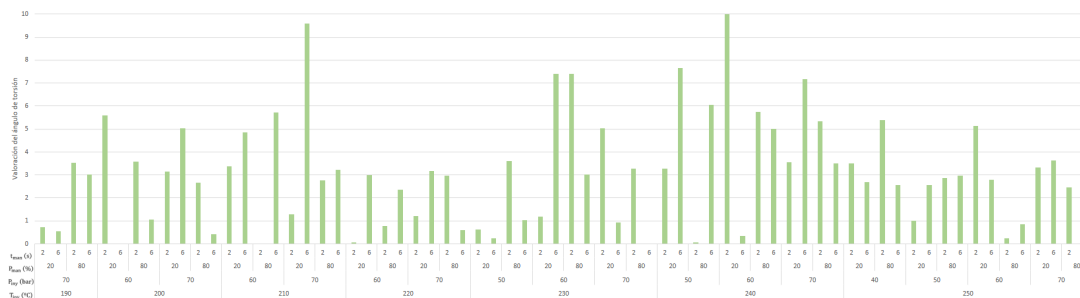


Figura 5.5.6- 1 Valoración del ángulo de torsión de todas las piezas medidas según sus parámetros de inyección

Se observa una gran dispersión en los resultados, aumentando ligeramente la torsión con presiones y temperaturas elevadas y reduciéndose ligeramente con el tiempo y la presión de mantenimiento. En la Figura 5.5.6-2 se muestra la variación de la valoración de este ángulo con la temperatura de inyección y en la Figura 5.5.6-3 con la presión de inyección. En la Figura 5.5.6-4 se muestra la variación del ángulo con el tiempo y la presión de mantenimiento.

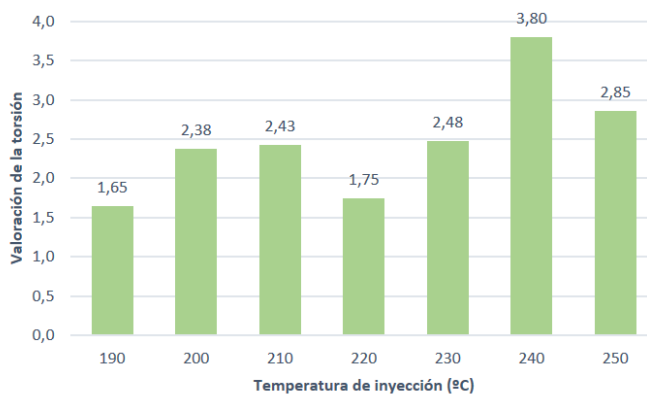


Figura 5.5.6- 2 Promedio de la valoración de torsión para cada temperatura de inyección

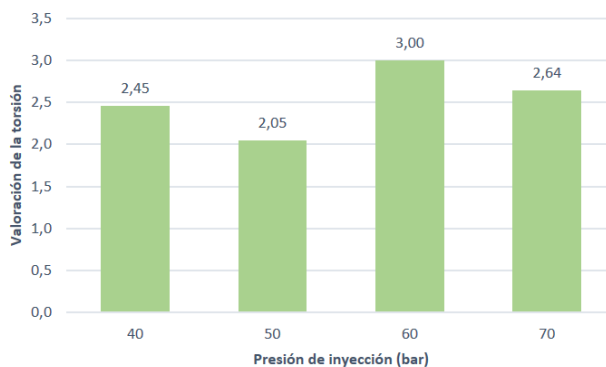


Figura 5.5.6- 3 Promedio de la valoración de torsión para cada presión de inyección

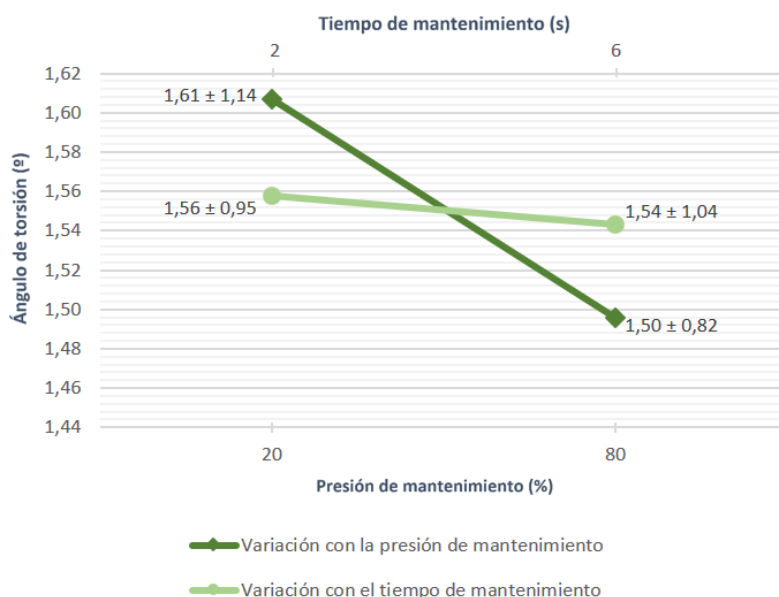


Figura 5.5.6- 4 Promedio del ángulo de torsión para cada presión y cada tiempo de mantenimiento

El motivo puede encontrarse en que altas temperaturas potencian el choque térmico entre molde y pieza, mientras que altas presiones pueden causar una distribución desigual de polímero en la cavidad del molde, al impulsarlo con demasiada fuerza. Ambos factores favorecen a la creación de tensiones residuales que deforman la pieza. Aumentando el tiempo y la presión con la que se ejecuta el mantenimiento, estas tensiones se relajan y reducen la torsión en la pieza.

Alabeo:

Para cuantificar el alabeo experimentado por las piezas se ha medido el ángulo de alabeo, definido como el formado por el eje de un cilindro y el plano que pasa por el centro del cilindro y es perpendicular a la base de la pieza y al plano definido para el cálculo del ángulo de torsión. La definición de qué tipo de desviación de ejes da lugar a piezas cóncavas o convexas está recogida en el Apartado 4.4.4.

En la Figura 5.5.6-5 se muestra la valoración numérica de los resultados de las mediciones de dicho ángulo, mostrándose en color rosa aquellas piezas cuyo perfil es convexo tras el alabeo y en color azul aquellas cuyo perfil es cóncavo. Se recoge la gráfica ampliada en el Anexo 10.

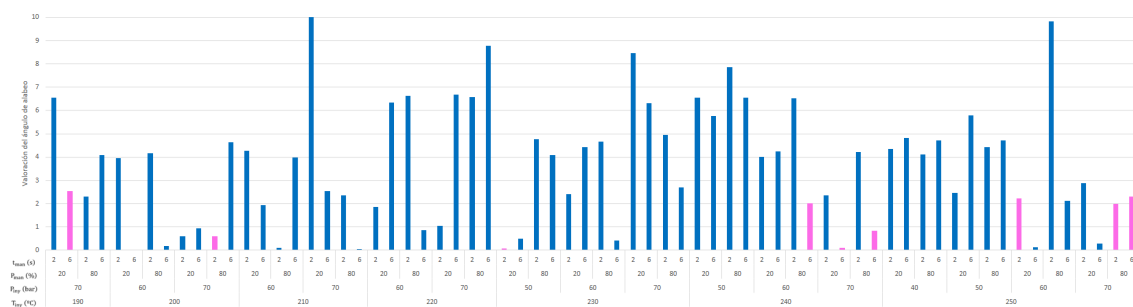


Figura 5.5.6- 5 Valoración del ángulo de alabeo de todas las piezas medidas según sus parámetros de inyección. En rosa las piezas convexas y en azul las cóncavas

Es posible detectar que la gran mayoría de las piezas experimentan un alabeo que las curva dejándolas con un perfil cóncavo. Asimismo, aquellas cuyo perfil es convexo experimentan una desviación angular notablemente inferior y tienen más tendencia a aparecer con temperaturas de inyección elevadas. Esto es debido a que en muchas de las piezas convexas se anotó durante la fabricación que existieron mayores dificultades en su desmoldeo, permaneciendo pegadas parcialmente a la placa móvil del molde, deformándose al no encontrarse completamente solidificadas. Esta dificultad en el desmoldeo tiene su origen en la mayor fluidez del material y el mayor tiempo de enfriamiento requerido con mayores temperaturas de inyección.

En cuanto a la temperatura y presión de inyección, no se detecta una influencia clara en esta desviación angular de los cilindros de la pieza, pero como se muestra en la Figura 5.5.6-6, el tiempo y la presión de mantenimiento disminuyen ligeramente la desviación de los ejes causada por el alabeo al relajar las tensiones residuales que curvan la base de la biela:

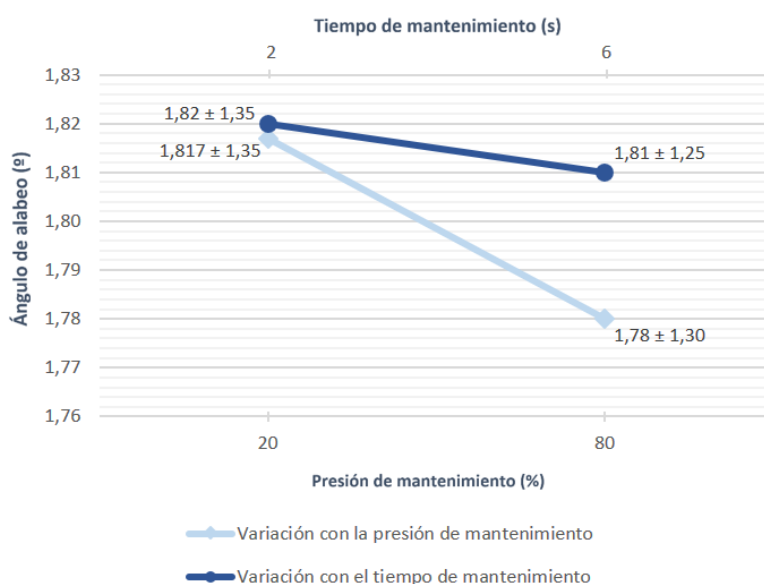


Figura 5.5.6- 6 Promedio del ángulo de alabeo para cada presión y cada tiempo de mantenimiento

Distancia entre ejes:

En lo relativo a la contracción experimentada en la dirección del flujo, que reduce la distancia entre los ejes de las piezas, esta ha sido medida a dos alturas desde la base de la pieza: a 10 mm y a 16 mm. En la cota de 16 mm se detecta una menor distancia entre los ejes debido a que al alabearse la pieza, en casi todas ellas, los cilindros se curvan hacia el interior de la biela.

En ambas alturas se aprecia que la contracción experimentada en la distancia entre ejes es notablemente superior a la contracción en la dirección perpendicular al flujo recogida en el Apartado 5.5.4. La influencia de los parámetros es similar en ambas alturas, por lo que se escoge una de ellas para simplificar la explicación de los resultados obtenidos.

En la Figura 5.5.6-7, recogida también en el Anexo 11 para verse con mayor claridad, se muestra la valoración de las contracciones en la distancia entre ejes de los cilindros a una altura de 16 mm de la base de la biela, para todas las piezas medidas. Nuevamente, se puede apreciar una gran dispersión de los resultados obtenidos.

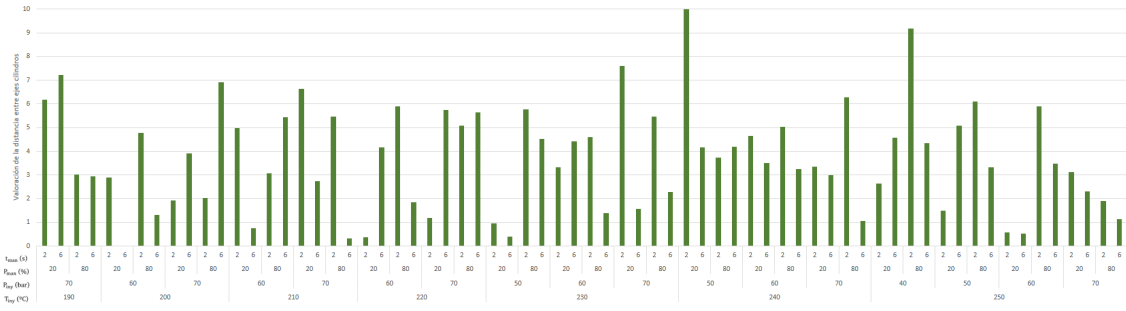


Figura 5.5.6- 7 Valoración de la contracción de la distancia entre ejes de los cilindros de todas las piezas medidas según sus parámetros de inyección, medida a una cota de 16 mm

Si se realiza el promedio de las valoraciones de las contracciones para cada temperatura y presión de inyección, como se muestra en la Figura 5.5.6-8 y en la Figura 5.5.6-9, respectivamente, se observa que las mayores contracciones se dan con la temperatura más baja, estabilizándose tras ella. En cuanto a la presión de inyección, cuanto mayor sea esta, más se reduce la contracción experimentada por la pieza en la dirección del flujo.

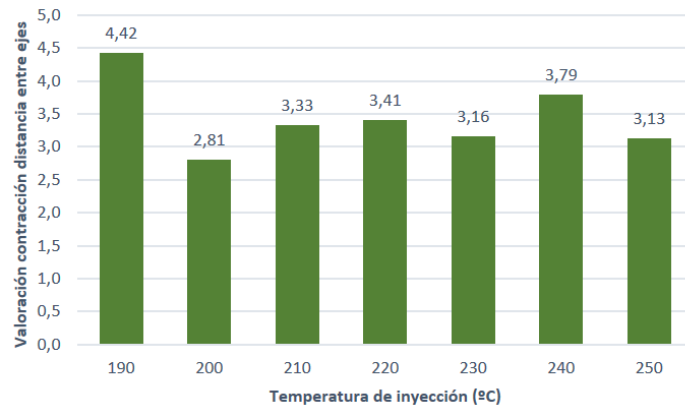


Figura 5.5.6- 8 Promedio de la valoración de la contracción de la distancia entre ejes para cada temperatura de inyección

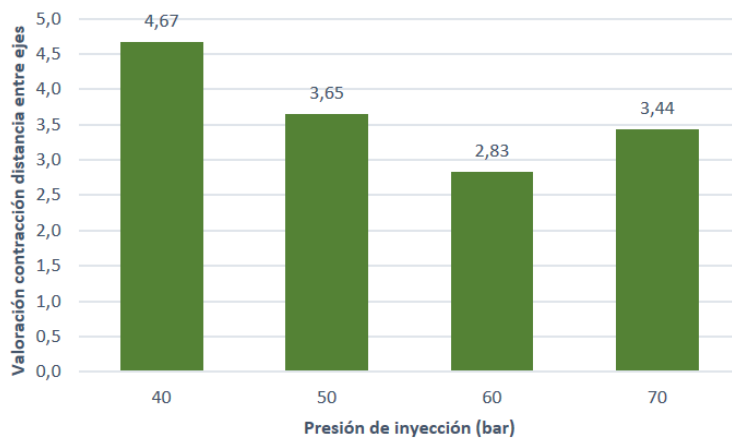


Figura 5.5.6- 9 Promedio de la valoración de la contracción de la distancia entre ejes para cada presión de inyección

Los motivos por lo que esto ocurre se encuentran en la compactación del polímero en el interior de la cavidad del molde: cuando esta no es lo suficientemente alta, el polímero experimenta una mayor contracción al enfriarse. Las bajas temperaturas disminuyen

mucho la fluidez del polímero dificultando la compactación del mismo. A su vez, las presiones excesivamente bajas también producen una peor compactación de la masa fluida que se está inyectando.

En lo relativo a las condiciones de mantenimiento, se ha detectado muy poca influencia en la contracción de la distancia entre ejes, resultando ambas mucho menos significativas.

5.5.7. Alabeo:

Con el objetivo de evaluar cuantitativamente el alabeo experimentado por las piezas, se ha tomado el perfil de las piezas medidas con el láser y se ha calculado un indicador de alabeo definido como la distancia entre sus puntos más alto y más bajo, valor que representa la magnitud del alabeo sufrido por esta. En la Tabla 5.5.7-1 se recogen los principales resultados de las mediciones:

Tabla 5.5.7- 1 Resultados de la medición del alabeo en las piezas

Valor medio de alabeo (mm)	1,0 ± 0,6
Valor mínimo de alabeo (mm)	0,20
Valor máximo de alabeo (mm)	3,28

Los perfiles de las piezas analizadas son muy dispares, a modo de ejemplo, en la Figura 5.5.7-1 se muestran algunos perfiles obtenidos con el láser en los que se pueden observar piezas cóncavas, convexas, casi planas o con zonas de distinta curvatura. Sin embargo, el sentido de la curvatura ya se estudió en el Apartado 5.5.6, de modo que el indicador del alabeo solo recoge la magnitud del mismo.



Figura 5.5.7- 1 Perfiles de curvatura de algunas de las piezas medidas

El resultado de todas las mediciones ejecutadas sobre las piezas se muestra en la Figura 5.5.7-2, estando también recogido en el Anexo 12 para ver la gráfica con mayor claridad. Se muestra la valoración de 0 a 10 del indicador de alabeo:

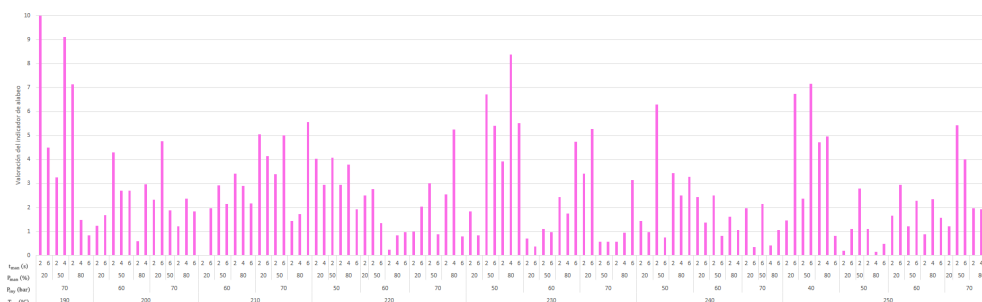


Figura 5.5.7- 2 Valoración del alabeo de todas las piezas fabricadas según sus parámetros de inyección

Con los resultados obtenidos se detecta claramente que las presiones de inyección más bajas amplifican el alabeo experimentado por las piezas. A su vez, se observa que los alabeos más pronunciados se concentran para la temperatura más baja de inyección.

Para analizar la influencia de la temperatura de inyección sobre el alabeo, se ha calculado el promedio del indicador de alabeo para cada temperatura de inyección. Los resultados se muestran en la Figura 5.5.7-3, en forma de valoración numérica de 0 a 10:

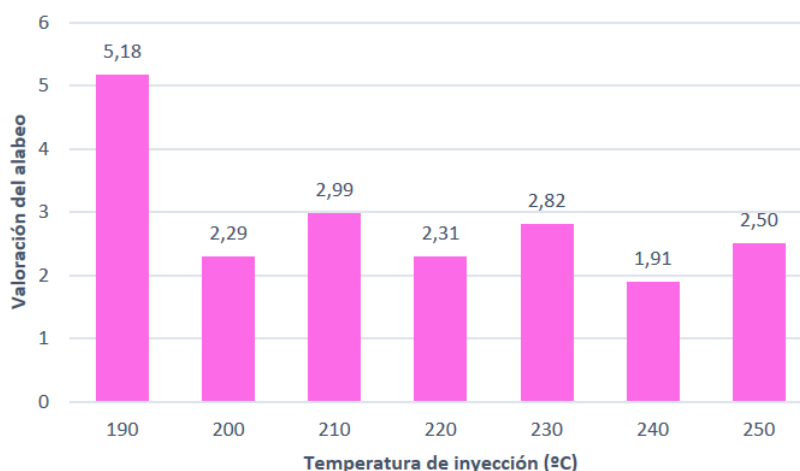


Figura 5.5.7- 3 Promedio de la valoración del alabeo para cada temperatura de inyección

Con esta gráfica es posible confirmar que la temperatura de inyección más baja produce las piezas más curvadas. Esto es debido a que las bajas temperaturas y la falta de fluidez dan lugar a una falta de homogeneización en la masa fundida. Este hecho desemboca en una distribución menos uniforme de temperaturas en la pieza, provocando mayores gradientes térmicos en el enfriamiento que inducen tensiones residuales que deforman y curvan en mayor medida la pieza.

En cuanto a la influencia de la presión de inyección, en la Figura 5.5.7-4 se muestra el promedio de la valoración numérica del indicador de alabeo para cada presión de inyección:

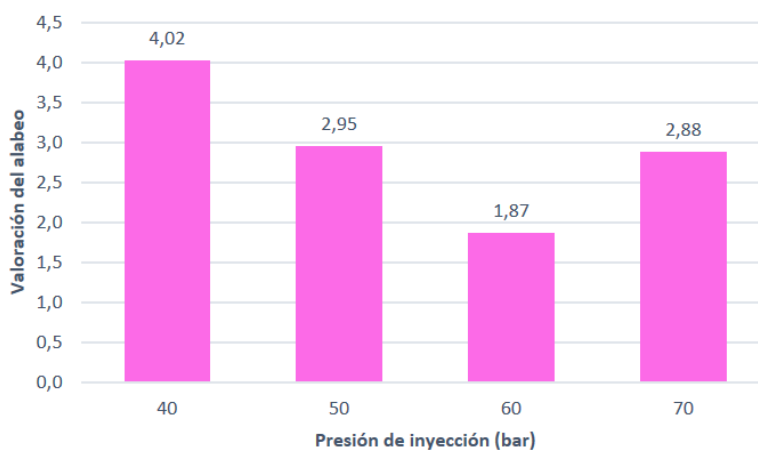


Figura 5.5.7- 4 Promedio de la valoración del alabeo para cada presión de inyección

En este caso, se aprecia que las piezas con más curvatura son aquellas inyectadas con menor presión, disminuyendo el alabeo según se incrementa la presión de inyección,

aunque existiendo un pequeño repunte con la presión más elevada de 70 bar. Esto ocurre porque las bajas presiones presentan más problemas para llenar el molde, dando lugar a diferencias en la densidad de polímero en las distintas zonas de la pieza. La consecuencia de ello es que las distintas zonas de la pieza experimenten una contracción desigual, induciendo mayores tensiones en la pieza y curvándola. El pequeño repunte del alabeo con la presión más elevada se puede deber a que esta también provoca una distribución no uniforme del material en la cavidad del molde al impulsarlo con demasiada fuerza, especialmente cuando se emplea con temperaturas en las que el polímero tiene suficiente fluidez como para poder emplear presiones mucho más bajas.

En lo relativo a las condiciones de mantenimiento, en teoría son vitales para minimizar el alabeo al contribuir a una relajación de las tensiones residuales en la pieza. Sin embargo, los resultados experimentales muestran una muy pequeña influencia del tiempo de mantenimiento y de la presión de mantenimiento. En la Figura 5.5.7-5 se muestra la variación del indicador de alabeo con estos parámetros.

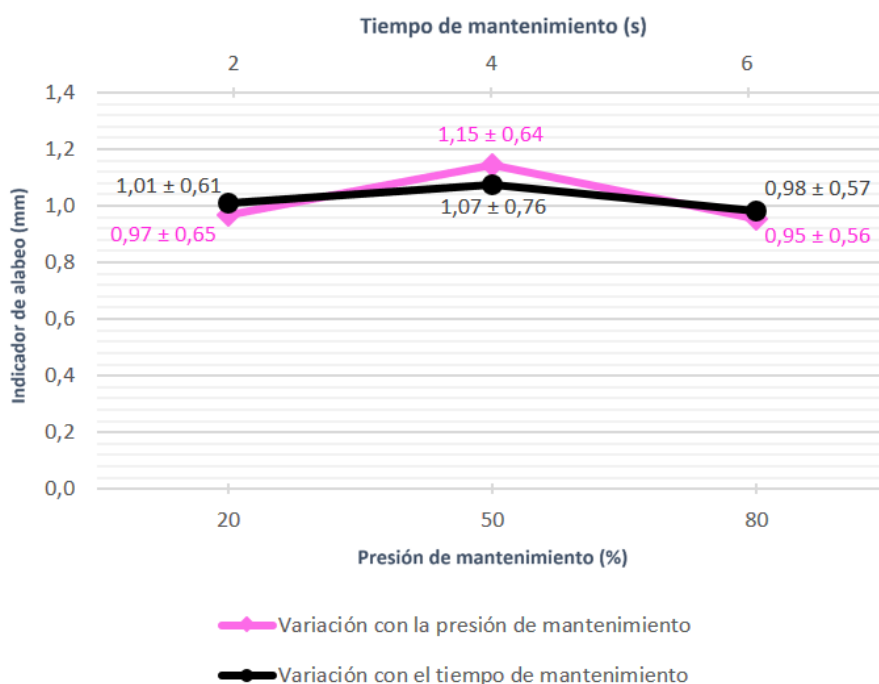


Figura 5.5.7- 5 Promedio del alabeo para cada presión y cada tiempo de mantenimiento

Se identifican pequeñas variaciones del indicador de alabeo de 0,1 mm, cuando con otros parámetros como la temperatura de inyección se observan diferencias de hasta casi 1 mm. Por lo tanto, se determina que la presión y el tiempo de mantenimiento tienen una influencia en el alabeo de las piezas muchísimo menor que la temperatura y la presión de inyección.

5.6. SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE *MOLDFLOW*:

Se ha empleado un software de simulación del proceso de inyección como *MoldFlow* de la compañía *Autodesk* para comprobar si es posible obtener mediante simulación información cualitativa y cuantitativa de los defectos que aparecen en las piezas inyectadas.

Para ello, se han comparado los resultados obtenidos experimentalmente con los obtenidos mediante la simulación del proceso. Se ha detectado que para algunos defectos sí tiene lugar una buena predicción de los mismos, mientras que para otros se obtienen resultados muy distintos.

Se han detectado dos problemas principales en la simulación. Por un lado, el material empleado en la simulación es un polipropileno similar al utilizado en la fabricación de las bielas, pero no es el mismo. El otro gran inconveniente es que no ha sido posible simular exactamente las condiciones de fabricación, puesto que el software no permite escoger la presión de inyección, sino que calcula aquella que es óptima. Por lo tanto, es posible analizar sólo la influencia de la temperatura de inyección y de las condiciones de mantenimiento.

En primer lugar, respecto al llenado del molde, la simulación sí predice que bajas temperaturas provocan una menor confianza de llenado en las partes centrales de la pieza al encontrarse más alejadas de los puntos de inyección. Para temperaturas altas, predice un llenado completo de la cavidad con confianza absoluta en todas las zonas. En la Figura 5.6-1 se muestran los resultados de la confianza de llenado para una temperatura de 230°C, en la parte superior de la imagen, y para una temperatura de 190°C, en la parte inferior. La confianza de llenado indica la probabilidad de que exista un llenado completo para cada zona de la cavidad y tiene en cuenta factores como el diseño de la cavidad, la ubicación de los puntos de inyección y las condiciones en las que se encuentra el flujo de polímero.

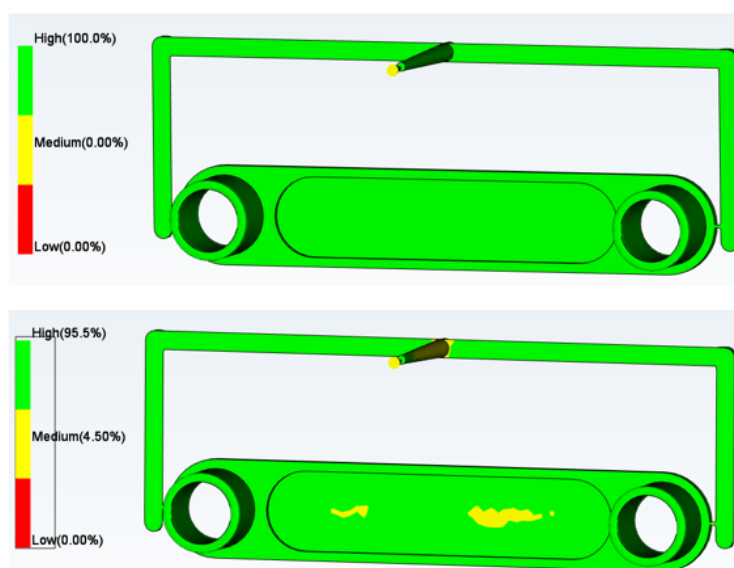


Figura 5.6- 1 Simulación de la confianza de llenado para 230°C (arriba) y 190°C (abajo)

Asimismo, el software permite obtener el lugar en el que aparecen las líneas de soldadura en las piezas. Como se observa en la Figura 5.6-2, aparecen líneas de soldadura en los

cilindros y en la zona central de la base, es decir, en zonas donde se une el flujo de polímero en condiciones de baja fluidez.

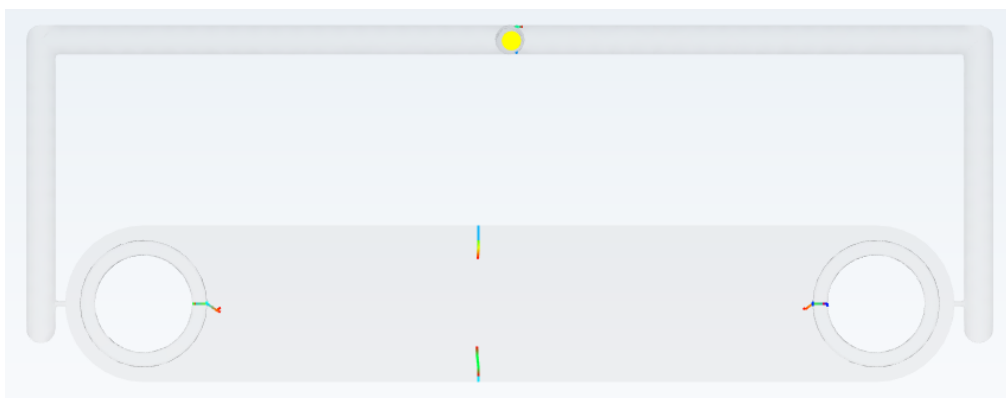


Figura 5.6- 2 Simulación de las líneas de soldadura obtenidas en las piezas

Se puede apreciar en esta simulación que las líneas de soldadura en la base se encuentran ligeramente desplazadas a la izquierda. Este hecho permitió detectar que el canal de alimentación de la derecha en el molde es ligeramente más ancho, lo que permite la entrada de más material y que en dicha zona la masa fluida se encuentre más caliente. Descubrir este aspecto fue clave para entender los resultados obtenidos en la medición de la contracción del ancho de la pieza, recogidos en el Apartado 5.5.4.

En lo relativo al alabeo de las piezas obtenidas, el software predice que este será cóncavo, pues la pieza tiende a doblarse hacia la parte más caliente, algo que se corresponde con la realidad en la gran mayoría de los casos. Sin embargo, se obtiene que la magnitud de la curvatura aumenta con la temperatura, al contrario que se ha detectado en la experimentación. En la Figura 5.6-3 se observa el resultado obtenido en la simulación del proceso para una pieza inyectada a 230°C:

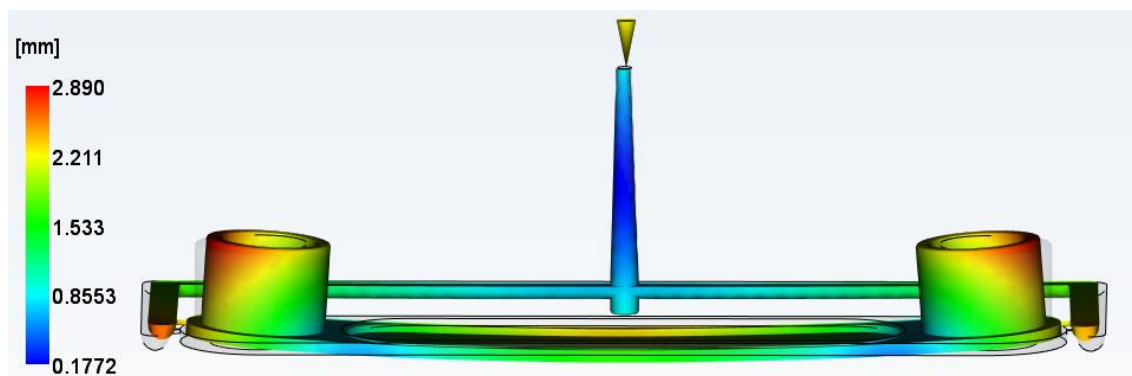


Figura 5.6- 3 Simulación del alabeo de las piezas

Por otro lado, existen otros defectos en los que el resultado de las simulaciones no se corresponde para nada con los datos obtenidos experimentalmente. Por ejemplo, en la aparición de burbujas de aire retenido, la simulación no muestra dependencia ninguna con la temperatura de inyección, mientras que en las piezas fabricadas se ha detectado una fuerte influencia. Asimismo, predice que las burbujas aparecerán sobre las líneas de soldadura, como se observa en la Figura 5.6-4, mientras que en las piezas inyectadas estas se concentran en los laterales de la base.

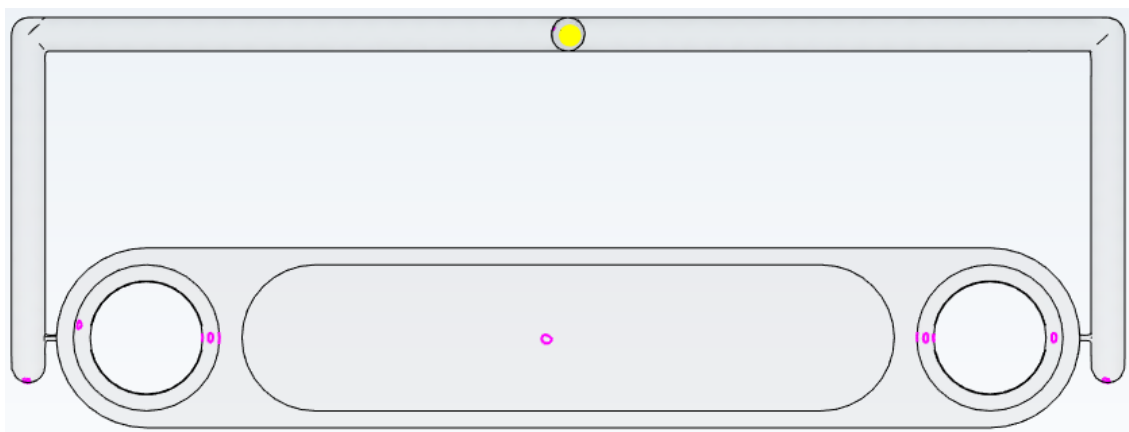


Figura 5.6- 4 Simulación de las burbujas de aire retenido en las piezas

En lo relativo a la contracción experimentada por las piezas, el programa predice que se producirá de manera uniforme en toda pieza, minimizándose en el cajado de la misma, como se muestra en la Figura 5.6-5:

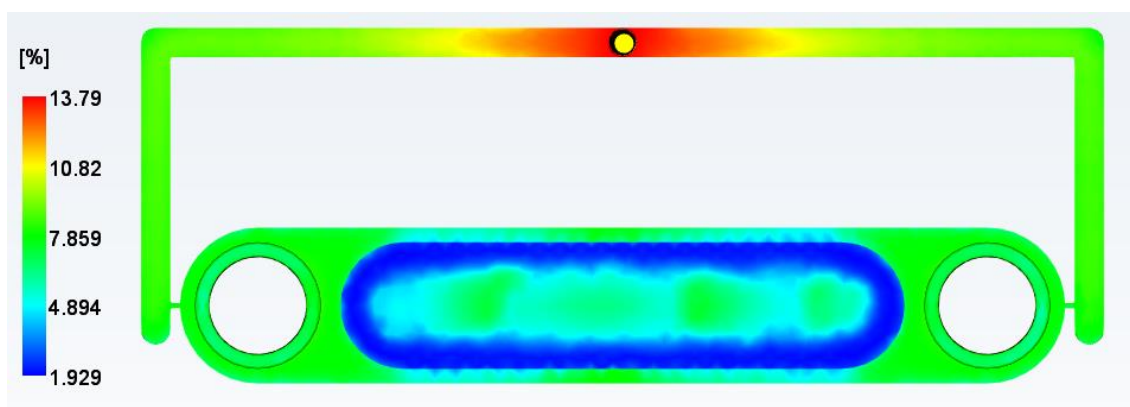


Figura 5.6- 5 Simulación de la contracción experimentada por las piezas

La distribución de la contracción se corresponde con las medidas tomadas sobre las piezas inyectadas, pero simulando el proceso se llega a la conclusión de que la contracción disminuye con la temperatura de inyección. Por el contrario, en la medición del ancho se detectó que las temperaturas más bajas disparan la contracción debido a una falta de compactación de la masa fundida.

Como se explicó en el Apartado 5.5.4, altas temperaturas favorecen a la orientación de las cadenas poliméricas en la dirección del flujo [49], amplificando la contracción en la dirección perpendicular [50]. Este efecto no se aprecia en *MoldFlow*, en la Figura 5.6-6 se muestra la orientación molecular para distintas temperaturas de inyección. Se aprecia que la orientación de las macromoléculas es muy similar en todas las temperaturas. Además, en las temperaturas más altas se observa que en la zona central las moléculas no se orientan en la dirección del flujo en su gran mayoría, como se muestra con mayor detalle en la Figura 5.6-7, con el resultado de la simulación de la pieza inyectada a 250°C ampliada.

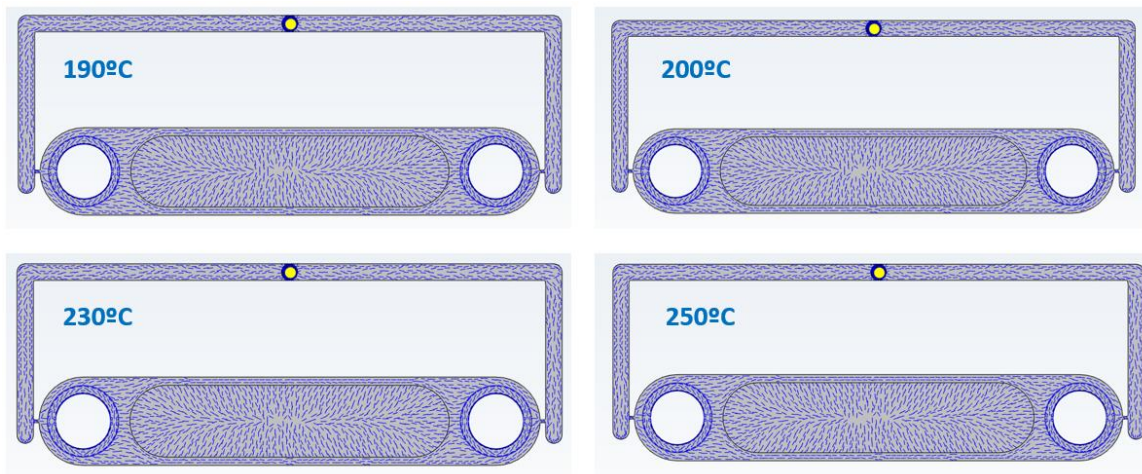


Figura 5.6- 6 Simulaciones de la orientación de las cadenas poliméricas en la pieza

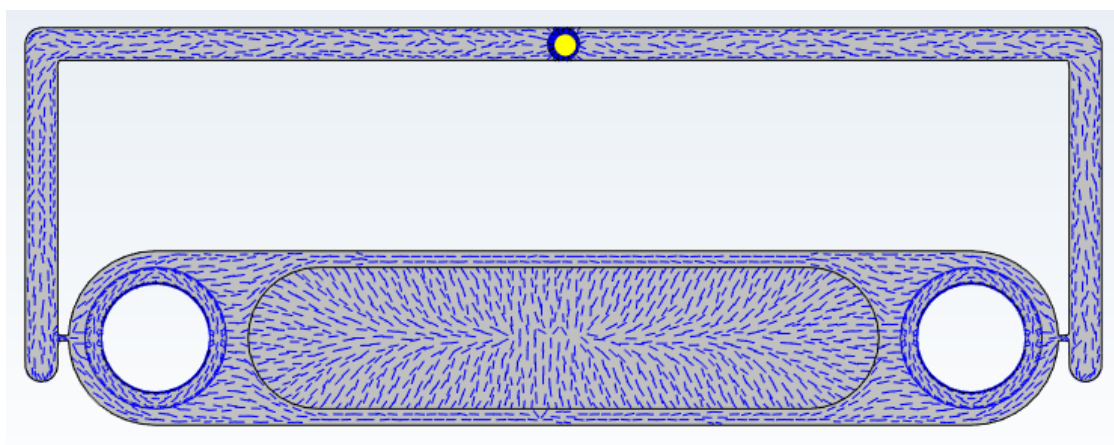


Figura 5.6- 7 Simulación de la orientación de las cadenas poliméricas con la máxima temperatura de inyección

En conclusión, la simulación del proceso de inyección puede resultar útil para predecir de forma aproximada la magnitud y la zona en la que aparecen algunos defectos, pero sin demasiada fiabilidad cuando se trabaja con un material que no es exactamente el mismo con el que se van a fabricar las piezas. Esto se justifica por la gran variedad de polipropilenos, que hacen que su comportamiento varíe con parámetros que son únicamente conocidos por el fabricante y que le dan una mayor incertidumbre al proceso de inyección.

6. CONCLUSIONES:

En este apartado se recogen las principales conclusiones obtenidas en el proyecto, según los objetivos definidos en el Apartado 3.2. Dichas conclusiones son las siguientes:

- En lo relativo a la ejecución del proyecto:
 - Se ha demostrado la baja inercia térmica de los moldes de aluminio, que da lugar a aumentos notables en su temperatura al incrementarse la temperatura de inyección y el número de piezas inyectadas, observándose los cambios en relativamente poco tiempo.
 - Se ha comprobado la importancia de calcular el tiempo de enfriamiento a cada temperatura de inyección para minimizar la deformación de la pieza durante su expulsión y poder acortar lo máximo posible los tiempos de ciclo.
- En lo relativo a la geometría de la pieza:
 - Los cilindros favorecen la formación de rechupes debido a su gran espesor y a los agujeros con los que cuentan, provocando la contracción de las zonas interiores después de la solidificación de la superficie exterior.
 - Los espesores delgados contribuyen a la falta de llenado por aumentar la fricción del polímero y reducir el tiempo necesario para su solidificación, pero reducen la aparición de rechupes al provocar una solidificación uniforme y simultánea sin la aparición de gradientes térmicos.
 - Las geometrías que cuentan con una de sus dimensiones mucho mayor al resto contribuyen al alabeo de las piezas, debido a diferencias en la temperatura de la masa fluida y en la velocidad de enfriamiento a lo largo de su longitud, experimentando su contracción en momentos distintos y con intensidades diferentes.
 - Las zonas de la pieza por las que el material fluye como si fuera un conducto estrecho favorecen la formación de burbujas de aire retenido, al presentar más dificultades en la evacuación de aire.
- En lo relativo a la influencia de los defectos en el molde:
 - Una depresión en el molde crea burbujas de aire retenido en las zonas de la pieza correspondientes a dicha imperfección, ya que se modifica el flujo de polímero y se queda atrapado aire en un movimiento más turbulento.
 - El efecto de esta imperfección en el molde se incrementa con la fluidez que presenta el material a inyectar, debido a que resulta más fácil modificar la dirección del flujo. Por tanto, cuanto mayor sean la temperatura y presión de inyección, factores que incrementan la fluidez o la turbulencia al pasar por el defecto, respectivamente, mayor será el tamaño de la burbuja formada.
- En lo relativo a la influencia de los parámetros de inyección en los defectos de las piezas:
 - La presión y el tiempo de mantenimiento no tienen influencia ninguna en el llenado completo de la cavidad. A su vez, este llenado se ve facilitado por aumentos en la presión y la temperatura de inyección. La temperatura aumenta la fluidez del polímero reduciendo la resistencia viscosa que presenta, mientras que la presión contribuye a vencer dicha resistencia.

- En cuanto a burbujas de aire retenido, su creación se ve favorecida por condiciones que disminuyan la fluidez del material, al dificultar su evacuación. Por ello, con presiones elevadas y bajas temperaturas se maximizan. Las condiciones de mantenimiento no influyen al no modificar en gran medida la fluidez.
- La variable principal que afecta a la formación de rebabas es la presión de inyección, maximizando su área cuando toma valores elevados al impulsar al material con excesiva fuerza. La temperatura de inyección afecta, aunque en menor medida, al reducir la viscosidad del polímero y posibilitar su escape de la cavidad del molde por ranuras estrechas.
- La contracción que experimentan las piezas se incrementa con altas temperaturas de la masa fluida, al reducir su velocidad de enfriamiento y aumentar su grado de cristalinidad. La falta de compactación causada por presiones y temperaturas de inyección excesivamente bajas es otra posible causa de aumentos en la contracción de las piezas.
- Aumentos en la presión de mantenimiento provocan que las cadenas poliméricas se orienten en la dirección del flujo, pudiendo incrementar así la contracción experimentada en la dirección perpendicular al mismo. El tiempo de mantenimiento tiene una influencia muy ligera reduciendo la contracción.
- El alabeo de las piezas inyectadas se ve favorecido por bajas temperaturas de inyección, al disminuir la homogeneización de la masa fundida y aumentar así el gradiente térmico entre zonas de la pieza, dando lugar a mayores tensiones residuales. Las bajas presiones de inyección también provocan diferencias en la distribución del material en la cavidad del molde, con el mismo efecto. La influencia de las condiciones de mantenimiento se ve opacada por estas variables.
- En lo relativo a la simulación del proceso de inyección:
 - Se ha comprobado que mediante simulación se puede obtener la dimensión y la ubicación de algunos defectos, pero sólo se pueden tomar los resultados como fiables si se dispone de un modelo completo del material empleado en la fabricación.

Como conclusiones finales del trabajo realizado, se tiene que la presión y la temperatura de inyección resultan mucho más determinantes de cara a la aparición de defectos que las condiciones de mantenimiento. Las altas temperaturas de inyección contribuyen a la formación de rebabas, mientras que se detecta que las bajas temperaturas favorecen el llenado incompleto del molde, el alabeo y la creación de burbujas de aire retenido. En cuanto a la presión, piezas inyectadas con mayor presión cuentan con una predisposición mayor a sufrir rebabas y burbujas de aire retenido, mientras que aquellas con las que se empleó una menor presión de inyección sufren un notable aumento del alabeo y la contracción.

En cuanto a las condiciones óptimas de fabricación para la geometría estudiada en el proyecto, se detecta que la inmensa mayoría de defectos se reducen con la mínima presión que garantiza el llenado en temperaturas de inyección intermedias. Asimismo, con presiones y tiempos de mantenimiento máximos se reducen, aunque muy ligeramente, la contracción y desviación angular de los ejes. Por tanto, se definen como valores óptimos

de inyección para este proyecto: **temperatura de inyección de 230°C, presión de inyección de 50 bar, presión de mantenimiento de 80% y tiempo de mantenimiento de 6 s.** Estos valores óptimos de los parámetros de inyección coinciden en su gran mayoría con los que se obtuvieron en el trabajo previo para la geometría sin cajeadado, con la única diferencia del tiempo de mantenimiento, que se determinó que debía ser de 4 segundos. Por lo tanto, se concluye que esta ligera modificación en la forma de la biela no altera el resultado de la optimización del proceso de inyección para minimizar los defectos en las piezas.

7. LÍNEAS FUTURAS:

Este apartado tiene como objetivo proponer actividades que den lugar a la continuidad de este proyecto. Por lo tanto, se exponen las posibles futuras líneas de investigación relacionadas con este trabajo:

- Estudio de la influencia en la aparición de los defectos de la ubicación de los puntos de inyección, según el valor que toman el resto de variables. Para ello, se llevarían a cabo los mismos ensayos que en este proyecto, pero empleando un único punto de inyección en el centro de la biela. Se compararían los resultados de ambos estudios para ver la influencia y determinar la aparición de qué defectos se ve favorecida por cada ubicación. A su vez, se estudiaría con qué combinaciones del resto de parámetros influye más la ubicación de estos puntos.
- Realización del análisis energético del proceso de inyección completo. Para ello, será necesario el desarrollo de un modelo energético para el molde, el polímero y la unidad de inyección.
- Desarrollo de un modelo de predicción de los defectos en las piezas según los parámetros de inyección que sea nutrido con todos los datos obtenidos durante el presente proyecto y otros similares. Esta tendría como objetivo proporcionar los valores óptimos de los parámetros de inyección que minimicen la aparición de defectos si se le aportan datos como geometría, material y defecto más crítico que se busca evitar.
- Ampliar la caracterización de las piezas fabricadas desde un punto de vista de propiedades mecánicas. Este estudio serviría para evaluar la influencia del defecto línea de soldadura en las probetas.
- Estudio de la influencia del reciclaje del polipropileno en la aparición de defectos en piezas fabricadas por inyección. Para ello, se procedería al triturado de las piezas y obtención de nuevos *pellets*. Con ellos se realizarían los mismos ensayos que en este proyecto y se compararían los resultados de ambos estudios, con el objetivo de detectar si el uso de polipropileno reciclado da lugar a algún cambio y de conocer el índice de reciclabilidad del polipropileno, realizando el ciclo de triturado y fabricación durante varias iteraciones.

8. EVALUACIÓN DE IMPACTOS SOCIAL, ECONÓMICO Y MEDIOAMBIENTAL:

En esta sección se exponen los impactos que ha tenido este trabajo en diferentes ámbitos: el social, el económico y el medioambiental.

8.1. IMPACTO SOCIAL:

A nivel social, este proyecto ha tenido influencia en múltiples aspectos. Por un lado, busca contribuir a la sostenibilidad de la sociedad mediante la disminución de material desperdiciado en los procesos de fabricación, así como con el reciclaje mediante el triturado de las piezas para su posterior uso en el moldeo de otras nuevas. A su vez, el presente estudio busca aportar soluciones para mejorar un proceso de fabricación, como es el moldeo por inyección de polímeros, favoreciendo así el desarrollo tecnológico y la innovación.

Por otro lado, este trabajo también tiene impactos en los trabajadores de la industria de la fabricación de polímeros, ya que abre la posibilidad de que los trabajadores obtengan formaciones para conocer la influencia de los parámetros de inyección en la aparición de defectos.

8.2. IMPACTO ECONÓMICO:

Para evaluar el impacto económico que ha tenido este proyecto se han determinado los posibles beneficios que se pueden obtener del mismo. En primer lugar, con este estudio se busca encontrar condiciones de fabricación que minimicen la aparición de defectos en las piezas. En la industria de la inyección, esta disminución de los defectos conlleva una reducción considerable de los costes de producción y el consiguiente aumento del beneficio, debido a:

- Reducción del material desperdiciado empleado para la fabricación de piezas que presentan defectos.
- Reducción del tiempo en el que la maquinaria está ocupada produciendo piezas defectuosas, de las que no se podrá obtener ningún beneficio.
- Reducción del tiempo y recursos empleados para hacer ensayos que permitan obtener las condiciones óptimas de fabricación.
- Disminución de la energía empleada para la fabricación de piezas con defectos, de las que no se obtienen ingresos tras su fabricación.

Como ya se ha dicho, mediante la aplicación de las conclusiones obtenidas en este proyecto se podría reducir la aparición de defectos en las piezas. Esto provocaría un mayor valor de las piezas fabricadas al aumentar su calidad. A su vez, la reducción en el número de piezas descartadas da lugar a un aumento de la seguridad en la producción, permitiendo una reducción de los *stocks* de seguridad y sus costes asociados.

8.3. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL:

Desde el punto de vista del impacto medioambiental del presente proyecto se han podido identificar numerosos aspectos positivos derivados de la reducción de defectos en piezas fabricadas por inyección. En primer lugar, contribuye a reducir los residuos plásticos generados por las piezas defectuosas que no se van a utilizar. Asimismo, permite reducir la materia prima empleada para fabricar dichas piezas, al disminuir el número total de piezas a producir. Otra ventaja que se puede obtener de la reducción del número total de piezas a fabricar es una disminución en el consumo energético en la industria, reduciendo la energía total empleada en el proceso de fabricación.

Por otro lado, en el proyecto se habla del triturado de las piezas para obtener nuevos *pellets* que permitirán producir nuevas piezas. Esto contribuye a crear un modelo circular en la vida de los materiales poliméricos, favoreciendo la sostenibilidad medioambiental.

9. CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE:

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son un listado de 17 hitos encaminados a mejorar la calidad de vida de la sociedad y a lograr un crecimiento sostenible de la misma. Los ODS fueron formulados en el año 2015 por la Organización de Naciones Unidas y se incluyen en la Agenda 2030. Identifican los principales retos a los que se enfrenta la humanidad e instan a los gobiernos de las diferentes naciones a tomar medidas para hacerles frente.

Entre otros muchos actores, las universidades están comprometidas con alcanzar estos objetivos. Colaboran en su consecución mediante sus actividades de formación y de investigación. Por ello, durante la ejecución de este proyecto se ha buscado contribuir a los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible:

- ODS 9 – Industria, Innovación e Infraestructura: El presente proyecto busca aportar soluciones en la industria de la fabricación de polímeros.
- ODS 12 – Producción y consumo responsables: Mediante el presente proyecto se intenta optimizar el proceso de fabricación por inyección, disminuyendo los residuos derivados de piezas defectuosas y estudiando su reciclabilidad.
- ODS 14 – Vida submarina: Este proyecto busca contribuir en la disminución de residuos plásticos y en su reciclaje, ayudando ambas medidas a mejorar las condiciones de los ecosistemas marinos.
- ODS 15 – Vida de ecosistemas terrestres: De igual modo que en el punto anterior, los seres vivos de los ecosistemas terrestres se ven favorecidos por la reducción de residuos plásticos, ya que podrían acabar en estos ecosistemas si están mal gestionados.

En la Figura 9-1 se encuentran recogidos todos los objetivos, encontrándose rodeados aquellos a los que se ha tratado de contribuir durante la realización de este proyecto:



Figura 9- 1 Objetivos de desarrollo sostenible [51]

10. MARCO NORMATIVO Y ESTÁNDARES TÉCNICOS:

En lo relativo al marco normativo que afecta a los desarrollos presentados, se ha estudiado la normativa relacionada con procesos de fabricación de polímeros, con el tratamiento del polipropileno, con la seguridad industrial y con la calidad de las piezas obtenidas.

En lo relativo al proceso de fabricación, se debe verificar que este se ejecuta acorde al **Real Decreto 1215/1997** y al **Real Decreto 1495/1986**, que establecen los requisitos de seguridad y salud de los trabajadores y aquellos relacionados con el trabajo con maquinaria industrial. Al emplear polipropileno en el proceso de fabricación, la normativa aplicable es la que regula el uso de sustancias químicas, entre las que se encuentran los materiales plásticos, destacando el **Reglamento REACH**, desarrollado por el Parlamento Europeo.

Desde el punto de vista del impacto medioambiental, en España, la **Ley 22/2011** es la encargada de regular el tratamiento de residuos, entre los que se encuentran los residuos plásticos derivados del proceso de inyección.

En el ámbito de la calidad industrial, existe la norma **ISO 9001**. Se trata de una norma no obligatoria, pero que su cumplimiento asegura que el proceso de inyección verifica los requisitos mínimos de calidad. Es importante destacar que esta norma es aplicable a la calidad del proceso, no a la calidad de las piezas obtenidas. Dichas piezas, por ejemplo, deberían cumplir las especificaciones recogidas en las directivas europeas para la obtención del **Marcado CE**, que habilita su comercialización en la Unión Europea.

Desde el punto de los estándares técnicos aplicables, existen numerosas normas que afectan a los procesos de inyección y a la aparición de defectos en las mismas, teniendo como objetivo especificar soluciones probadas con anterioridad que aseguran el correcto funcionamiento del proceso.

En lo relativo al moldeo por inyección de materiales poliméricos, la norma **ISO 294-1:2017** recoge las condiciones estándar bajo las cuales realizar la inyección de las piezas. Por otro lado, la norma **ISO 1873-2** recoge específicamente las recomendaciones para la inyección de polipropileno. Para el estudio de los defectos que aparecen en las piezas, la norma **ISO 20457** recoge las tolerancias requeridas en las piezas obtenidas por inyección.

Las posibles contribuciones de este proyecto a los estándares técnicos se encontrarían dentro del marco de la norma **ISO 294-1:2017** y de la **ISO 1873-2**, explicando los valores de presión y temperatura de inyección recomendados para minimizar la aparición de los distintos defectos.

11. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO:

En lo relativo al presupuesto del proyecto, se han identificado los siguientes costes en la ejecución del mismo:

Costes materiales (90€):

- Saco de pellets de polipropileno (50 kg): En la fabricación de las piezas se gastó el saco completo, que tiene un coste de 90€.
- Maquinaria, molde y equipos de medida: Fueron adquiridos por el Laboratorio de Fabricación de la ETSII UPM con anterioridad al proyecto y por tanto no se imputa su coste, al considerarse amortizados.
- Material para la formación del estudiante: Los materiales empleados para la formación del estudiante en polímeros y procesos de inyección fueron libros disponibles en la biblioteca del Laboratorio de Fabricación de la ETSII UPM y artículos disponibles en internet de forma gratuita. Por lo tanto, no hay costes asociados a este concepto.
- Licencias de programas informáticos empleados: Los programas utilizados durante la ejecución del proyecto han sido programas gratuitos, como *ImageJ*, o aquellos cuya licencia es proporcionada por parte de la UPM a todos sus estudiantes, como *MoldFlow*. Por lo tanto, tampoco hay costes asociados a esta partida.

Costes mano de obra (5340€):

- Fabricación piezas inyectadas: Se estiman 55 horas de trabajo del estudiante con un coste de 12€/h, lo que supone un coste de 660€.
- Medición defectos: Se estiman 50 horas de trabajo del estudiante con un coste por hora de 12€, dando lugar a un coste de 600€.
- Análisis resultados de las mediciones: Se estiman 40 horas de trabajo del estudiante con un coste de 12€/h, dando lugar a un coste total de 480€.
- Redacción de la memoria: Se estiman 200 horas de trabajo del estudiante con un coste de 12€/h, suponiendo un coste de 2400€.
- Supervisión por parte de la tutora del proyecto: Se estiman 30 horas de trabajo de la tutora para guiar y controlar la actividad del estudiante, con un coste horario de 30€/h, lo que supone 900€.
- Formación en el manejo de la maquinaria: Se estiman 15 horas de trabajo de un técnico de taller de fabricación, con un coste asociado de 20€/h, suponiendo un coste de 300€.

Por lo tanto, el presupuesto total del proyecto asciende hasta los **5430€**.

En lo relativo a la planificación temporal, este proyecto ha tenido una duración total de **398 días**. A continuación, en la Figura 11-1 se muestra el diagrama de Gantt de este proyecto, donde se pueden observar las actividades que se han ido desarrollando a lo largo del mismo:

PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO

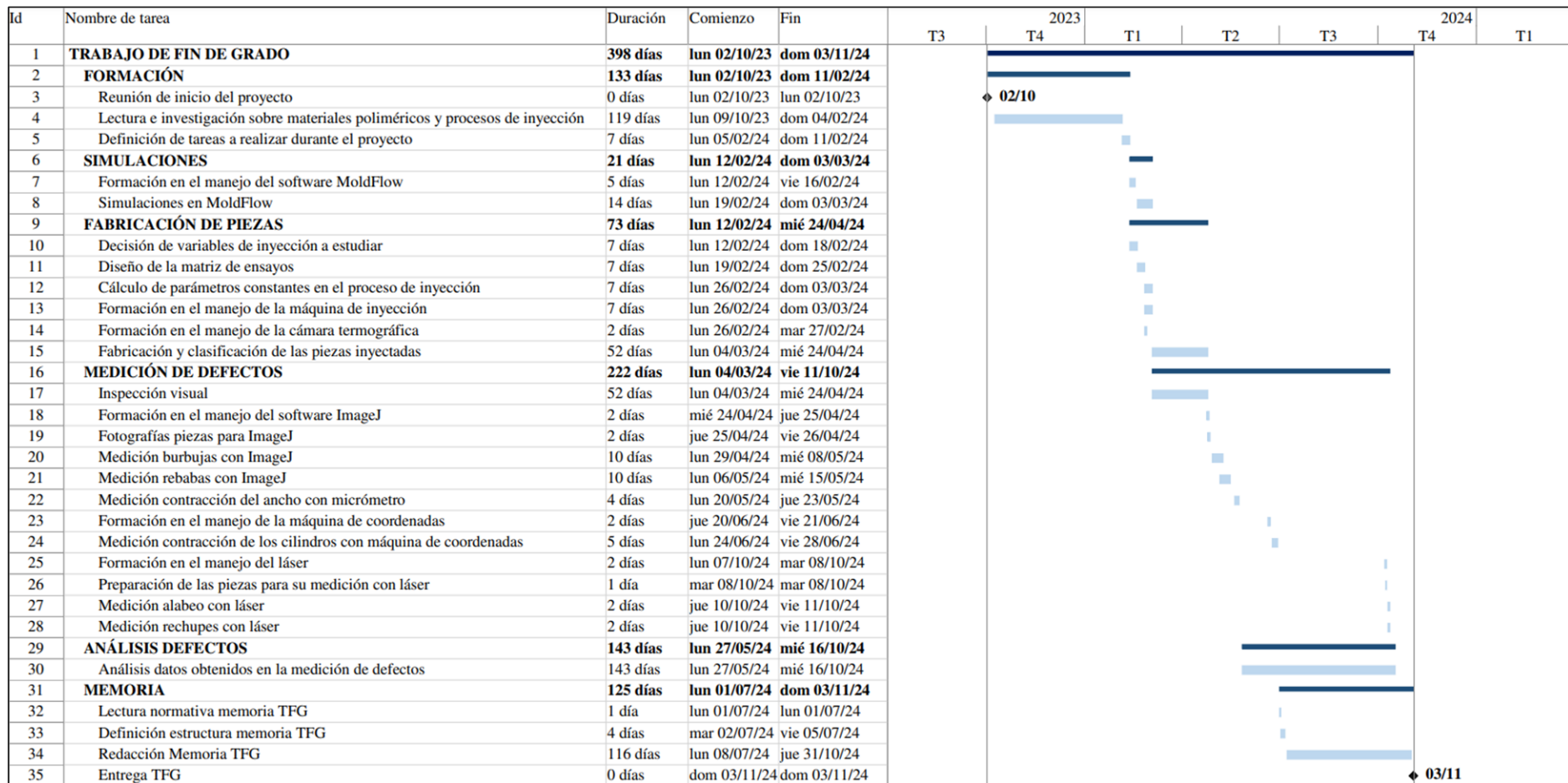


Figura 11- 1 Diagrama de Gantt del proyecto

12. REFERENCIAS:

- [1] *Moldeo por inyección de plásticos. Volumen del mercado.* (s. f.). Mordor Intelligence. [En línea]. Disponible en: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/plastics-injection-molding-market>. Accedido el 10 de agosto 2024.
- [2] *Moldeo por inyección.* (2023, 9 febrero). Dassault Systèmes. [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/injection-molding>
- [3] Michaeli, Greif, Kaufmann, Vossebürguer. (1992). *Introducción a la tecnología de los plásticos.* Hanser Editorial.
- [4] Sirtoli, M. (1963). *Moldeo por inyección de resinas termoplásticas.* Publicaciones del Departamento de Plásticos. Patronato «Juan de la Cierva», de investigación técnica. C.S.I.C.
- [5] *Moldeo por inyección de plásticos - La máquina inyectora de plástico.* (s. f.). Total-Manufacturing. [En línea]. Disponible en: <https://total-manufacturing.com/produccion/procesos-de-manufactura/inyeccion-plasticos-maquina/>. Accedido el 10 de agosto 2024.
- [6] *Resistencias Eléctricas para máquinas de inyección.* (s. f.). Resistencias Eléctricas Industriales. [En línea]. Disponible en: <https://juliomartineznaya.com/resistencias-electricas-para-maquinas-de-inyeccion/>. Accedido el 15 de agosto 2024.
- [7] *El mecanismo del husillo.* (s. f.). Interempresas. [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/159596-El-mecanismo-del-husillo.html>. Accedido el 16 de agosto 2024.
- [8] SEOMoldblade. (2024, 16 abril). *Partes de la máquina de inyección.* Moldblade. [En línea]. Disponible en: <https://moldblade.com/partes-de-la-maquina-de-inyeccion/>
- [9] M. (s. f.). *INYECCION DE MATERIALES PLASTICOS.* Tecnología de los Plásticos. [En línea]. Disponible en: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/inyeccion-de-materiales-plasticos-i.html>. Accedido el 22 de agosto 2024.
- [10] C. (2024, 26 junio). *¿Cuáles son las diferencias entre los moldes de múltiples cavidades y familiares?* Rapiddirect. [En línea]. Disponible en: <https://www.rapiddirect.com/es/blog/multi-cavity-molds-vs-family-molds/>
- [11] *¿Qué es un molde de inyección?* (2024, 26 julio). Idelt. [En línea]. Disponible en: <https://idelt.com/es/que-es-un-molde-de-inyeccion/>
- [12] SEOMoldblade. (2024, 20 febrero). *Materiales para la Construcción de Moldes de Inyección.* Moldblade. [En línea]. Disponible en: <https://moldblade.com/materiales-para-la-construccion-de-moldes-de-inyeccion-de-plastico/>
- [13] *Partes de un molde de inyección de plástico.* (2023, 14 abril). Fow Mould. [En línea]. Disponible en: <https://imolde.com/partes-de-moldes-de-inyeccion-de-plastico/>
- [14] Páramo, J. J., Arredondo, J. F. R., Mora, H. P., & Gómez, E. A. (2019). *Análisis de un proceso de inyección de plástico por interacción fluido estructural y cambio de estado.* Acta Universitaria, 29, 1-18. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.15174/au.2019.2150>
- [15] Sánchez Valdés, Yáñez Flores, Rodríguez Fernández. (2002). *Moldeo por inyección de Termoplásticos.*
- [16] *Injection Molding Defects: Causes and How to Prevent them.* (2022, 29 septiembre). Rapiddirect. [En línea]. Disponible en: <https://www.rapiddirect.com/es/blog/injection-molding-defects/>
- [17] Tsai, H. (2020, 1 julio). *Cooling Rate of Injection Molding.* [En línea]. Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/cooling-rate-injection-molding-hank-tsai>

- [18] Connor, N. (2019, 17 septiembre). *¿Qué es la difusividad térmica? Definición. Thermal Engineering.* [En línea]. Disponible en: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-difusividad-termica-definicion/>
- [19] Kulkarni, S. (2022, 8 julio). *Moldeo por inyección: considere el cojín cuando busque consistencia disparo a disparo.* Gardner Business Media, Inc. [En línea]. Disponible en: <https://www.pt-mexico.com/columnas/moldeo-por-inyeccion-considerere-el-cojin-cuando-busque-consistencia-disparo-a-disparo>
- [20] Xiang, G. (2024, 30 septiembre). *¿Qué es la contrapresión en el moldeo por inyección?* HITOP Industrial. [En línea]. Disponible en: <https://hitopindustrial.com/es/contrapresion-de-moldeo-por-inyeccion/>
- [21] *¿Qué son los polímeros y cómo se clasifican?* (2023, 18 abril). ZS España. [En línea]. Disponible en: <https://www.zschimmer-schwarz.es/noticias/que-son-los-polimeros-y-como-se-clasifican/>
- [22] M. (s. f.). *Polímeros cristalinos y amorfos.* Textos Científicos. [En línea]. Disponible en: <https://www.textoscientificos.com/polimeros/estructura>. Accedido el 3 de septiembre 2024.
- [23] Mexpolimeros. (s. f.). *Viscosidad.* Polímeros Termoplásticos, Elastómeros y Aditivos. [En línea]. Disponible en: <https://www.mexpolimeros.com/viscosidad.html>. Accedido el 1 de septiembre 2024.
- [24] *Viscosidad. Ley de Newton.* (s. f.). [En línea]. Disponible en: <https://www.uv.es/uvweb/fisica/es/catalogo-demos/fluidos/viscosidad-ley-newton-1286053998293/DemoExp.html?id=1286110799374>. Accedido el 5 de septiembre 2024.
- [25] *Fluidos viscosos.* (s.f.). [En línea]. Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3623/1/tema2RUA.pdf>. Accedido el 10 de septiembre 2024.
- [26] *QUÉ ES EL POLIPROPILENO.* (s.f.). [En línea]. Disponible en: <https://www.ensavelia.com/blog/que-es-el-polipropileno-id13.htm>. Accedido el 13 de septiembre 2024.
- [27] *Polipropileno.* (s. f.). [En línea]. Disponible en: <https://pslc.ws/spanish/pp.htm>. Accedido el 11 de septiembre 2024.
- [28] Ricardo Muñoz, R. (2023, 30 mayo). *Polipropileno: qué es y sus características.* Plastico. [En línea]. Disponible en: <https://www.plastico.com/es/noticias/polipropileno-que-es-y-sus-caracteristicas>
- [29] *Polipropileno.* (s. f.). CMEMaterials. [En línea]. Disponible en: <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/polipropileno>. Accedido el 11 de septiembre 2024.
- [30] *Entendiendo los defectos de la inyección de plástico parte 1.* (2022, 13 enero). DMD. [En línea]. Disponible en: <https://dmd.com.mx/2022/01/13/entendiendo-los-defectos-de-la-inyeccion-de-plastico-parte-1/>
- [31] Xiang, G. (2024, 30 septiembre). *Prevención de rebabas en moldeo por inyección: causas y soluciones.* HITOP Industrial. [En línea]. Disponible en: <https://hitopindustrial.com/es/flash-de-moldeo-por-inyeccion/>
- [32] SEOMoldblade. (2024, 8 febrero). *Inyección de plástico: Principales defectos en las Piezas Inyectadas.* Moldblade. [En línea]. Disponible en: <https://moldblade.com/inyeccion-de-plastico-principales-defectos-en-las-piezas-inyectadas/>
- [33] Zatecsa. (2023, 30 mayo). *Defectos en inyección de plástico: Rechupes.* ZATEC | Technical Engineering Plastic Injection Molding Company. [En línea]. Disponible en: https://www.zatecsa.com/defectos-en-inyeccion-de-plastico_rechupes/

- [34] Lee Y. (2024, 11 mayo). *Burbujas Causas y Soluciones / Defectos Del Moldeo Por Inyección*. FIRST MOLD. [En línea]. Disponible en: <https://firstmold.com/es/tips/bubbles/>
- [35] *The Causes and Solutions of Warping in Injection Molding*. (2023, 7 agosto). Prototool. [En línea]. Disponible en: <https://prototool.com/es/warping-in-injeciton-molding/>
- [36] Otieno, S.O., Wambua, J.M., Mwema, F.M. et al. (2024, 9 marzo). *A predictive modelling strategy for warpage and shrinkage defects in plastic injection molding using fuzzy logic and pattern search optimization*.
- [37] Vanek, J., Ovsik, M., Stanek, M., Hanzlik, J., Pata, V. (2024, 16 agosto). *Study of Injection Molding Process to Improve Geometrical Quality of Thick-Walled Polycarbonate Optical Lenses by Reducing Sink Marks*.
- [38] Mourya, A., Nanda, A., Parashar, K., Sushant, N., Kumar, R. (2022). *An explanatory study on defects in plastic molding parts caused by machine parameters in injection molding process*.
- [39] Coca-González, M., Jiménez, M. (2024). *Warpage: Causes, manufacturing processes and future challenges: A review*.
- [40] Hatta N., Zain, A., Sallehuddin R., Rahim S. (2018). *Overview of the Injection Moulding Optimisation for Shrinkage Defect*.
- [41] Onyiego, J., Wakiru, J. (2024). *A simulation-based optimization evaluating process and feed system effect in plastic injection molding*.
- [42] Zhang, L., Zhao G., Dong, G., Li, S., Wang, G. (2015). *Bubble morphological evolution and surface defect formation mechanism in the microcellular foam injection molding process*.
- [43] Chartoff R. P. & Sircar A. K. (2004, 15 octubre). *Thermal Analysis of Polymers*. Encyclopedia of Polymer Science and Technology.
- [44] Baumgartner, T. (s. f.). *TA-Instruments DSC Q200 / BaumGartner Research Group*. [En línea]. Disponible en: <https://www.yorku.ca/tbaumgar/photo-album/ta-instruments-dsc-q200.html>. Accedido el 27 de septiembre 2024.
- [45] *TA Instruments TGA Q50 Thermogravimetric Analyzer 953501.901 TGA/MS Operation*. (s. f.). Rhino Trade LLC. [En línea]. Disponible en: <https://www.rhinotradellc.com/shop/ta-instruments-tga-q50-thermogravimetric-analyzer-953501-901-tga-ms-operation/>. Accedido el 27 de septiembre 2024.
- [46] *Tabla de emisividades*. (s.f.). [En línea]. Disponible en: <https://www.testo.com/es-ES>. Accedido el 1 de septiembre 2024.
- [47] Coreño-Alonso, J. (2010, 1 octubre). *Relación estructura-propiedades de polímeros*. Educación Química, vol. 21.
- [48] Isayev, A. I., Liu, S. J. (2006). *Injection molding and compression molding of polymers*.
- [49] Escobar-Guachambala, M. Á., Caicedo-Reyes, J. I., Buñay-Guamán, J.S., Palacios Mazón, D.G. (2022). *Determinación de los parámetros de inyección para ladrillos plásticos en polipropileno*. Ciencias Técnicas y Aplicadas.
- [50] Crawford, R. J., Throne, J. L. (2001). *Rotational Molding Technology*.
- [51] *Qué son los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Agenda 2030*. (s. f.). Cuaderno de Valores: El Blog de Educo. [En línea]. Disponible en: <https://www.educo.org/blog/que-son-los-17-objetivos-de-desarrollo-sostenible>. Accedido el 3 de octubre 2024.

13. ANEXOS:

ANEXO 1:

ECOLEN® HZ40S

Polypropylene Homopolymer
HELLENIC PETROLEUM S.A.

PROSPECTOR®

www.ulprospector.com

Technical Data

Product Description

ECOLEN® HZ40S is a polypropylene homopolymer, featuring:

- easy processability,
- excellent antigasfading properties.

Typical applications for this grade are

- continuous filaments (CF)
- bulk continuous filament (BCF)
- and staple fibres.

ECOLEN® HZ40S is suitable for food contact

General

Material Status	• Commercial: Active
Literature ¹	• Technical Datasheet (English)
Availability	• Europe
Features	• Food Contact Acceptable • Gas-fading Resistant • Good Processability • Homopolymer
Uses	• Filaments • Staple Fibers
Forms	• Pellets
Processing Method	• Filament Extrusion

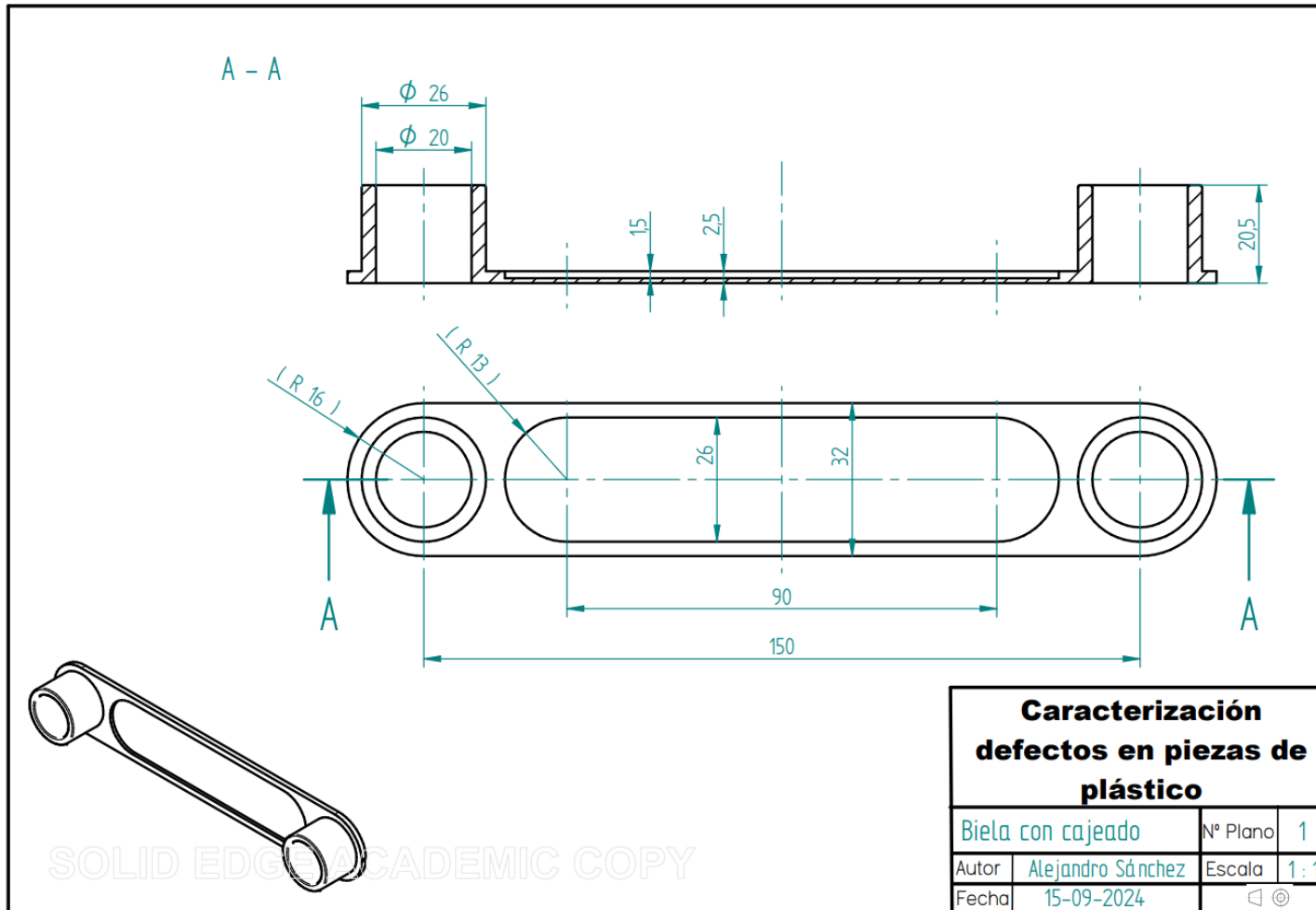
Physical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Density / Specific Gravity	0.902	0.900 g/cm ³	ASTM D792
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (230°C/2.16 kg)	25 g/10 min	25 g/10 min	ASTM D1238
Mechanical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Strength (Yield)	4640 psi	32.0 MPa	ASTM D638
Tensile Elongation (Yield)	13 %	13 %	ASTM D638
Flexural Modulus	218000 psi	1500 MPa	ASTM D790
Impact	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Notched Izod Impact (73°F (23°C))	0.56 ft-lb/in	30 J/m	ASTM D256

Notes

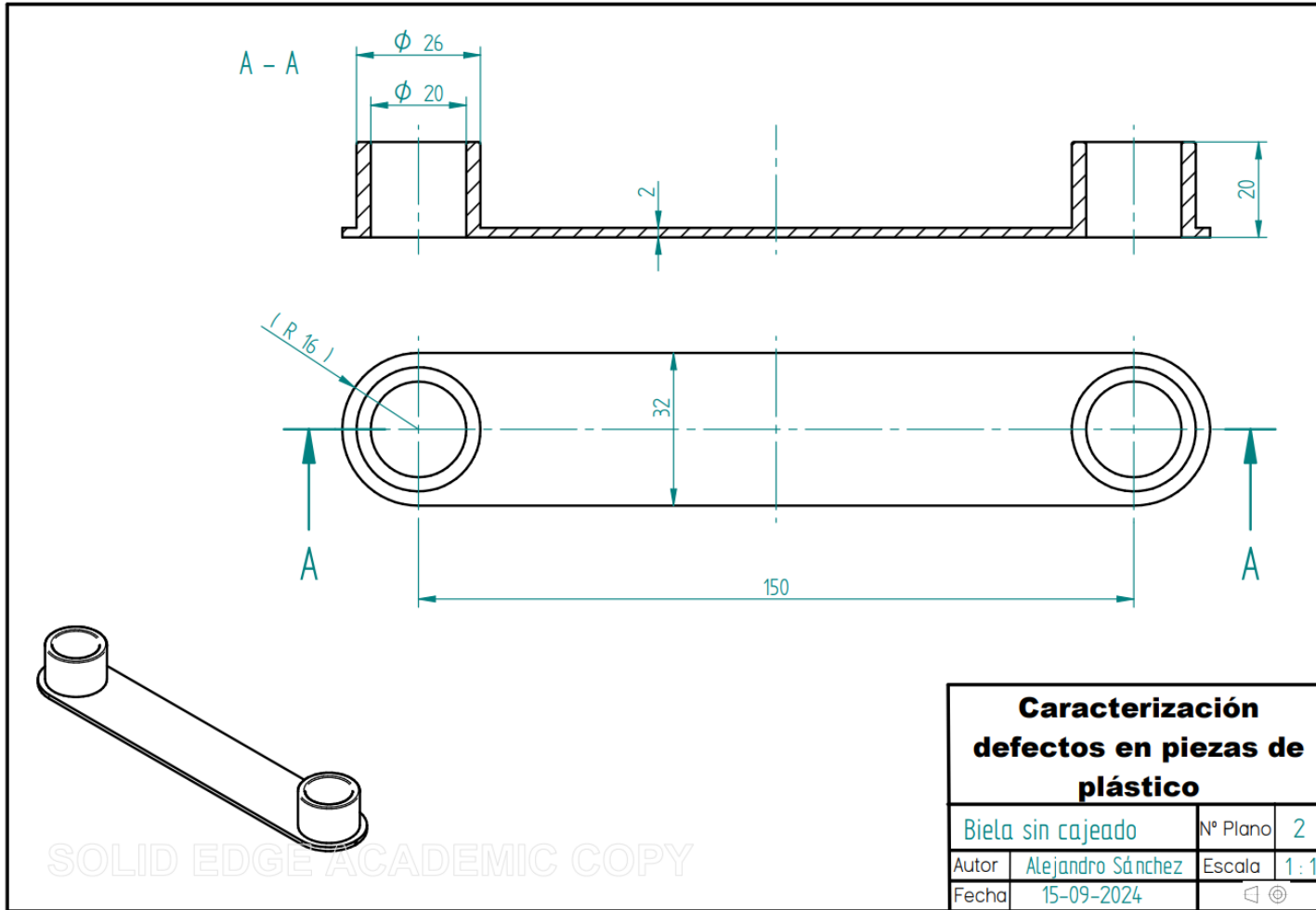
¹ These links provide you with access to supplier literature. We work hard to keep them up to date; however you may find the most current literature from the supplier.

² Typical properties: these are not to be construed as specifications.

ANEXO 2:



ANEXO 3:



ANEXO 4:

Esta ficha técnica recoge información de varias máquinas. Para la inyectora empleada en el proyecto se toman los valores intermedios de la zona seleccionada en la imagen, al trabajar con el modelo 165/55H y tener un husillo de 30 mm de diámetro.

MATEU & SOLÉ GAMA METEOR Página 17

4. DATOS TÉCNICOS

4.1 Características Técnicas y Dimensiones.

INYECCION		CLASIFICACION EUROMAP	
		165/55H	270/55H
Diámetro del husillo	mm	26-30-35	30-35-40
Relación L/D del husillo		20,5	20,5
Presión máxima de inyección	Bar	2270-1705-1250	2365-1735-1329
Volumen teórico de inyección	cm ³	72-95-130	113-155-201
Peso máximo de inyección (PS)	g	65-86-118	105-140-185
Caudal de inyección	cm ³ /s	70-93-126	67-91-118
Capacidad de plastificación	g/s	20-35-50	40-50-60
Velocidad regulable del husillo	min-1	337	216
Par de giro del husillo	Nm	445	696
Zonas de calefacción	nº	4+1	4+1
Potencia de calefacción	KW	7,18-8,38-9,58	8,38-9,58-11,58
Fuerza máxima apoyo boquilla	KN	90,7	90,7
Carrera máxima de la boquilla	mm	270	320
CIERRE			
Fuerza de cierre	KN (Mp)		550(55)
Carrera máxima de apertura	mm		350
Espesor molde ajustable de ...a.	mm		120-300
Dimensiones de los platos HxV	mm		525x525
Paso entre columnas HxV	mm		355x355
Distancia máxima entre platos	mm		650
Diámetro de las columnas	mm		60
Fuerza máxima de expulsión	KN		44
Carrera máxima de expulsión	mm		130
GENERAL			
Ciclos en vacío (Euromap 6a)	min-1		60
Potencia del motor	KW (CV)		15(20)
Potencia total instalada	KW	22,18-23,38-24,58	23,38-24,58-26,68
Capacidad depósito aceite +auxiliar	L		170+20
Peso neto de la máquina	Kg		3200

ANEXO 5:



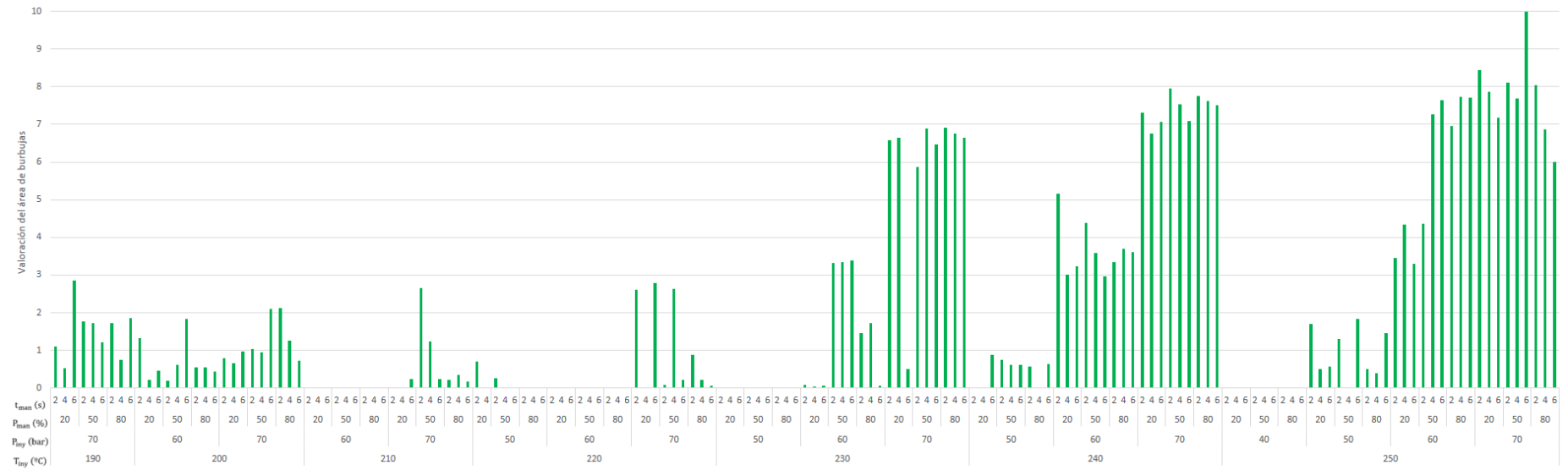
Nombre usuario
Admin
20.06.2024 13:37

Número del protocolo (0)

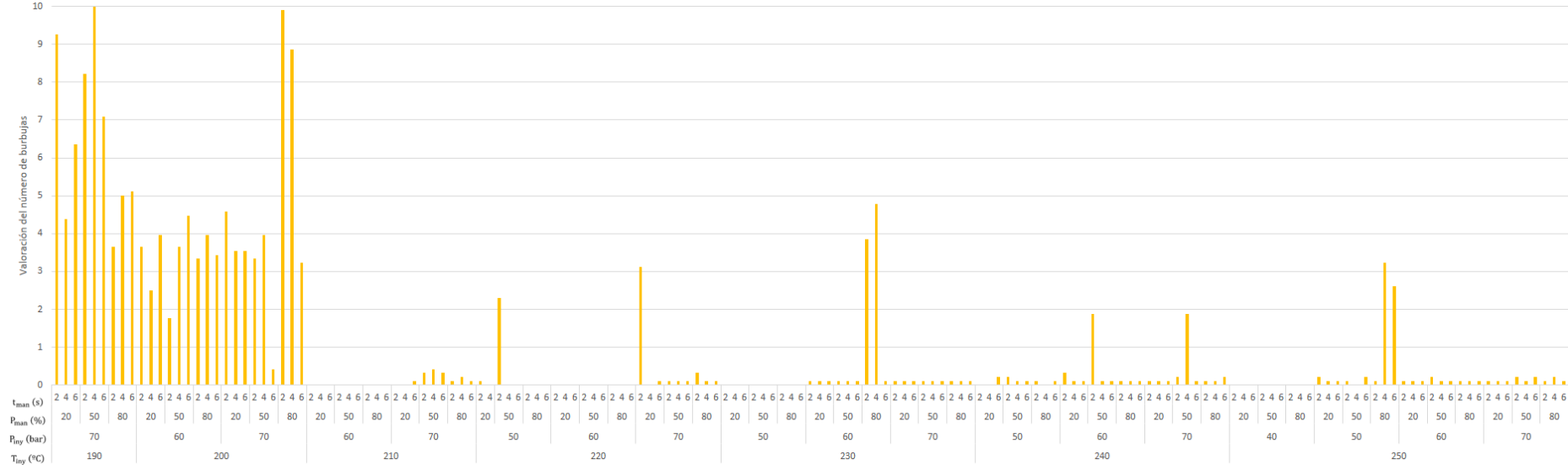
Nombre pieza
Pieza 90

1	2	3	4					
El. No.	Line No	Element	Pnt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Y-Angle Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance
1	2	MESA Gauss	6	0.001	0.000	11.118		0.001
				89:59:47	90:00:03	0:00:14		
1	6	IZQ16 Gauss	5	183.899	130.024	16.006	19.024	0.028
1	9	CILIZQ Gauss	10	183.953	130.118	13.006	19.089	0.095
				88:55:58	87:51:58	177:36:50		
2	12	IZQ10 Gauss	5	184.003	130.229	10.014	19.176	0.034
3	15	DER16 Gauss	5	332.045	132.645	16.014	19.102	0.010
2	18	CILDER Gauss	10	332.083	132.605	13.003	19.129	0.041
				88:56:40	90:39:52	178:45:09		
4	21	DER10 Gauss	5	332.140	132.568	10.011	19.147	0.008
1	24	EB-EA_B					87:36:50	
2	25	EB-EA_B					-88:45:09	
1	26	DIST10 Sin compensación		148.146	2.621	0.000	148.169	
2	27	DIST10 Sin compensación		148.137	2.339	0.000	148.156	

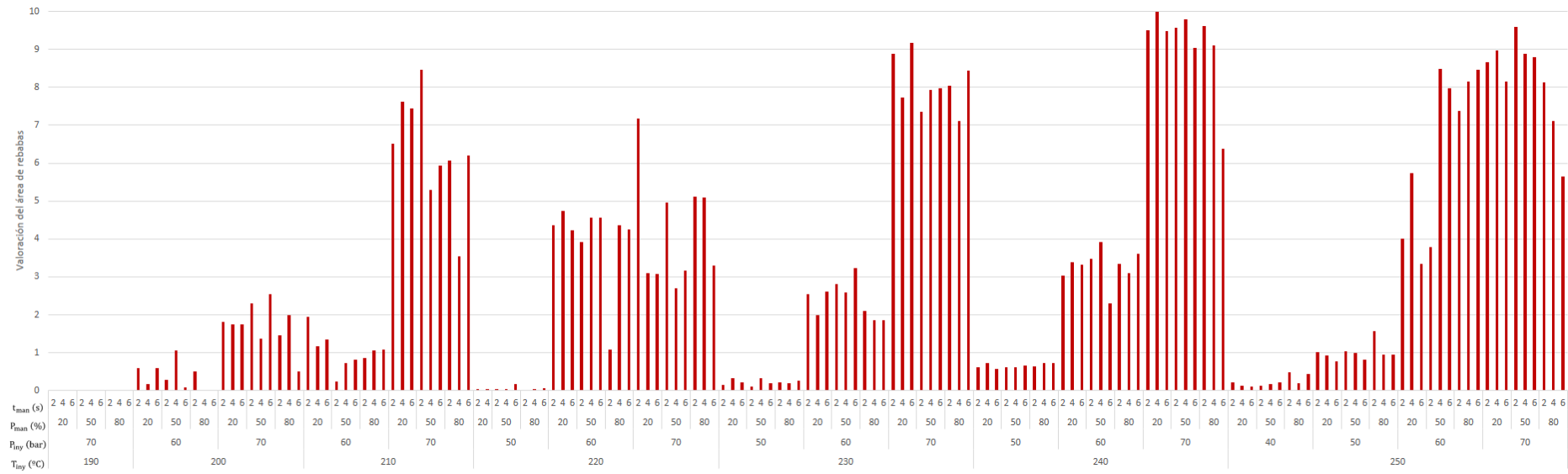
ANEXO 6:



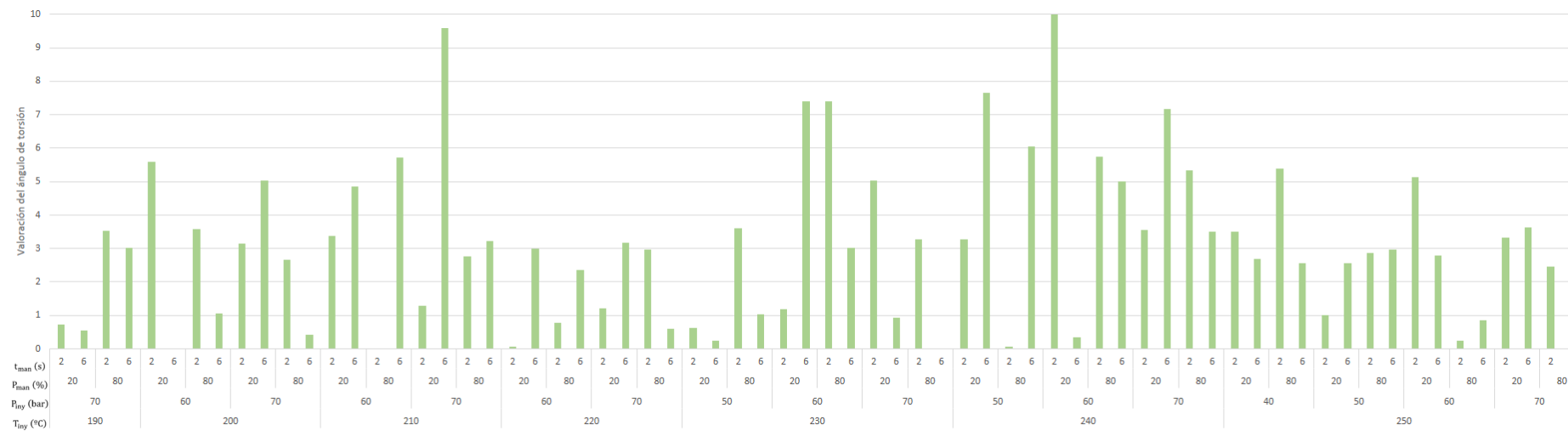
ANEXO 7:



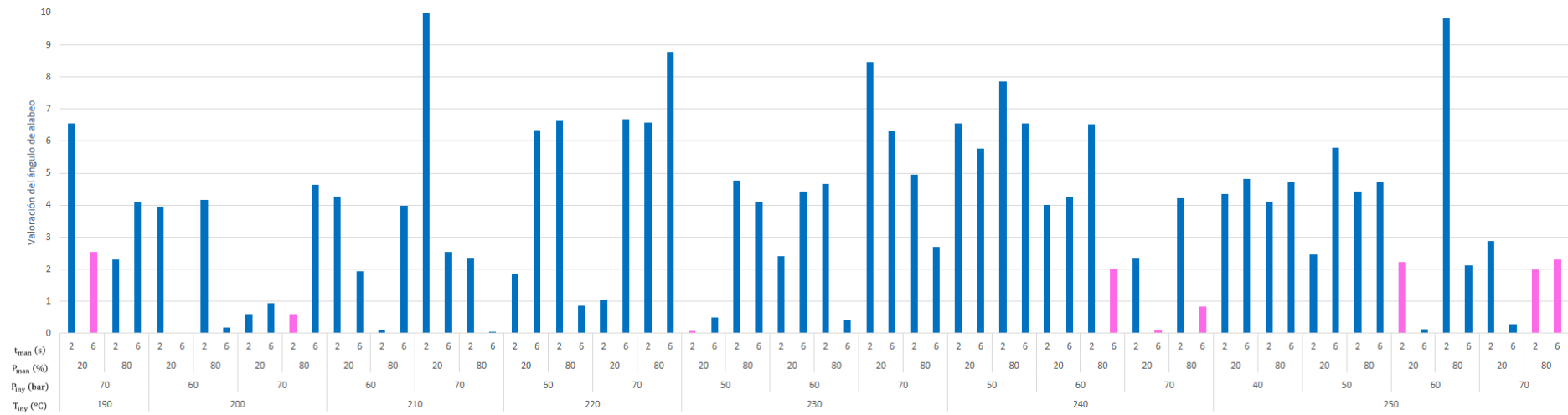
ANEXO 8:



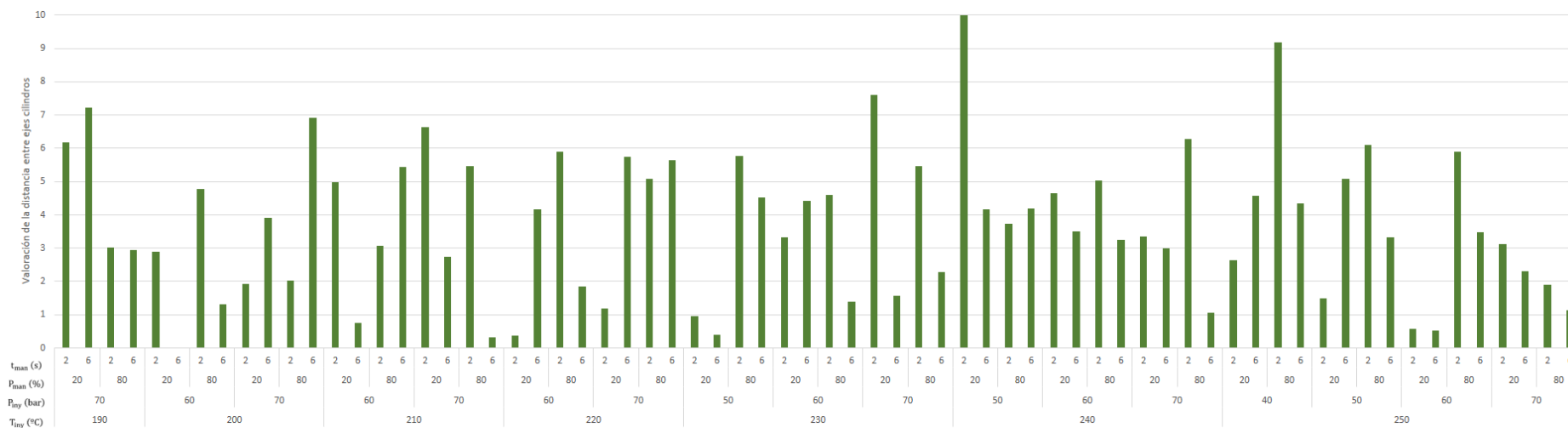
ANEXO 9:



ANEXO 10:



ANEXO 11:



ANEXO 12:

