

Análisis del proceso de moldeo por inyección utilizando un software comercial.

Por:

Luis José Señorans Gorga

Tutora: Patricia Frontini

Co-tutora: Camila Quintana

Universidad Nacional de Mar del Plata

Facultad de Ingeniería – Ingeniería en Materiales

- Agosto 2018 -





RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

*Este trabajo va dedicado a la memoria de Mónica, mi madre, y Gladys, mi abuela,
quienes hubiese querido que compartan el momento conmigo.*

Agradecimientos

A mis padres, Osvaldo y Mónica, que siempre confiaron en mí y me apoyaron con la carrera.

A mi novia, Ornella, que supo motivarme para “recibirme de una buena vez”.

A mis tutoras, Patricia Frontini y Camila Quintana, por la paciencia y ayuda con todo lo que necesité para realizar este trabajo.

Al José Luis Nicolini, por compartirme su experiencia en la industria del polipropileno.

<u>Índice</u>	Página
Resumen.....	8
CAPÍTULO 1: Motivación y objetivos.....	9
1.1 Definición del problema.....	9
1.2 Objetivos.....	11
CAPÍTULO 2: Introducción.....	12
2.1 Estado del arte de inyección de polímeros termoplásticos.....	12
2.1.1 Aspectos generales de polímeros termoplásticos.....	12
2.1.1.1 Polipropileno.....	12
2.1.1.2. Homopolímero y copolímero aleatorio de Polipropileno.....	13
2.1.2 Proceso de moldeo por inyección.....	13
2.1.2.1 Máquina inyectora.....	14
2.1.2.2 Molde.....	15
2.1.2.3 Etapas del ciclo en el moldeo por inyección.....	15
2.1.2.4 Variables operacionales.....	15
2.1.2.5 Defectos en el moldeo por inyección.....	17
2.2 Principio de fotoelasticidad y estimación de tensiones residuales.....	18
2.2.1 Luz polarizada.....	18
2.2.2 Características de la luz.....	19
2.2.3 Retardo de ondas.....	19
2.2.4 Birrefringencia.....	20
2.2.5 Polariscopio.....	20
2.2.6 Cálculo de tensiones residuales.....	21
2.3 Simulación del proceso de moldeo por inyección: Moldex3D.....	21
2.3.1 Mallas.....	22
2.4 Referencias.....	23
CAPÍTULO 3: Inyección.....	24
3.1 Material utilizado.....	24

3.2 Máquina utilizada.....	26
3.2.1 Instrumentación del molde.....	27
3.3 Puesta a punto de la inyectora.....	27
3.4 Estudio de llenado incompleto.....	28
3.5 Diseño de experimentos: Matriz Taguchi.....	28
CAPÍTULO 4: Simulación.....	30
4.1 Proceso de simulación.....	30
4.2 Material elegido para las simulaciones.....	32
4.3 Simulación de tensiones residuales.....	33
4.3.1 Tensiones residuales inducidas por flujo.....	33
4.3.2 Tensiones residuales inducidas térmicamente.....	34
CAPÍTULO 5: Análisis y resultados.....	35
5.1 Análisis del llenado incompleto.....	35
5.2 Contribución al llenado de los canales.....	35
5.3 Estudios de gasto computacional y convergencia.....	38
5.4 Peso de las placas inyectadas.....	39
5.5 Defectos de inyección.....	40
5.5.1. Longitud de la línea de soldadura.....	41
5.6 Diseño de experimentos y condición optimizada en Moldex3D.....	41
5.7 Gráficos de temperatura y presión.....	43
5.8 Tensiones residuales.....	44
5.9 Procesamiento del Polipropileno.....	44
CAPÍTULO 6: Sumario y conclusiones.....	46

Índice de imágenes

Figura 2.1: Estructura de la macromolécula de Polipropileno.....	12
Figura 2.2: Esquema genérico de una inyectora de polímeros.....	14
Figura 2.3: Ventana de proceso en moldeo por inyección.....	17
Figura 2.4: Caso de rebabas en piezas inyectadas.....	17

Figura 2.5: Esquema de avance de los frentes de flujo y formación de la línea de soldadura.....	18
Figura 2.6: Polarización de la luz.....	19
Figura 2.7: esquema de un polariscopio genérico de geometría circular.....	20
Figura 2.8: Interfaz del ColorMania 6.3.....	21
Figura 2.9: Malla eDesign (izquierda) y malla BLM (derecha).....	22
Figura 3.1: Inyectora Multiplas HM-10T del laboratorio de materiales de la U.N.M.d.P.....	26
Figura 3.2: Atemperador MTR 2E9O.....	26
Figura 3.3: Sensor combinado de temperatura y presión Kistler 6190CA. Izquierda: Detalle del sensor y dimensiones. Derecha: Ubicación en el molde.....	27
Figura 4.1: Definición de atributos y punto de inyección en el módulo Designer de Moldex3D.....	30
Figura 4.2: Diámetros de ambos canales de inyección en el módulo Designer, vista superior.....	30
Figura 4.3: Molde y canales de refrigeración, con entradas y salidas de agua definidas en Designer.....	31
Figura 4.4: Diferencia de elementos en el mallado de la pieza y el runner.....	31
Figura 4.5: Nodo sensor y mallado en Moldex3D designer.....	32
Figura 4.6: Volumen específico vs. Temperatura a diferentes presiones (diagrama PVT), PP Exxonmobil.....	32
Figura 4.7: Desarrollo de las tensiones residuales inducidas por flujo. Las partes más oscuras representan la capa solidificada. Zona (1): Enfriamiento, corte y orientación elevados. Zona (2): Enfriamiento, corte y orientación bajos.....	33
Figura 4.8: Distribución de tensiones residuales en la contracción dispereja.....	34
Figura 4.9: Distribución asimétrica de tensiones residuales y orientación del alabeo en el enfriamiento disperejo.....	34
Figura 5.1: Placas inyectadas y simuladas para análisis de llenado incompleto con % de llenado asociado. Tiny=185°C.....	36
Figura 5.2: Placas inyectadas y simuladas para análisis de llenado incompleto con % de llenado asociado. Tiny=200°C.....	37
Figura 5.3: Contribución al llenado por parte de los canales de inyección, predicha por Moldex3D.....	38
Figura 5.4: Aire atrapado en placas inyectadas (izq.) y simuladas (der.).....	40

Figura 5.5: Placa inyectada experimental (izq.) vs. Placa simulada en Moldex3D (der.) con sus líneas de soldadura. Condición 4.....	41
Figura 5.6: Ventana de definición de valores para los parámetros del diseño de experimentos en Moldex3D.....	42
Figura 5.7: Condición optimizada por Moldex3D.....	42

Índice de tablas

Tabla 2.1: Rangos de temperatura para homopolímero y copolímero de Polipropileno.....	13
Tabla 3.1: Propiedades principales Polipropileno Cuyolen 3240SC.....	24
Tabla 3.2: Parámetros del modelo Cross-WLF, Polipropileno Cuyolen 3240SC.....	25
Tabla 3.3: Variables analizadas con sus respectivos valores mínimos y máximos.....	29
Tabla 3.4: Condiciones resultantes aplicando el método de la matriz Taguchi.....	29
Tabla 4.1: Comparación de parámetros Cross-WLF, Polipropileno Cuyolen y Polipropileno Exxonmobil.....	33
Tabla 5.1: Comparación de los tipos de malla eDesign.....	38
Tabla 5.2: Comparación de resultados para diferentes mallados.....	39
Tabla 5.3: Pesos experimentales y simulados de las placas.....	40
Tabla 5.4: Longitudes experimentales y simuladas de las líneas de soldadura.....	41
Tabla 5.5: Máximas tensiones residuales experimentales y simuladas para cada condición de inyección.....	44

Índice de anexos

ANEXO I: Hoja técnica Polipropileno CUYOLEN 3240SC.....	48
ANEXO II: Hoja técnica Polipropileno Exxonmobil Exxtral LNV 010.....	49
ANEXO III: Molde utilizado y geometría de las placas inyectadas.....	50
ANEXO IV: Pesos de las probetas inyectadas y definición de error.....	51
ANEXO V: Gráficos de temperatura y presión obtenidos por el sensor y gráficos obtenidos de las simulaciones.....	52
ANEXO VI: Tabla de retardos y colores correspondientes a la luz emitida en el polariscopio.....	57
ANEXO VII: Tensiones residuales obtenidas por método fotoelástico.....	58

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un análisis del moldeo por inyección, el cual es uno de los métodos más utilizados para el procesamiento de polímeros termoplásticos. Para dicho análisis, se utilizó un paquete de software comercial: Moldex3D.

La pieza a inyectar elegida es de geometría simple: placa rectangular con bordes ligeramente redondeados y una línea de soldadura producto de las condiciones de procesamiento.

Los bloques principales en los cuales se divide el trabajo son, para la inyección experimental: moldeo por inyección de una pieza de geometría simple utilizando polipropileno, estudio de llenado incompleto en función de la temperatura y la presión, utilización del método de matriz Taguchi, determinación de perfiles de temperatura y presión. Para la simulación: obtención de la curva reológica del material para elección del material de la base de datos, estudio de convergencia de las mallas de elementos finitos, simulación y comparación del estudio de llenado incompleto, simulación de las condiciones de inyección obtenidas por Taguchi, predicción de los perfiles de temperatura y presión en un nodo sensor, determinación de una condición de inyección óptima, y por último la predicción de las tensiones residuales en cada condición de inyección. Por último, se empleó la teoría de fotoelasticidad para realizar una estimación de tensiones residuales por método óptico.

Palabras clave: Polipropileno, moldeo por inyección, procesamiento de termoplásticos, tensiones residuales, simulación, Moldex3D.

CAPÍTULO 1: MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS.

1.1 Definición del problema

El moldeo por inyección es una de las técnicas más utilizadas para el procesamiento de polímeros. La misma ofrece ventajas frente a otras condiciones de procesamiento, tales como: buen acabado superficial, posibilidad de procesar piezas de geometría compleja sin necesidad de operaciones secundarias, y bajos costos para producción masiva. Sin embargo, debido a las deformaciones complejas y a la historia térmica y de presión que el polímero fundido trae de su procesamiento, se generan tensiones residuales. Estas tensiones actúan internamente a temperatura ambiente y tienen los mismos efectos en el material que las tensiones aplicadas externamente, resultando en contracciones volumétricas y alabeos en el producto final.

Durante el moldeo por inyección de un polímero termoplástico, el material sufre cambios termo-mecánicos que intervienen en el desarrollo de su morfología, lo cual afecta directamente las propiedades mecánicas finales de las piezas inyectadas. Sin embargo, las características micro estructurales del material inducidas por el procesamiento (tales como la presencia de defectos de flujo) no siempre son visibles al ojo desnudo, ni pueden ser estudiadas sin producir la destrucción de la pieza. En cambio, pueden ser predichas mediante la simulación. Es aquí cuando la simulación se convierte en la clave para poder relacionar los parámetros de procesamiento, la estructura interna del material y el desempeño mecánico. [1]

La presencia de tensiones residuales debido al procesamiento en piezas inyectadas es aún más negativa en el caso de piezas que poseen defectos inherentes tales como líneas de soldadura. Los productos poliméricos moldeados por inyección siempre tienen tensiones residuales que pueden afectar negativamente su performance, y éstas están directamente relacionadas con las condiciones de procesamiento, tales como: presión de holding, velocidad de inyección, temperatura de fundido y temperatura de molde, entre otras. Los ingenieros usualmente utilizan herramientas numéricas para simular el proceso de moldeo y determinar el estado de tensiones residuales después del procesamiento, además de parámetros relacionados, como la contracción volumétrica y los alabeos. [2]

El presente trabajo se divide en los siguientes bloques:

1. Moldeo por inyección de una pieza de polipropileno inyectada en un molde con geometría de placa rectangular que posee una línea de soldadura.

1.1 Estudio del llenado incompleto de la cavidad en función de la temperatura del polímero fundido y la presión de inyección, con el fin de determinar las condiciones umbrales de procesamiento.

1.2 Diseño de experimentos utilizando una matriz Taguchi.

1.3 Determinación de los perfiles experimentales de temperatura y presión.

2. Simulación del moldeo por inyección de acuerdo a las condiciones de procesamiento experimentales.

2.1 Obtención de la curva reológica del material como dato fundamental para la simulación.

2.2 Estudio de convergencia de la malla de elementos finitos utilizada para la simulación.

2.3 Simulación del ensayo de llenado incompleto y la comparación con los resultados experimentales.

2.4 Simulación del llenado de la cavidad y de la etapa de mantenimiento de la presión para cada una de las condiciones estudiadas.

2.5 Predicción de los perfiles de temperatura y presión en un punto de la malla de elementos finitos denominado nodo sensor que se ubica en la misma posición que el sensor instalado en la cavidad real.

2.6 Determinación a partir de la simulación de la condición óptima de procesamiento en cuanto a la minimización de la longitud de la línea de soldadura.

2.7 Predicción de las tensiones residuales para cada condición.

3. Determinación experimental de las tensiones residuales utilizando la técnica de fotoelasticidad.

4. Comparación y el análisis de los resultados.

1.2 Objetivos

El principal objetivo es la determinación de la relación entre variables de procesamiento, estructura interna inducida por el flujo y tensiones residuales, en una pieza moldeada por inyección que posee una línea de soldadura. Para este propósito se inyecta dicha pieza bajo diferentes condiciones de procesamiento y se utilizan como herramientas: el diseño de experimentos, la simulación computacional del llenado de la

cavidad, y la evaluación experimental de las tensiones residuales mediante la técnica de birrefringencia. En segundo lugar, se desea evaluar la capacidad predictiva del paquete comercial Moldex3D en las variables de procesamiento (distribución de presiones y temperaturas, ubicación de las líneas de soldadura, generación de heterogeneidades, etc.), mediante el contraste de los parámetros obtenidos de las simulaciones y los datos recopilados de la instrumentación de los moldes.

Se busca identificar y analizar el efecto de las variables del moldeo por inyección de piezas de polímeros termoplásticos, y cómo estas influyen en la morfología y las propiedades de las piezas finales. Finalmente, determinar las propiedades reológicas de los polímeros con los cuales se llevarán a cabo las inyecciones, ubicar las líneas de soldadura, detectar piezas intrínsecamente débiles, e instrumentar los moldes con sensores de presión y de temperatura comerciales (marca Kistler) para comparar las mediciones realizadas con las predicciones obtenidas del software de simulación Moldex3D.

CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN

2.1 Estado del arte de inyección de polímeros termoplásticos

El moldeo por inyección es un proceso ideal para la fabricación de una gran cantidad de piezas geométricamente complicadas. Una característica importante es que puede no ser posible resolver un problema en la producción mediante la variación de las condiciones de procesamiento, con lo cual, es indispensable prever los problemas en la etapa de diseño. La simulación del moldeo por inyección es, sin duda, el ejemplo más exitoso de simulación de los procesos de conformado de plásticos. Los altos costos asociados con la fabricación de los moldes y la probabilidad de que surjan problemas durante la etapa de producción (resultando en la necesidad de realizar costosas modificaciones en el molde), sumados a la pérdida de tiempo y al lucro cesante de la producción, hacen que la simulación del proceso sea de gran importancia para la industria. [3,4] Es relevante para el completo entendimiento de este trabajo el desarrollo de los siguientes temas:

2.1.1 Aspectos generales de polímeros termoplásticos

Los polímeros termoplásticos son materiales que a temperaturas relativamente altas, se vuelven deformables o flexibles, se derriten cuando se calientan y endurecen en un estado de transición vítrea cuando se enfría lo suficiente. Éstos, generalmente, poseen un elevado peso molecular y se usan para diversas aplicaciones industriales. Dentro de los termoplásticos, uno que destaca es el polipropileno. Esto se debe a sus buenas propiedades mecánicas (resistente a la fatiga, por ello se utiliza para bisagras), su bajo costo y facilidad de procesamiento, su gran facilidad para ser manipulado (extrusión, inyección, etc.) y su resistencia ante ataques químicos (tanto por solventes como por ácidos o álcalis) u oxidación (a diferencia del polietileno, que es más fácilmente oxidado).

2.1.1.1 Polipropileno

El polipropileno (PP) es un polímero termoplástico semicristalino perteneciente a la familia de las poliolefinas (cadenas de alquenos enlazados). Dicho polímero se obtiene por la polimerización en cadena o “de adición” del propileno (propeno).

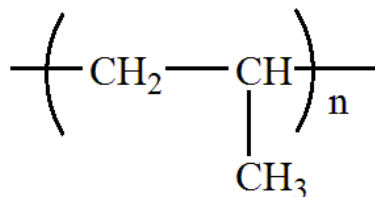


Figura 2.1: estructura de la macromolécula de Polipropileno.

Resulta fundamental para este trabajo la diferenciación y cuantificación de los rangos de temperaturas de transición vítrea (T_g), de fusión (T_f) y de degradación (T_d) del PP, ya que de éstas dependerán las temperaturas en el conformado vía moldeo por inyección. Estos parámetros se encuentran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: rangos de temperatura para Polipropileno homopolímero y copolímero [5].

Temperaturas	PP homopolímero	PP copolímero
T_g	-10°C	-20°C
T_f	$160-170^{\circ}\text{C}$	$130-138^{\circ}\text{C}$
T_d	287°C	287°C

2.1.1.2 Homopolímero y copolímero aleatorio de Polipropileno

Hay dos formas de sintetizar PP. La primera de ellas es mediante la polimerización de polipropileno puro, obteniéndose así PP homopolímero (estos luego se clasifican por tacticidad: isotáctico, atáctico y sindiotáctico). [5, 6] La otra, es la adición de un bajo porcentaje de etileno en la polimerización, lo cual mejora la resistencia al impacto del PP; estos polipropilenos se conocen como copolímeros. Dentro de los copolímeros, se encuentran los copolímeros en bloque y los aleatorios, en los cuales se centrará este trabajo. Estos poseen entre un 2 y un 5% de monómeros de etileno en su composición.

Las rutas de procesamiento industrial para formar PP copolímero aleatorio son dos: en masa y en fase gaseosa.

- En masa: los monómeros de etileno y propileno son introducidos simultáneamente en un reactor, lo cual resulta en cadenas de PP con ambos monómeros distribuidos de manera aleatoria.
- Fase gaseosa: el propileno se encuentra en fase gaseosa dentro de un reactor, se le adiciona H_2 (catalizador) y etileno gaseoso. El resultado es polvo de PP, el cual pasa luego a un post-procesamiento obteniéndose así el PP en pellets.

La característica principal de los polímeros aleatorios es su translucidez, algo que es muy buscado en la industria del plástico actual.

2.1.2 Proceso de moldeo por inyección

El moldeo por inyección de termoplásticos constituye una de las tecnologías más importantes en la producción industrial de productos de alta calidad con gran valor agregado. Este método de conformado se utiliza tanto para piezas simples de producción masiva como para piezas con geometrías de elevada complejidad. El proceso consiste

básicamente en calentar material granulado (triturado pequeño o pelletizado), hasta obtener un fundido homogéneo y luego forzarlo rápidamente a fluir dentro de un molde cerrado. [6]

2.1.2.1 Máquina inyectora

En la figura 2.2 puede verse un esquema simplificado de una inyectora de plásticos con sus partes principales.

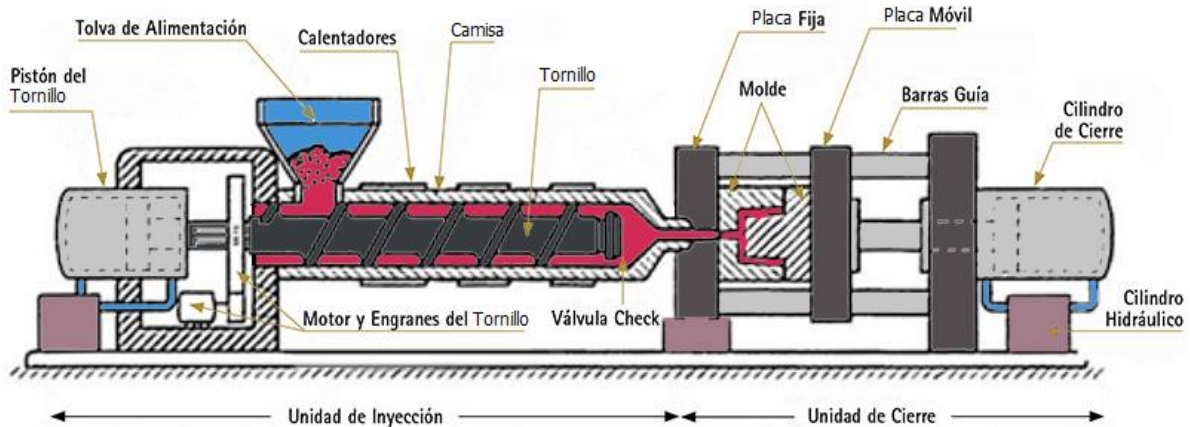


Figura 2.2: Esquema genérico de una inyectora de polímeros

Una inyectora puede dividirse en tres unidades principales, estas son: una unidad de inyección, una de cierre y una de control.

- Unidad de inyección: transporte, fusión y homogeneización del polímero.
 - Tolva de alimentación: dosifica el polímero en forma de pellets o material triturado.
 - Camisa del tornillo y calentadores: se encargan de dar y mantener la temperatura para que, en conjunto con la energía aportada por cizalla, el polímero funda.
 - Tornillo: homogeneiza y traslada el material fundido.
 - Engranajes, pistón y motor del tornillo.
- Unidad de cierre: debe ser capaz de mantener el molde cerrado en las etapas de llenado y compactación (elevadas presiones).
 - Molde.
 - Cilindros hidráulicos, barras guía, placa fija y placa móvil.
- Unidad de control: mantiene constantes las variables de procesamiento en cada etapa del ciclo de inyección y coordina todo el ciclo de inyección; las variables más relevantes son: velocidades de movimiento y rotación del tornillo, posición del tornillo y molde, fuerza de cierre, apertura y cierre del molde.

2.1.2.2 Molde

El molde es un elemento complejo y costoso que se encuentra acoplado a la unidad de cierre mediante un conjunto de placas metálicas. Las funciones principales que posee son tres: contención del polímero fundido mientras solidifica con su geometría final, transferencia de calor con el polímero fundido durante el enfriamiento y expulsión de las piezas terminadas. Las partes del mismo son: el canal de entrada de polímero fundido (también conocido como “bebedero”), los canales de alimentación, las cavidades donde se encontrarán las piezas a obtener, el sistema de refrigeración que ayudará a la correcta transferencia de calor entre el polímero fundido y las paredes del molde, el molde mismo y, por último, el sistema de eyectores que se encarga de la remoción de las piezas finales.

2.1.2.3 Etapas del ciclo en el moldeo por inyección

El material es alimentado por la tolva y, al cerrarse el molde, comienza el ciclo de inyección. La unidad de inyección, que hasta este momento se encuentra separada del molde, avanza hasta que la boquilla se posa sobre el punto de entrada del molde (en algunas inyectoras, la mitad fija del molde se encuentra pegada a la unidad de inyección y posee un switch que permite la entrada de material y luego cierra, cortando el runner e impidiendo la entrada de material al molde). El tornillo actúa como pistón y avanza realizando la inyección de material y el molde se llena por completo con el polímero fundido. Esta parte del proceso es conocida como llenado o *filling*. El molde permanece cerrado y el polímero comienza a enfriarse dentro, al suceder esto, contrae. Por ello, se continúa aplicando una presión menor a la de inyección (conocida como presión de mantenimiento, en inglés *packing* o *holding*), la cual permite introducir más material dentro de la cavidad de moldeo para compensar la contracción. Una vez finalizado el *packing*, comienza la etapa de enfriamiento. Cuando la entrada al molde solidifica, la unidad de inyección retrocede y comienza el movimiento rotatorio del tornillo para plastificar el material del próximo ciclo de inyección. El molde abre y se extraen las piezas. Las inyectoras poseen un sistema de eyectores, los cuales simplemente empujan las piezas inyectadas y permiten su recolección, sin necesidad de contacto con el molde. [7]

2.1.2.4 Variables operacionales

Las principales variables en el proceso de inyección son la temperatura, la presión y el tiempo. Analizando la temperatura, se pueden identificar dos principales:

- Temperatura de inyección: debe ser lo suficientemente elevada para permitir que el material fluya correctamente, pero no debe ser cercana a la temperatura de degradación del polímero.

- Temperatura del molde: debe ser suficientemente baja para enfriar el material fundido y conseguir que el mismo solidifique. La velocidad a la que se enfría el plástico es un factor importante, ya que va a condicionar la morfología del material y, por lo tanto, sus propiedades físicas, mecánicas y ópticas, entre otras.

En cuanto a la presión, como ya se mencionó en el ciclo de inyección, las dos que influyen son la de llenado y la de compactación:

- Presión de inyección: también conocida como presión de llenado o *filling*, debiendo ser la misma lo más elevada posible, de modo que el llenado se produzca de la forma más rápida.
- Presión de mantenimiento: de compactación, *holding* o *packing*, obliga a que el molde se acabe de llenar y se obtenga una pieza con densidad uniforme.

Respecto al tiempo, el mismo debe ser tenido en cuenta en diversas etapas del proceso:

- Tiempo de inyección: es el necesario para que el tornillo realice el recorrido hacia adelante, obligando al material a introducirse dentro del molde. No suele ser superior a 2 segundos.
- Tiempo de mantenimiento: luego de realizar la inyección inicial, es el tiempo en el que el tornillo permanece en posición avanzada para mantener la presión del material dentro del molde. Este tiempo se prolonga hasta que la entrada a la cavidad de moldeo quede aislada del resto del sistema mientras continúa enfriándose.
- Tiempo de enfriamiento: es el tiempo que la pieza requiere para enfriarse hasta que ha solidificado y, además, ha adquirido la rigidez suficiente para poder ser extraída del molde sin deformarse. Las partes más externas se enfrían a mayor velocidad que las internas. Mientras mayor sea el espesor de la pieza que se inyectó, mayor será también el tiempo de enfriamiento necesario.

En cuanto a la combinación de temperatura y presión de inyección, se forma la llamada “ventana de proceso” (figura 2.3). Dicha ventana tiene las combinaciones adecuadas de presión y temperatura para inyectar el polímero; por fuera de ella se encuentran los problemas asociados a condiciones indebidas de inyección. Asociadas a la temperatura se encuentran la degradación térmica y los infundidos; a la presión, el llenado incompleto y rebabas (ambos explicados en la sección de defectos de inyección).

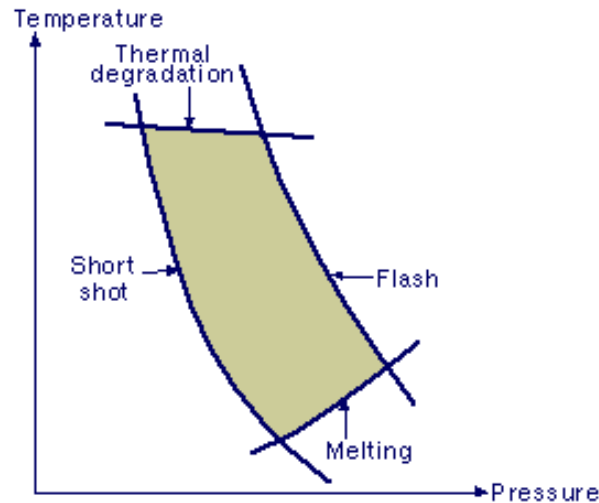


Figura 2.3: ventana de proceso en moldeo por inyección.

2.1.2.5 Defectos en el moldeo por inyección

Los defectos que comúnmente se encuentran en piezas inyectadas son: rebabas, llenado incompleto, líneas de soldadura, rechupes y tensiones residuales.

- **Rebabas:** Las rebabas se forman generalmente cuando el fluido posee baja viscosidad (por lo tanto, mayor temperatura de fundido y mayor *Melt Flow Index*, en siglas, MFI) y el molde se encuentra con mayor temperatura de pared. El fundido logra colarse entre las paredes del molde, quedando películas de material delgadas en los bordes de las piezas finales. En inglés, se denomina a este fenómeno “*flashing*”.

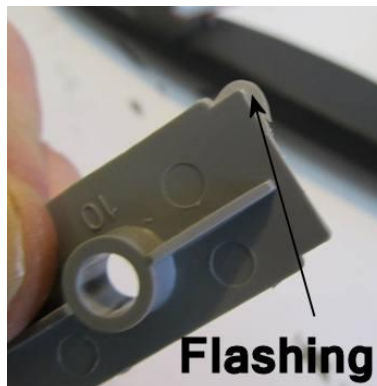


Figura 2.4: Caso de rebabas en piezas inyectadas.

- **Llenado incompleto:** éste se atribuye a los casos en que la presión establecida no es suficiente para lograr un completo avance del fundido dentro de la cavidad de moldeo, dando piezas “incompletas”. Para evitar este tipo de defecto, se realizan estudios de llenado incompleto, que consisten en el aumento

progresivo de presiones de inyección y *packing*, comenzando en valores mínimos, hasta lograr la condición de llenado completo del molde.

- Líneas de soldadura: este defecto es de los más problemáticos ya que no siempre se reconoce a simple vista y generalmente resulta en la falla mecánica de la pieza inyectada. Las líneas de soldadura se dan por el choque de dos o más frentes de flujo de material fundido. [8]

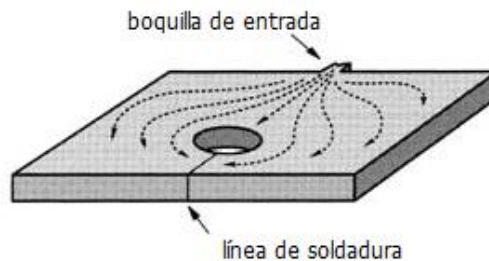


Figura 2.5: esquema de avance de los frentes de flujo y formación de la línea de soldadura.

- Rechupes: la causa principal de los rechupes es el cambio de densidad que se produce cuando se solidifica el polímero. La contracción volumétrica es superior en polímeros semicristalinos (entre un 1 y 4%) y menor en los polímeros amorfos (contracciones entre 0,3 y 0,7%); en este último caso, ésta está asociada a la reducción del volumen libre entre cadenas. Por otra parte, el volumen ocupado por una determinada masa depende de la temperatura y presión; ambas están relacionadas directamente al coeficiente de expansión térmica del material y generan mayor compresibilidad en estado fundido.

2.2 Principio de fotoelasticidad y estimación de tensiones residuales

La fotoelasticidad, experimentalmente, se utiliza para el análisis de esfuerzos y deformaciones. Esta técnica se basa en los fenómenos que experimentan las ondas electromagnéticas al pasar por materiales transparentes, sobre todo, la polarización de la luz que ocurre por la presencia de tensiones residuales en cuerpos que se someten a esfuerzos. [9] La utilidad de este método es que permite, por simple observación, la determinación de regiones de concentración de tensiones. Para un análisis de precisión absoluta se deben utilizar técnicas más complejas.

2.2.1 Luz polarizada

Los átomos de una fuente de luz emiten pulsos de ondas monocromáticos. Cuando hay un elevado número de átomos emitiendo luz, las oscilaciones de las ondas que cada átomo emite están distribuidas de forma aleatoria y las propiedades del haz de luz

resultante son las mismas en todas las direcciones: a esto se lo conoce como luz no polarizada. Si el plano de oscilación de las ondas se unifica y el haz de luz se forma con rayos que poseen campos eléctricos restringidos en un solo plano, se dice que el haz de luz es polarizador plano o lineal.

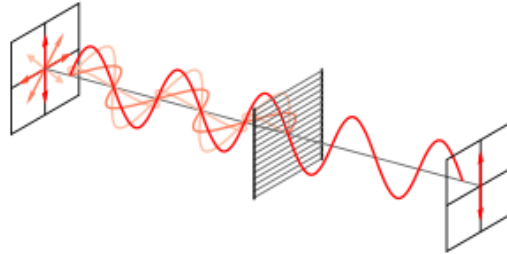


Figura 2.6: polarización de la luz.

La luz del polarizador lineal puede descomponerse en dos componentes en un eje ortogonal arbitrario. Las dos componentes vectoriales transversales varían su amplitud con el tiempo, y la suma de ambas va trazando una figura geométrica. Si dicha figura es una recta, la polarización se denomina lineal; si es un círculo, se denomina circular y si es una elipse, elíptica. Si la onda electromagnética es una onda armónica simple como en el caso de una luz monocromática (en que la amplitud del vector de campo eléctrico varía de manera sinusoidal), los dos componentes tienen exactamente la misma frecuencia. Sin embargo, estos componentes tienen otras dos características que pueden ser diferentes. Primero, los dos componentes pueden no tener la misma amplitud; segundo, los dos componentes pueden no tener la misma fase, es decir, pueden no alcanzar sus máximos y mínimos al mismo tiempo. [10] La luz polarizada puede ser producida de forma natural por fuentes como reflexión, dispersión, a través de la doble refracción o mediante el uso de hojas polaroid.

2.2.2 Características de la luz

Para estudiar la fotoelasticidad, las características principales de la luz resultan la intensidad y el color, y se encuentran en función de la amplitud y la longitud de onda. La luz que cuenta con una sola longitud de onda es llamada luz monocromática. La unidad de medición para la longitud de onda es el nanómetro (nm).

2.2.3 Retardo de ondas

La propagación de la luz en el vacío tiene una velocidad “c” (aproximadamente 3×10^8 m/s). La relación de la velocidad de la luz en el espacio con la velocidad de propagación en el medio, se denomina índice de refracción (“n”). Luego, teniendo en cuenta la variación de la velocidad de la luz entre el vacío y los demás medios, se

introduce el concepto de retardo (δ). El retardo es una variación lineal en la trayectoria óptica y está dado por:

$$\delta = h \cdot (n-1) \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Donde “h” es el espesor del material a lo largo de la trayectoria de propagación de la luz.

2.2.4 Birrefringencia

La birrefringencia (también conocida como doble refracción), es la propiedad óptica de ciertos cuerpos que consiste en “desdoblar” un rayo de luz incidente en dos rayos linealmente polarizados, perpendiculares entre sí, como si el material tuviera dos índices de refracción diferentes. Esto se relaciona directamente con los polímeros semicristalinos, en cuyo caso la luz interactúa de manera diferente dependiendo de la orientación de la red cristalina con respecto al haz de luz incidente. La birrefringencia de un polímero semicristalino está formada por las contribuciones de las regiones amorfas y cristalinas, y un factor que resulta de las formas de los cristales o de la presencia de huecos. [11]

2.2.5 Polariscopio

El polariscopio es un instrumento óptico que utiliza las propiedades de la luz polarizada. El polariscopio lineal permite observar y medir el estado de polarización de objetos transparentes. Una forma de construir estos instrumentos es tomar una caja oscura con la cara superior abierta, recubrir el interior con papel aluminio, colocar dos placas polaroid tapando el extremo abierto y una fuente de luz blanca (suelen usarse placas de leds) en la cara inferior.

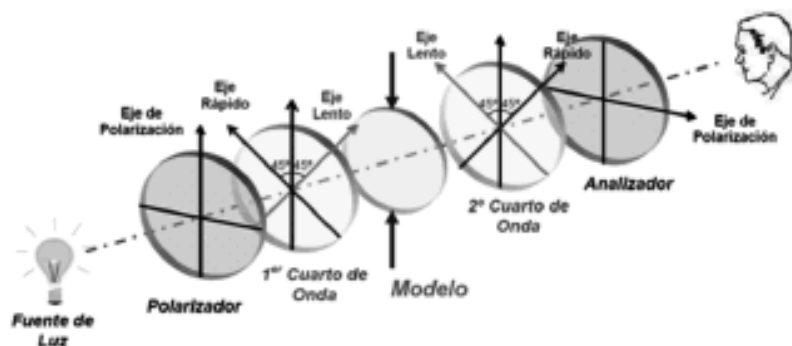


Figura 2.7: esquema de un polariscopio genérico de geometría circular.

2.2.6 Cálculo de tensiones residuales

Existe evidencia experimental de que en un objeto polimérico que se somete a esfuerzos mecánicos, la birrefringencia observada es proporcional a la tensión aplicada. [12] La ley de Brewster establece que el cambio relativo en el índice de refracción es proporcional a la diferencia de tensiones principales. Esto introduce una constante K, llamada coeficiente de actividad óptica o de Brewster, la cual es una propiedad física del material que se determina por calibración.

$$\Delta n = K \cdot \Delta \sigma \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Respecto a los parámetros fotoelásticos, la relación de tensiones en un objeto de geometría simple (lámina plana de espesor “e” con sus caras paralelas) está dada por:

$$\sigma = \frac{\delta}{K \cdot e} \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

El valor de K para el PP es de 900 Brewsters ($900 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$). [13]

Se utilizó el programa ColorMania 6.3, para identificar los colores de cada franja observada en las placas vistas bajo el polariscopio. El mismo no sólo permite visualizar los colores en un punto, sino también hacer zoom en regiones para una mejor identificación, y devuelve los valores RGB (del inglés, rojo-verde-azul) del color.

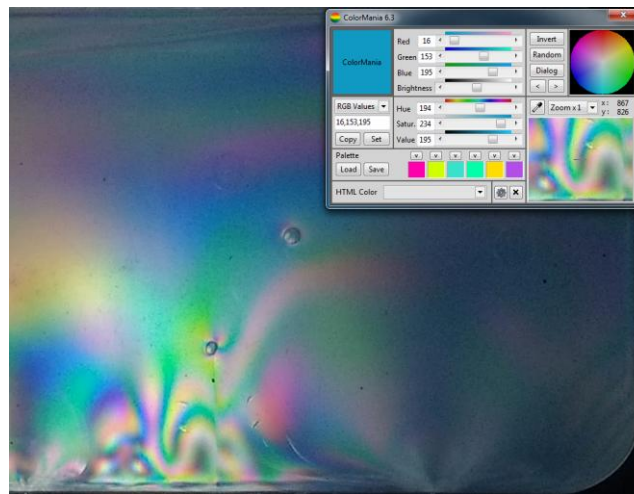


Figura 2.8: interfaz del ColorMania 6.3.

2.3 Simulación del proceso de moldeo por inyección: Moldex3D

El Moldex3D es un programa de diseño y simulación de procesos de inyección de plásticos. Es una herramienta CAD/CAE (siglas en inglés que significan diseño e ingeniería asistidos por computadora) que posee dos módulos principales: designer y moldex3D. El

mismo se basa en modelos de cálculo mediante elementos finitos (MEF; o FEM en inglés), el cual es un método numérico para resolver por aproximación ecuaciones diferenciales parciales complejas. El MEF está pensado para aplicarse a problemas físicos en geometrías complejas, mediante el uso de computadoras. [14]

Volviendo a los módulos principales del Moldex3D:

- Moldex3D Designer: utilizado para la creación y optimización del mallado de la cavidad del molde.
- Moldex3D: brinda la interfaz para el mallado, permite definir propiedades del material, parámetros del proceso de inyección, etc.

2.3.1 Mallas

Hay tres opciones de mallado dentro de la interfaz del programa:

- 2,5D Shell model solver: las simulaciones en el modo 2,5D se utilizan generalmente para “cáscaras”, es decir, para superficies de sólidos. Posee dificultades para reconocer restricciones de área, contenidos de fibra en los materiales y cambios de secciones.
- 3D Solid model solver (BLM: boundary layer mesh): ofrece mejor aproximación que el análisis 2.5D en aspectos de esquinas y alabes inducidos por fibras, entre otros. Utiliza modelos tridimensionales de elementos tetraédricos, hexaédricos, piramidales y prismáticos.
- 3D Solid model solver (eDesign): este tipo de mallado importa una malla del módulo eDesign para luego realizar un análisis 3D (elementos cúbicos); en algunas piezas de geometría compleja resulta inadecuado.

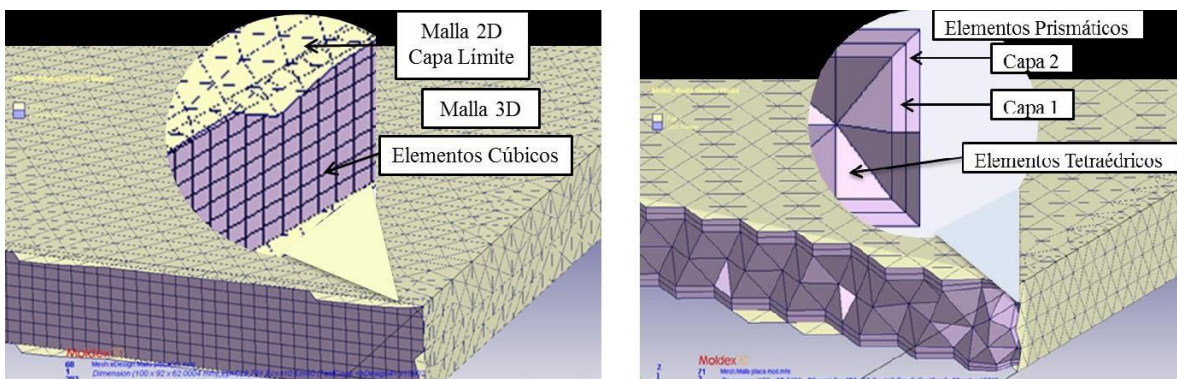


Figura 2.9: Malla eDesign (izquierda) y malla BLM (derecha).

Para piezas con geometrías simples, utilizar mallados eDesign provee dos ventajas: ahorro de tiempo y de recursos computacionales.

2.4 Referencias

- [1] QUINTANA, M. C. “Análisis de la distribución de la orientación de fibras discontinuas en piezas de matriz termoplástica fabricadas mediante moldeo por inyección: evaluación experimental y simulación 3D”. Universidad Nacional de Mar del Plata, 2018.
- [2] JANSEN, K.M.B. “Residual stresses in injection molded products”. Delft University of Technology, 2015.
- [3] KENNEDY, P.K. “Practical and Scientific Aspects of Injection Molding Simulation”. Technische Universiteit Eindhoven, 2008.
- [4] AUSTIN, C. “Filling of mold cavities”. In E.C. Bernhardt, editor, Computer Aided Engineering for Injection Molding. Hanser, New York, 1983.
- [5] NICHOLSON, J.W. “The Chemistry of Polymers”. 3rd ed. RSC Paperbacks, 2006.
- [6] ROSATO, D. “Rosato’s Plastics Encyclopedia and Dictionary”, Editorial Hanser Publications, Dublin, 1993.
- [7] TADMOR, Z; GOGOS, C. “Principles of Polymer Processing”, Wiley Interscience, Nueva Jersey, 2006.
- [8] SANTA CLARA UNIVERSITY. “Weld line and meld lines”, Engineering Design Center, 2016.
- [9] TSAI, S; MIRAVETE, A. “Diseño y análisis de materiales compuestos”. 1^{ra} ed., Ed. Reverte, 1988.
- [10] FROCHT, M. “Photoelasticity”. 5^a ed., Ed. Wiley, 1998.
- [11] AMORES, R.R.; OSORIO, B.R. “Análisis fotomecánico por transmisión de luz mediante técnica de procesamiento digital de imágenes en MATLAB”. Escuela politécnica nacional de Quito; 2010.
- [12] HERMIDA, E.B. “Estudio de tensiones residuales en policarbonato sometido a tracción mediante fotoelasticidad”, 2003.
- [13] CLOIZEAUX, J.D. “Polymers: Their modeling and structure”, Ed. Oxford University Press. 2010.
- [14] Core Tech Systems. “Moldex3D User’s Manual Release 14.0”, 2016.

CAPÍTULO 3: INYECCIÓN

3.1 Material utilizado

Para este trabajo se utilizó Polipropileno copolímero aleatorios CUYOLEN 3240SC. La hoja técnica completa que brinda el fabricante se encuentra en el Anexo I.

Tabla 3.1: propiedades principales del Polipropileno Cuyolen 3240SC.

Propiedad	Método	Unidad	Valor
Índice de fluidez	ISO 1133	g/10 min	26
Módulo de elasticidad en flexión	ISO 178	MPa	1100
Esfuerzo de tracción en la fluencia	ISO 527-2	MPa	29
Elongación en la fluencia	ISO 527-2	%	11

El Moldex3D utiliza modelos reológicos de los materiales para realizar sus predicciones, acompañados por un modelo que caracteriza la compresibilidad del material en las etapas del ciclo de inyección (PVT: presión-volumen-temperatura). Mientras mejor sea la aproximación a la reología del material, mejor será el resultado de la simulación del proceso. El PP Cuyolen no se encuentra en la base de datos de Moldex3D, lo cual llevó a la necesidad de obtener sus parámetros reológicos, para luego poder elegir el material que más se asemeje de dicha base de datos. La caracterización se realizó utilizando un reómetro dinámico y se obtuvieron los parámetros según el modelo Cross-WLF, que es el utilizado por el Moldex3D. Dicho modelo es función de la velocidad de deformación y la temperatura. El modelo Cross-WLF puede verse en la ecuación 3.1 y los parámetros obtenidos en la tabla 3.2.

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Donde:

η es la viscosidad del fundido, en Pa.s,

$\dot{\gamma}$ es la velocidad de corte, en 1/s,

τ^* es el nivel de esfuerzo crítico, en Pa,

n es el parámetro de la Ley de la potencia, adimensional,

y η_0 está dado por:

$$\eta_0 = D_1 \exp\left[-\frac{A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)}\right] \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

En la cual:

T^* es la temperatura de transición vítrea, en K,

A_1 , A_2 y D_1 son los parámetros de ajuste del modelo.

Tabla 3.2: parámetros del modelo Cross-WLF, Polipropileno Cuyolen 3240SC. [2]

n	τ^* (Pa)	D_1 (Pa.s)	A_1	A_2 (K)
0,24135	29082,5	$7,8396 \cdot 10^{11}$	11,022	51,6

En cuanto al comportamiento PVT, Moldex3D realiza sus predicciones con una modificación del modelo de Tait. [14] Este modelo modificado tiene en cuenta el cambio volumétrico abrupto de los polímeros semicristalinos, siendo capaz de describir la relación PVT tanto para polímeros amorfos como semicristalinos; por ello la mayoría de los procesadores CAE lo utilizan. El modelo y sus variables pueden verse a continuación en las ecuaciones 3.3 - 3.6.

Modelo de Tait modificado:
$$\hat{V} = \hat{V}_0 [1 - C \ln(1 + P/B)] + \hat{V}_t \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Volumen específico a P=0:
$$\hat{V}_0 = \begin{cases} b_{1S} + b_{2S}\bar{T}, & \text{if } T \leq T_t \\ b_{1L} + b_{2L}\bar{T}, & \text{if } T > T_t \end{cases} \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Sensibilidad del material a la presión:
$$B = \begin{cases} b_{3S} \exp(-b_{4S}\bar{T}), & \text{if } T \leq T_t \\ b_{3L} \exp(-b_{4L}\bar{T}), & \text{if } T > T_t \end{cases} \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

Cambio volumétrico en semicristalinos:
$$\hat{V}_t = \begin{cases} b_7 \exp(b_8\bar{T} - b_9P), & \text{if } T \leq T_t \\ 0, & \text{if } T > T_t \end{cases} \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

En las cuales aparecen la corrección de la temperatura dada por $\bar{T} = T - b_5$; la transición de temperatura dependiente de P, dada por $T_t = b_5 + b_6P$; y constante del modelo $C = 0.0894$. A su vez, \hat{V} es el volumen específico (función de P y T) y los b_i son parámetros del modelo.

En la U.N.M.d.P. se carece de equipamiento para realizar esta caracterización, por lo tanto solo se tuvo en cuenta el comportamiento reológico para la elección del material en la base de datos del Moldex3D, lo cual puede traer aparejado error en los resultados que dependen de estos parámetros (etapa de compactación y rechupes/alabeos en el enfriamiento).

3.2 Máquina utilizada

La inyectora que se utilizó para este trabajo fue una Multiplas HM-10T, modificada para que posea una fuerza de cierre superior a la de fábrica (10 ton). Esta máquina (figura 3.1) posee un único tornillo, el cual actúa en las tres zonas principales de la misma: alimentación, compresión y dosaje. El volumen máximo a inyectar es de 16 cm^3 ; su fuerza máxima de cierre es de 50 ton y la máxima presión de inyección es de 120 MPa. Para poder controlar la temperatura de las paredes de la cavidad de moldeo se empleó un atemperador de moldes MTR 2E90 (figura 3.2). Este puede ser utilizado tanto con agua como con aceite; para el presente estudio, el molde fue atemperado con agua. Su potencia de calefacción es de 9 kW.

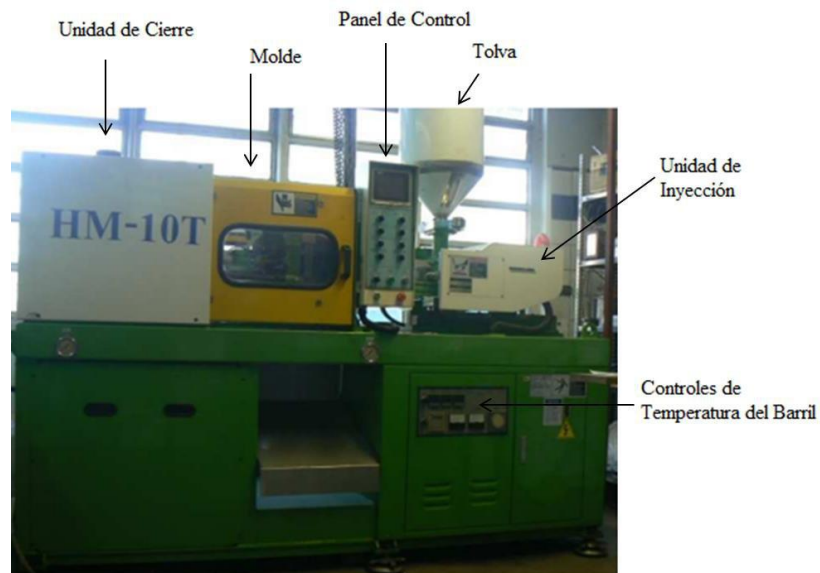


Figura 3.1: Inyectora Multiplas HM-10T del laboratorio de materiales de la U.N.M.d.P.



Figura 3.2: Atemperador MTR 2E90.

3.2.1 Instrumentación del molde

Al molde de la inyectora se le colocó un sensor combinado de temperatura y presión de la marca Kistler, tipo 6190CA (figura 3.3). Dicho sensor se implementó para poder obtener las curvas de presión y temperatura respectivas en cada ciclo de inyección. El molde puede verse en el anexo III, junto con la geometría de las placas inyectadas. La localización del sensor fue decidida en función de la ubicación de la línea de soldadura en las placas a inyectar. Es decir, en donde se da la unión de los frentes de flujo formando uno solo. Por el hecho de tener los canales de refrigeración del molde, debió optarse por un ligero corrimiento del sensor del punto previamente explicado.

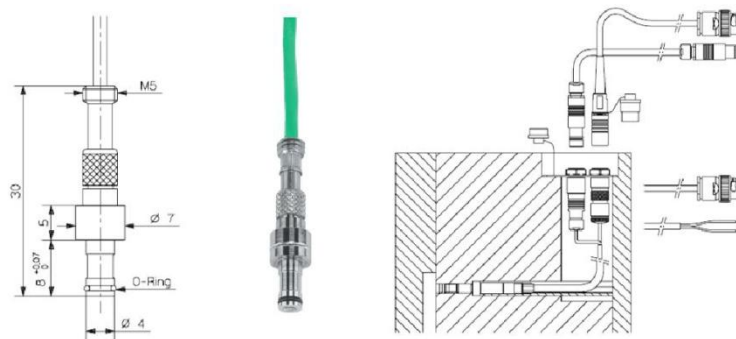


Figura 3.3: sensor combinado de temperatura y presión Kistler 6190CA. Izquierda: detalle del sensor y dimensiones. Derecha: ubicación en el molde.

La ventaja del empleo de este sensor combinado fue fundamentalmente la posibilidad de medir las curvas de temperatura y presión dependientes del tiempo, para la comparación posterior con las predicciones del software de simulación de moldeo.

3.3 Puesta a punto de la inyectora

La puesta a punto de un sistema de inyección es simple y se encuentra prácticamente estandarizada. Los puntos principales a tener en cuenta son la homogeneidad en la temperatura y la presión en la cavidad de moldeo. Inicialmente, se define una rampa de temperaturas en la inyectora y una temperatura de pared de molde (se precalentó a 50°C en todos los casos). Una vez alcanzadas dichas temperaturas, se espera a que se mantengan estables en el valor definido. En este punto, se quiere monitorear la inyectora; por ello, se coloca en modo manual o semi-automático. Se comienza a inyectar y, para cerciorarse de que las piezas sean representativas de las condiciones de inyección establecidas, se descartan las primeras cinco. Cada vez que se cambiaron las condiciones de inyección, se esperó a la estabilidad de temperaturas y se descartaron las primeras cinco piezas del nuevo régimen.

3.4 Estudio de llenado incompleto

Previo a establecer los parámetros de inyección, debe realizarse el estudio de llenado incompleto. Esto se hace para prever la ausencia de dicho defecto de inyección. El estudio de llenado incompleto consiste en hacer un barrido de presiones de inyección y mantenimiento (a temperatura constante) hasta lograr el llenado completo del molde. Las temperaturas elegidas para dicho análisis fueron 185 y 200°C.

Cabe destacar que el procedimiento de inyección para las probetas de llenado incompleto es el mismo que para cualquier otra pieza; es decir, se estabilizan las condiciones de inyección y se descartan las primeras probetas del ciclo, para garantizar la representatividad de las piezas.

3.5 Diseño de experimentos: Matriz Taguchi

El método Taguchi se basa en conjunto de matrices ortogonales, y se utiliza para el estudio de factores que afectan un dado proceso. Un ejemplo de estos diseños son los factoriales 2^k . Los diseños de Taguchi reconocen que no todos los factores que causan variabilidad pueden ser controlados. Estos factores que no se pueden controlar se denominan factores de ruido. Entonces, estos diseños intentan identificar factores controlables que minimicen el efecto de los factores de ruido. Los factores son las variables consideradas y a cada factor se le asignan niveles. Un nivel es un valor dado para cada factor.

En general, los diseños L_N están definidos mediante una matriz de diseño de N filas que permite analizar (N-1) factores.

En este trabajo fue utilizada una matriz Taguchi $L_4 (2^3)$, la cual organiza el experimento en tres condiciones, asignando dos niveles a cada una:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Las variables analizadas fueron: temperatura de inyección (T_{iny}), presión de inyección (P_{iny}) y presión de empaquetamiento (P_{mant}). En la tabla 3.3 figuran los valores para cada una de las tres variables y en la 3.4 se encuentran las 4 condiciones de inyección con sus variables y valores resultantes.

Tabla 3.3: variables analizadas con sus respectivos valores mínimos y máximos.

	Valor 1 (bajo)	Valor 2 (alto)
Variable 1: T_{iny} [°C]	200	220
Variable 2: P_{iny} [% máx.]	20	30
Variable 3: P_{mant} [% máx.]	5	15

Tabla 3.4: condiciones resultantes aplicando el método de la matriz Taguchi.

N° Condición Variable	T_{iny} [°C]	P_{iny} [% máx.]	P_{mant} [% máx.]
1	200	20	5
2	200	30	15
3	220	20	15
4	220	30	5

La ventaja de utilizar la matriz Taguchi, es la necesidad de realizar una menor cantidad experimentos a la cantidad de combinaciones posibles totales entre las variables que se analizan. En este trabajo, para el caso de un L4, deberían realizarse 8 experimentos. Mediante la aplicación de este método, sólo 4. Básicamente, Taguchi descarta las combinaciones que darían resultados similares en caso de llevarlas a cabo.

CAPITULO 4: SIMULACIÓN

4.1 Proceso de simulación

Para el proceso de simulación son utilizados el SolidWorks y los dos módulos del Moldex3D: Designer y Moldex3D.

Las piezas, canales y runners son dibujadas en SolidWorks individualmente y exportadas al módulo designer, donde se ensamblan y se les otorgan los atributos de inyección (Cavidad – *cold runner* – *hot runner*, etc. Ver figura 4.1). En este paso, además, se diseñan los canales de enfriamiento y el molde, se define el punto de inyección y los nodos sensores; y una vez que todo está definido, se procede a realizar el mallado.

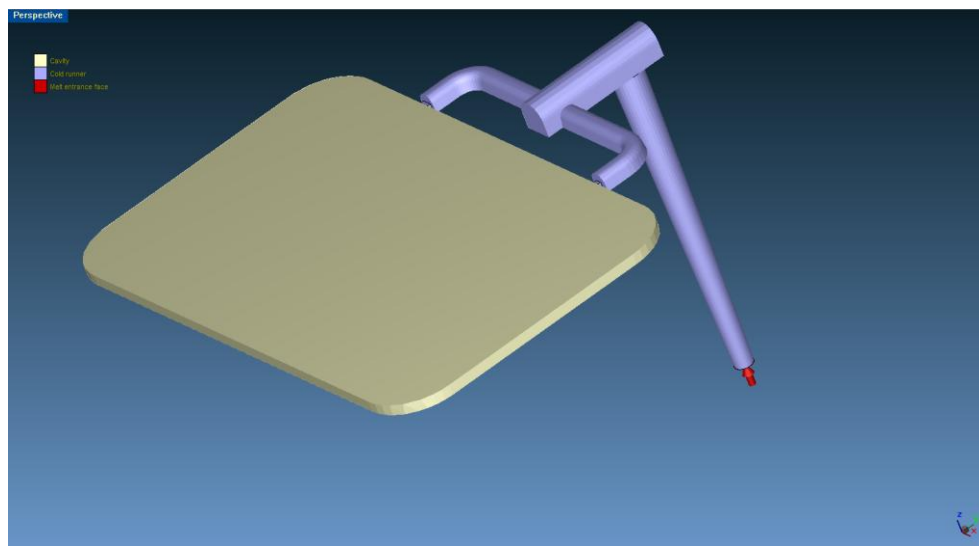


Figura 4.1: Definición de atributos y punto de inyección en el módulo Designer de Moldex3D.

Otro factor a tener en cuenta, es la contribución al llenado de los dos puntos de inyección. Se corroboró, mediante la medición de ambos, que el diámetro del punto izquierdo es 0,5mm más grande que el derecho, aportando este en mayor proporción al llenado. Esto también se plasmó a la hora de reproducir los canales en el módulo Designer del Moldex3D (figura 4.2).

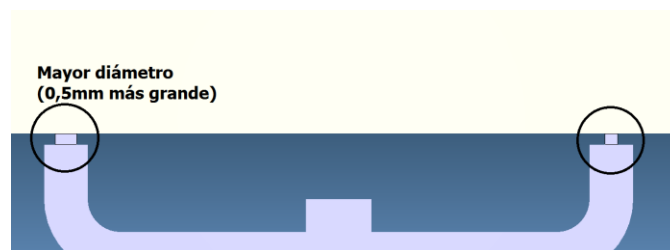


Figura 4.2: Diámetros de ambos canales de inyección en el módulo Designer, vista superior.

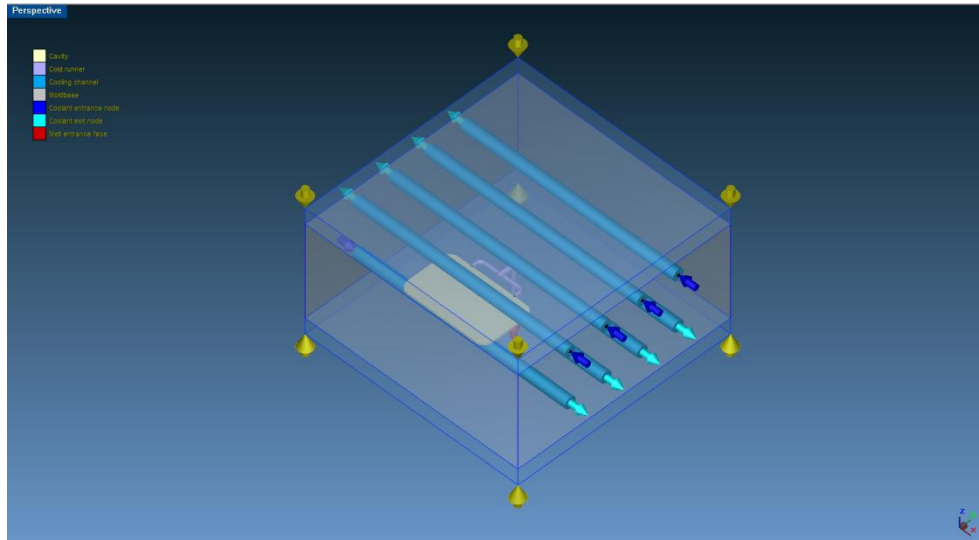


Figura 4.3: Molde y canales de refrigeración, con entradas y salidas de agua definidas en Designer.

La información del tipo de atributo es importante para el paso de mallado. Piezas más simples o de poca relevancia en los resultados de la simulación terminan siendo malladas con elementos más sencillos, por ejemplo, cubos. En la figura 4.4 puede apreciarse la diferencia de elementos de mallado entre el *runner* y la pieza inyectada, el primero posee elementos cúbicos.

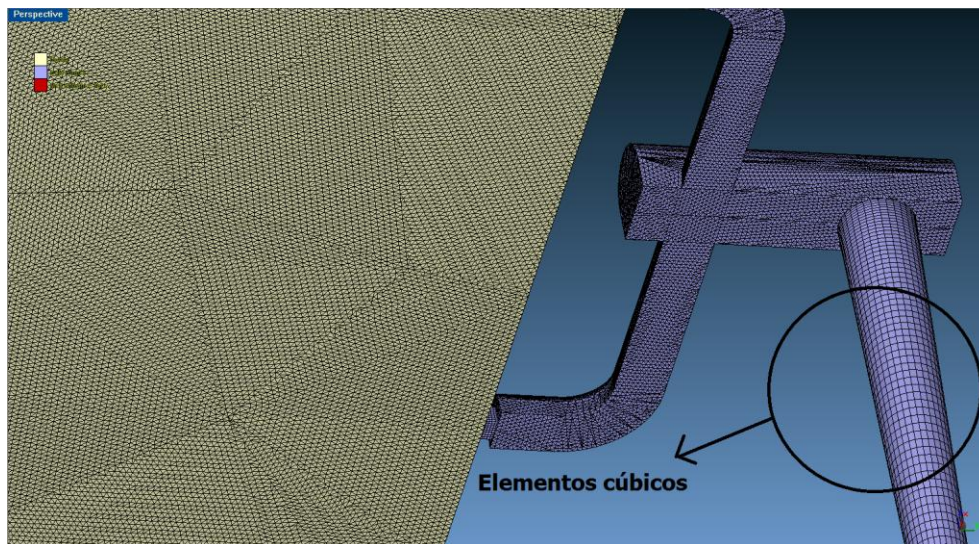


Figura 4.4: Diferencia de elementos en el mallado de la pieza y el runner.

Para poder obtener gráficos de temperatura y presión puntuales en Moldex3D, en la etapa de diseño de la malla (módulo Designer) debió definirse un nodo que actuaría como sensor. En la figura 4.5 se observa el nodo sensor en el mallado utilizado para las simulaciones.

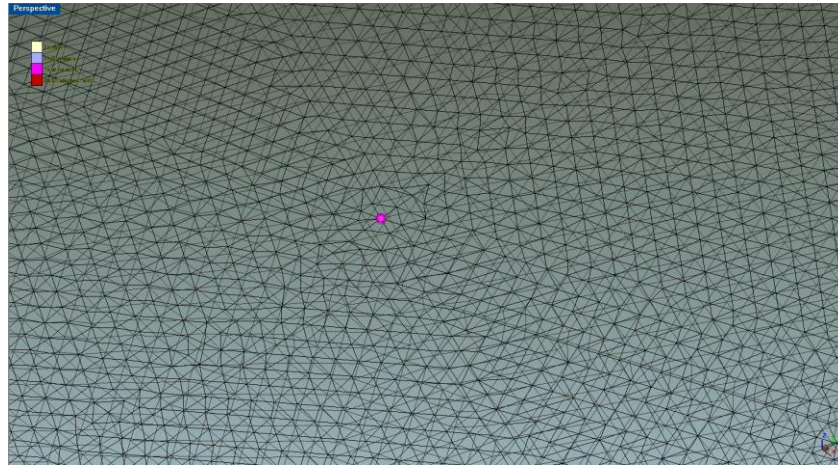


Figura 4.5: Nodo sensor y mallado en Moldex3D designer.

4.2 Material elegido para las simulaciones

Como se mencionó anteriormente, el PP Cuyolen 3240SC no se encuentra en la base de datos del Moldex3D. Por lo tanto, se escogió el PP Exxonmobil LNV 010; éste posee un MFI (Cuyolen: 26, Exxonmobil: 28) y parámetros reológicos compatibles. La comparación de parámetros del modelo Cross-WLF puede verse en la tabla 3.3.

La utilización de otro material para la simulación del proceso puede traer aparejada cierto error; como se nombró anteriormente, las simulaciones utilizan los parámetros reológicos del modelo Cross-WLF y el modelo de Tait modificado para el comportamiento PVT, caracterización que se carece para el PP Cuyolén. En la figura 4.6 se observa el comportamiento PVT del PP Exxonmobil (extraído del banco de materiales de Moldex3D); la hoja técnica del mismo se encuentra en el Anexo II.

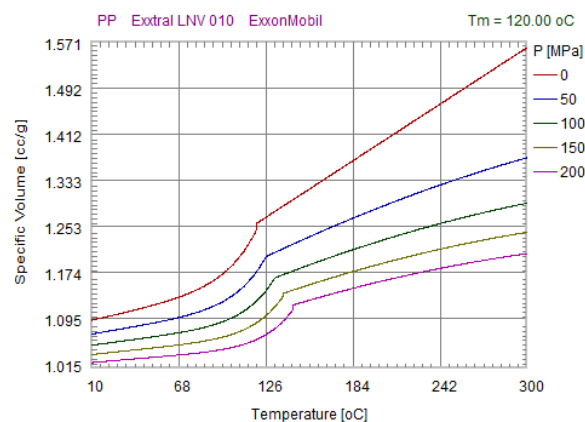


Figura 4.6: Volumen específico vs. Temperatura a diferentes presiones (diagrama PVT), PP Exxonmobil.

Tabla 4.1: Comparación de parámetros Cross-WLF, Polipropileno Cuyolen y Polipropileno Exxonmobil.

Material	n	τ^* (Pa)	D_1 (Pa.s)	A_1	A_2 (K)
Cuyolen	0,24135	29082,5	$7,8396 \cdot 10^{11}$	11,022	51,6
Exxonmobil	0,29200	36000,0	$3,4722 \cdot 10^9$	25,301	51,6

4.3. Simulación de tensiones residuales

Principalmente, estas se dan por dos fenómenos y se caracterizan como: tensiones residuales inducidas por flujo y tensiones residuales inducidas térmicamente. Moldex3D predice ambas, debiéndose definir para las inducidas térmicamente las restricciones de contracción y expansión en los tres ejes. Esto se debe a los fenómenos que se producen en el enfriamiento: contracción y alabeo.

4.3.1 Tensiones residuales inducidas por flujo

Cuando la temperatura es mayor que la de fusión, las cadenas poliméricas están libres de tensión y tienden a formar “ovillos” aleatorios, el cual es el estado de equilibrio. La orientación de las cadenas durante el procesamiento sigue la dirección del flujo. Cuando se solidifica, la orientación molecular queda bloqueada; y, si las partes moldeadas no llegaron a alcanzar la relajación total en su estado de equilibrio, el resultado son tensiones “congeladas”; éstas mismas son las llamadas tensiones residuales inducidas por flujo. En la figura 4.7 se encuentra esquematizado el fenómeno.

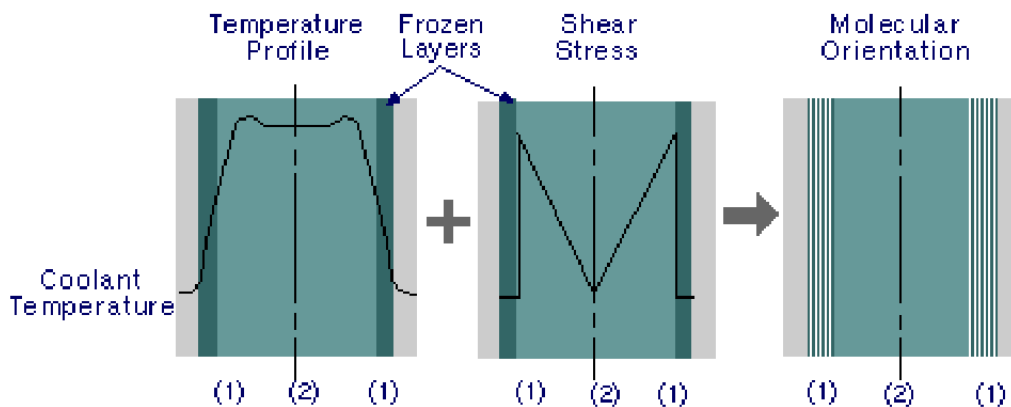


Figura 4.7: Desarrollo de las tensiones residuales inducidas por flujo. Las partes más oscuras representan la capa solidificada. Zona (1): enfriamiento, corte y orientación elevados. Zona (2): enfriamiento, corte y orientación bajos.

4.3.2 Tensiones residuales inducidas térmicamente

Estas ocurren por varios motivos, uno de ellos es la contracción desigual durante el proceso de inyección. Cuando comienza la etapa de enfriamiento, las capas externas se enfrían y comienzan a contraer, mientras que el núcleo sigue fundido y libre de contracción. Sin embargo, las capas externas rígidas fuerzan a una contracción térmica cuando el núcleo se enfría. Esto resulta en las llamadas tensiones residuales inducidas térmicamente. En la figura 4.8 se encuentra esquematizada la distribución de dichas tensiones, donde se observan tensiones expansivas en el núcleo y compresivas en las capas externas, estos dos tipos se balancean entre sí. Otro motivo para la aparición de este tipo de tensiones, es el enfriamiento desigual. Si el enfriamiento de ambas capas es desigual, aparecen tensiones residuales asimétricas. El patrón tensión-compresión que se obtiene puede verse esquematizado en la figura 4.9. Esto lleva a los denominados “alabeos” (en inglés, *warpage*).

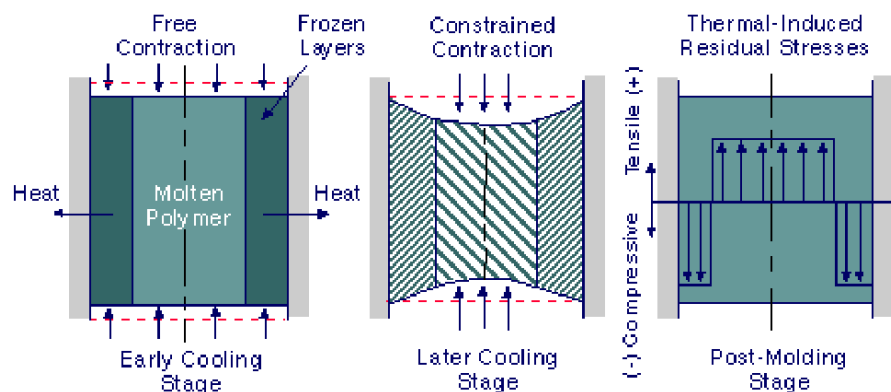


Figura 4.8: Distribución de tensiones residuales en la contracción desigual.

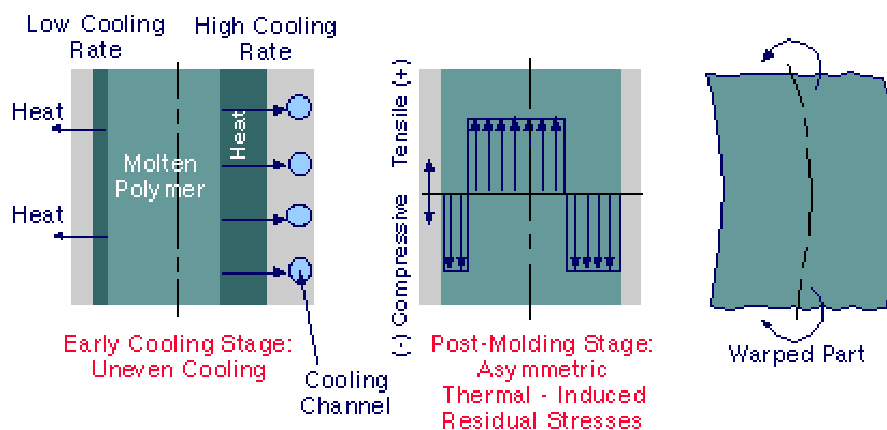


Figura 4.89: Distribución asimétrica de tensiones residuales y orientación del alabeo en el enfriamiento desigual.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Análisis del llenado incompleto

El llenado incompleto (del inglés: *short shot*), puede corregirse aumentando la temperatura o la presión, dependiendo del caso. Las causas más frecuentes del llenado de incompleto de la cavidad de inyección son las siguientes:

- Cantidad insuficiente de material en la dosificación,
- Temperatura de fusión demasiado baja,
- Presión de inyección insuficiente,
- Combinación de una temperatura de molde baja y velocidad de inyección demasiado lenta, lo cual precipita el enfriamiento del frente de flujo,
- Conducto de inyección o recorrido demasiado estrecho, lo cual dificulta el flujo del fundido y favorece el enfriamiento prematuro.

En las figuras 5.1 y 5.2 se ve la comparación entre las probetas inyectadas para el llenado incompleto y las simuladas en Moldex3D (Los porcentajes de llenado fueron obtenidos con la aplicación para análisis de imágenes: Digimizer). Del análisis de los resultados arrojados por el estudio de llenado incompleto, se establecieron las temperaturas de inyección a utilizar y las presiones de inyección y empaquetamiento. Se descartó la temperatura de 185°C debido a que se necesitan presiones de inyección elevadas para llenar el molde. Esto puede explicarse debido a que a dicha temperatura el PP no es lo suficientemente “fluido” para llenar el molde sin comenzar a solidificar. Las presiones de inyección elegidas fueron el 20 y el 30% del máximo de la inyectora.

En esta primera instancia, las diferencias porcentuales entre lo obtenido experimentalmente y lo simulado son mínimas, tanto para los 185°C como para los 200°C.

5.2 Contribución al llenado de los canales

Al haber simulado la diferencia de diámetros de los canales de inyección en el Designer, Moldex3D permite predecir la contribución porcentual de cada uno de ellos en la pieza final a inyectar. En la figura 5.3 puede verse el avance de flujo proveniente de cada uno de los canales de inyección y el porcentaje que aportan a la placa inyectada (56,6% para el de mayor diámetro, 43,4% para el de menor).

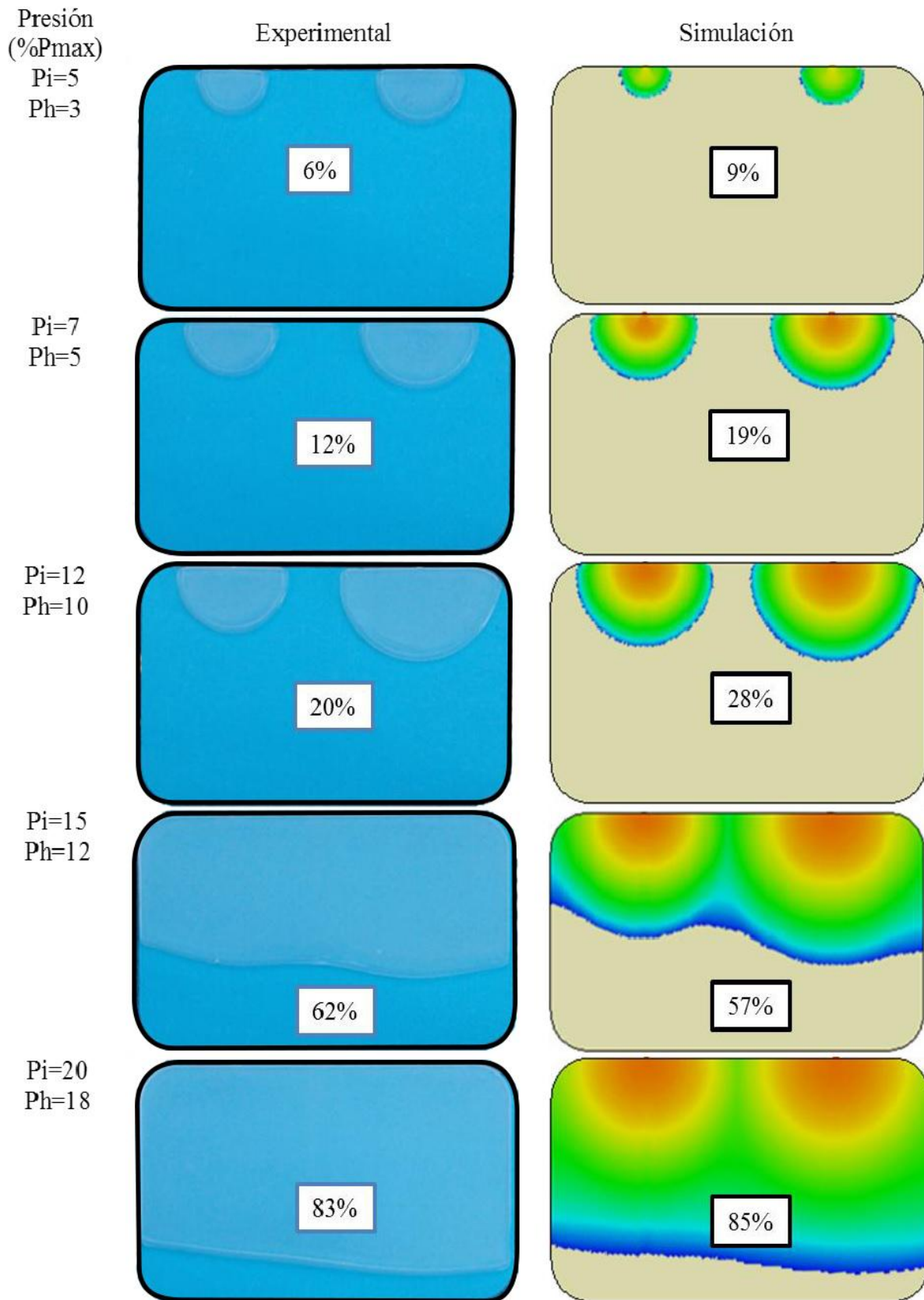


Figura 5.1: Placas inyectadas y simuladas para análisis de llenado incompleto con % de llenado asociado. Tiny=185°C.

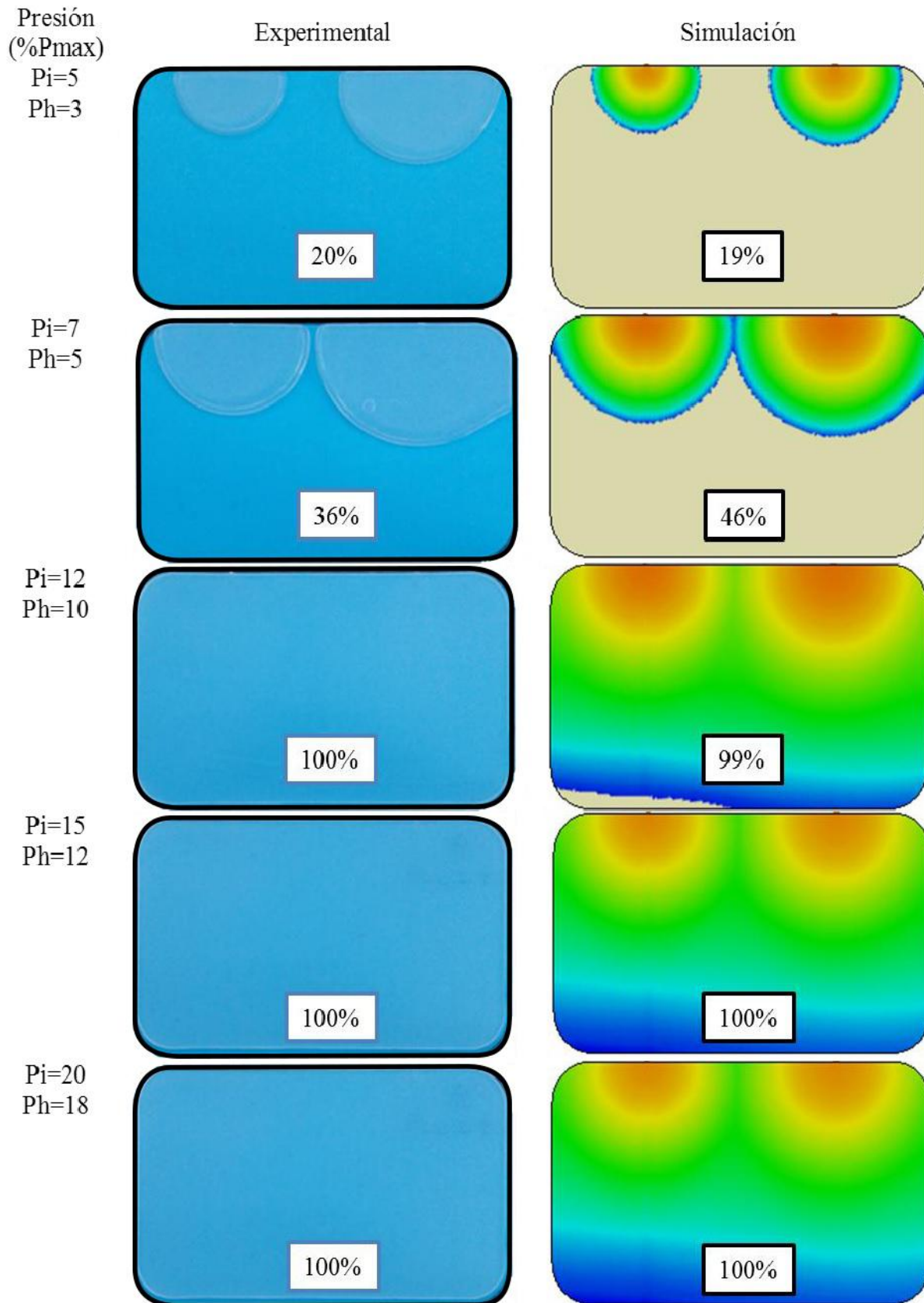


Figura 5.2: Placas inyectadas y simuladas para análisis de llenado incompleto con % de llenado asociado. Tiny=200°C.

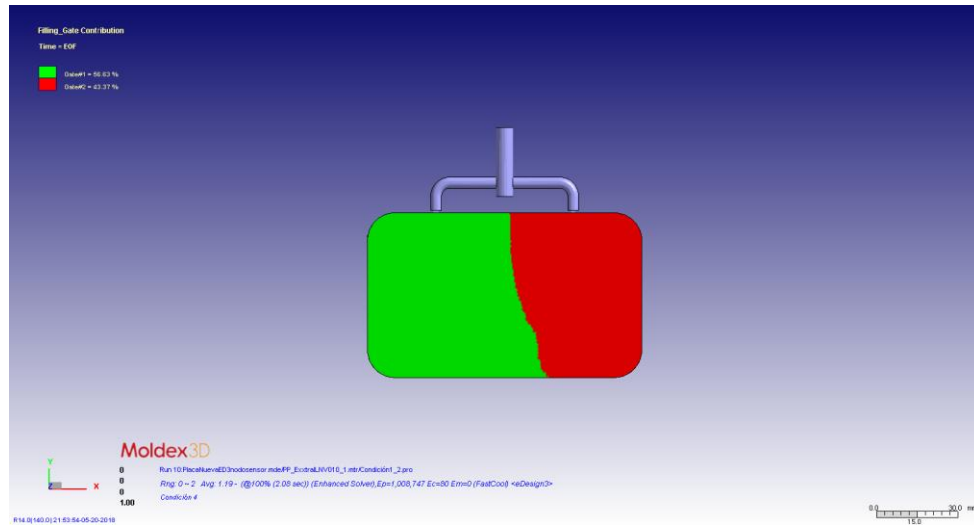


Figura 5.3: Contribución al llenado por parte de los canales de inyección, predicha por Moldex3D.

5.3 Estudios gasto computacional y convergencia

La convergencia está directamente relacionada con la cantidad de nodos que posea el mallado, esto se debe a que en cada nodo se resuelven las ecuaciones diferenciales. A mayor cantidad de elementos, más nodos habrá. Debe tenerse en cuenta que a mayor cantidad de nodos (mejor refinamiento del mallado), también se obtendrá una solución más precisa en la simulación, pero como desventaja, se tardará más en obtener los resultados.

En cuanto a los mallados, para este trabajo se optó por utilizar sólo el modelo eDesign y no BLM. La geometría a simular es una placa muy simple, con poco espesor y bordes ligeramente redondeados; esto lleva a que no sean necesarios elementos complejos en el mallado. En la tabla 5.1 se muestran los tiempos de simulación para una corrida completa en la condición de inyección 1 para cada refinamiento de mallado disponible en Moldex3D. El ciclo completo analizado consta de una fase de llenado, una de empaquetamiento, una de enfriamiento, una de estudio de alabeos y una de tensiones.

Tabla 5.1: Comparación de los tipos de malla eDesign.

Tipo de malla	Cantidad de elementos	Tiempo de simulación por corrida completa
eDesign1	298.235	126 min
eDesign2	398.635	167 min
eDesign3	588.221	522 min
eDesign4	814.047	-
eDesign5	3.743.912	-

En el caso del mallado eDesign4, debió suspenderse la simulación pasadas las 18hs. Esto fue a causa no sólo del tiempo que estaba tomando realizar la corrida, sino también por el espacio físico que ocupaba la misma en el disco (por encima de 70 GB, sin estar finalizada). De haber realizado la simulación con la malla eDesign5, se esperaba un tiempo mucho mayor, ya que ésta posee una cantidad de elementos muy superior a las demás. Otro factor que determina la velocidad de simulación es la potencia computacional del equipo con el cual se realizan las simulaciones. Para las simulaciones de este trabajo se utilizó una computadora de escritorio con un procesador Intel Core i5 de cuarta generación, disco de estado sólido y 16 GB de memoria RAM.

Para el estudio de convergencia, se compararon en las simulaciones de la condición de inyección 1 con mallados eDesign1, eDesign2 y eDesign3 los siguientes parámetros: peso final de la placa, longitud de la línea de soldadura y valor de la tensión residual máxima. Los resultados pueden observarse en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Comparación de resultados para diferentes mallados.

Mallado	eDesign1	eDesign2	eDesign3
Peso final de la placa	8,64gr	9,51gr	9,58gr
Longitud de la línea de soldadura	1,56cm	1,57cm	1,57cm
Tensión residual máxima	0,157 MPa	0,655 MPa	0,702 MPa

Las longitudes de línea de soldadura no difieren entre las simulaciones con mallado eDesign1 y eDesign3, puede considerarse independiente a la exactitud de la simulación. Pasando al peso final de la placa y a las tensiones residuales, se observa la mala aproximación al utilizar la malla eDesign1 en comparación con los valores de las otras dos simulaciones. En los parámetros que se observa sensibilidad al refinamiento del mallado, la diferencia es mínima entre eDesign2 y eDesign3, pero apreciable. En base a esto, para el trabajo se realizaron simulaciones con mallado eDesign3 para tener valores más precisos de cada parámetro. Se espera que los valores para mallados eDesign4 y eDesign5 no difieran significativamente de los valores obtenidos con la malla eDesign3, debido a la tendencia que se observó en la tabla 5.2 y las diferencias cada vez menores al refinar la malla.

5.4 Peso de las placas inyectadas

En la tabla 5.3 se presentan los pesos obtenidos en las simulaciones y los promedios de placas inyectadas para cada condición. Para el pesado de las placas se utilizó una balanza analítica Pioneer OHAUS.

Tabla 5.3: Pesos experimentales y simulados de las placas.

	Condición 1	Condición 2	Condición 3	Condición 4
Experimental	10,09 gr	9,79 gr	10,27 gr	10,18 gr
Simulada	9,58 gr	9,60 gr	9,52 gr	9,49 gr
Error porcentual*	5,32%	1,98%	7,88%	7,27%

*Definición de error porcentual en anexo IV

Los errores pueden deberse al introducido por considerar un material de la base de datos del Moldex3D, y a utilizar el método CAE para realizar las simulaciones. El mismo se basa en los parámetros de inyección con una inyectora genérica que brinda el programa. Para realizar una estimación más certera, puede usarse el método avanzado, en el cual se definen las características de la máquina que se posee. Éste último puede utilizarse si se conoce en detalle la geometría de la inyectora que se utilizó (diámetro del tornillo; distancia, ancho y ángulo de cada filete, etc.), luego Moldex ajusta los parámetros de inyección para la máquina. En el anexo IV se encuentran tabulados los pesos de cada placa inyectada.

5.5 Defectos de inyección

Además de las líneas de soldadura, otros fenómenos que se pueden tener en cuenta son las rebabas, rechupes y el aire atrapado; los dos primeros no se visualizaron en las piezas inyectadas, en cambio, sí se observaron burbujas de aire atrapado en la mayoría de ellas. Este tipo de defecto no sólo es estético, sino que puede traer aparejada la ruptura de la pieza por un agujero pasante (si se reduce mucho el espesor en la zona de presencia de la burbuja) o acumulación de tensiones por la presencia de las burbujas. Como puede verse en la figura 5.4, Moldex3D también predice la presencia de aire atrapado en las condiciones de inyección. Las causas de este defecto son la evaporación del contenido de humedad en los pellets de materia prima o, simplemente, espacios vacíos. El programa sólo tiene en cuenta estos últimos.

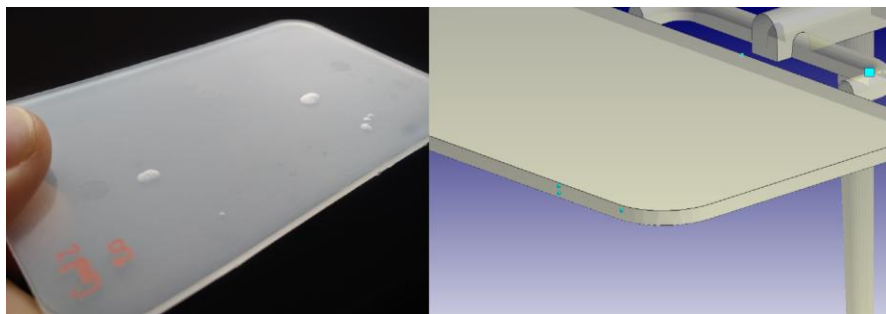


Figura 5.4: Aire atrapado en placas inyectadas (izq.) y simuladas (der.).

El hecho de que los patrones de burbujas sean diferentes entre la simulación y las piezas inyectadas, da a entender que la causa más probable de la retención de aire sea por contenido de humedad en los pellets que se ingresaron en la tolva de la inyectora.

5.5.1 Longitud de la línea de soldadura

Para medir las líneas de soldadura, nuevamente se utilizó el software de análisis de imágenes. Moldex3D arroja un único valor por condición, mientras que, experimentalmente, se obtuvieron 20 placas para cada una de las cuatro situaciones simuladas. Por esto, se analiza el valor experimental como el promedio de las 20. Dichos valores pueden verse en la tabla 5.4.

Tabla 5.4: Longitudes experimentales y simuladas de las líneas de soldadura.

	Condición 1	Condición 2	Condición 3	Condición 4
Experimental	1.88 cm	1.91 cm	1.56 cm	1.82 cm
Simulado	1.57 cm	1.62 cm	1.48 cm	1.52 cm
Error porcentual*	16,49%	17,90%	5,41%	19,74%

*Definición de error porcentual en anexo IV



Figura 5.5: Placa inyectada experimental (izq.) vs. Placa simulada en Moldex3D (der.) con sus líneas de soldadura. Condición 4.

5.6 Diseño de experimentos y condición optimizada en Moldex3D

Otra característica muy útil que posee el Moldex3D, es el DOE (diseño de experimentos, del inglés *design of experiment*). Una vez definido el Taguchi y realizadas las corridas de cada condición, puede realizarse una “simulación experta”, basada en las anteriores. Eligiendo esta opción, se ingresa el Taguchi utilizado y una o varias condiciones a optimizar, ponderándolas. Luego, Moldex3D realiza otra corrida con las condiciones ingresadas y, optimizando el parámetro deseado, devuelve la mejor condición de inyección (la cual puede no haber sido ingresada previamente). Debido a que en este trabajo se intenta estudiar las líneas de soldadura, la mejor condición a optimizar es la

uniformidad del frente de flujo. Mientras antes se produzca la misma, menor es la probabilidad de encontrar una línea de soldadura.

La condición optimizada resultante fue con una temperatura de inyección de 200°C, presión de inyección del 20% y presión de empaquetamiento del 15%. Esta misma no era parte del grupo de condiciones considerado en el Taguchi.

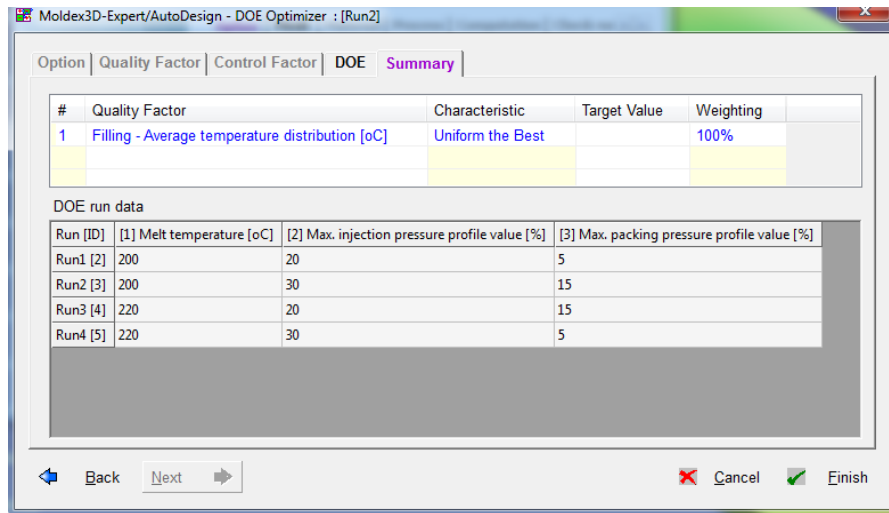


Figura 5.6: Ventana de definición de valores para los parámetros del diseño de experimentos en Moldex3D.

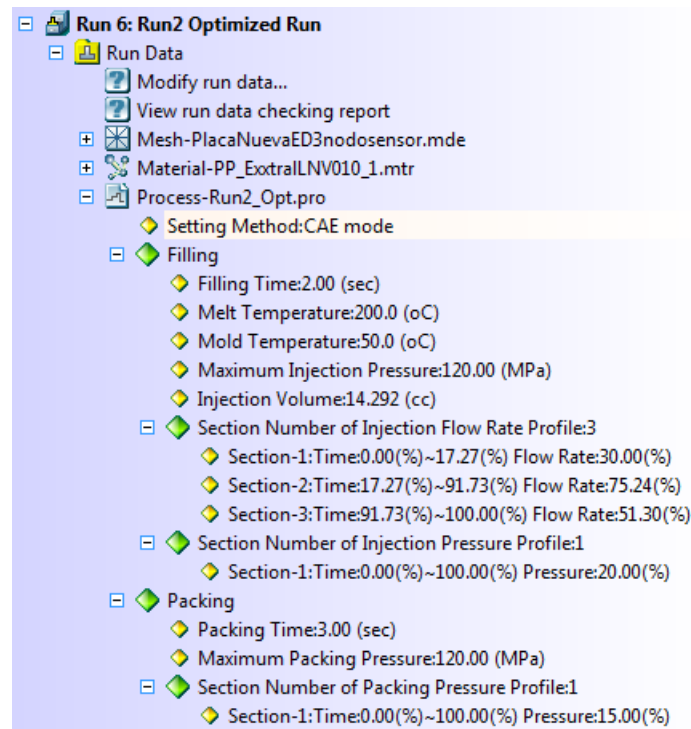


Figura 5.7: Parámetros de la condición optimizada por Moldex3D.

5.7 Gráficos de temperatura y presión

Los patrones de temperatura son similares, con valores pico muy diferentes. Los valores tomados por el sensor en cada condición van desde 68°C hasta 71°C, mientras que los obtenidos en Moldex3D se encuentran entre 122°C y 128°C (los gráficos de temperatura obtenidos por el sensor y los simulados se encuentran en el anexo V, junto a los de presión). Las temperaturas de inyección son de aproximadamente 200°C y la temperatura del molde de 50°C. Por ello se espera que las temperaturas captadas por el sensor resulten mucho mayores a 70°C; siendo que además de poseer el enfriamiento de un polímero fundido (el cual es lento), se genera calor por cizalla por los elevados caudales y la geometría delgada de las piezas inyectadas. Esto es un indicio de que el sensor no capta las temperaturas de la cavidad sino las del molde, teniendo que descartarse el estudio de temperaturas. A futuro, en caso de medir con precisión la temperatura de la cavidad de inyección, habrá que tener en cuenta los errores causados por la posición del sensor en el molde (distintas lecturas si no se ubica bien el nodo sensor en la simulación) y el que puede traer aparejado la diferencia de materiales entre el molde utilizado en el laboratorio de la U.N.M.d.P. y el utilizado por Moldex3D, ya que distintos materiales poseen diferentes conductividades térmicas, lo cual conlleva a que las lecturas de temperatura sean diferentes.

En cuanto a las presiones, cabe destacar que son presiones captadas por el sensor en un punto (tanto por Moldex3D como experimentalmente) y no las presiones ejercidas directamente por la máquina. Por condición:

- Condición 1: los valores pico son diferentes, el sensor captó entre 1,45 y 1,55 MPa, mientras Moldex3D predijo un valor máximo de 2,46 MPa. En cuanto a los patrones de presión, son similares, el sensor distinguió un solo pico y Moldex3D predice además un salto muy pequeño, el cual pudo haber pasado por alto en la práctica.
- Condición 2: valores picos experimentales entre 1,9 MPa y 2,0 MPa, Moldex3D predijo nuevamente un valor máximo de 2,46 MPa. Los patrones son diferentes, nuevamente Moldex3D distinguió dos saltos pequeños, los cuales por una cuestión de precisión pueden haber sido omitidos en la práctica.
- Condición 3: valores máximos experimentales entre 1,8 MPa y 2,0 MPa, Moldex3D predijo un valor de 2,31 MPa. En cuanto a los patrones, tanto Moldex3D como el sensor mostraron 3 picos. Los valores de éstos son diferentes, tanto en máximo como en valor puntual por pico.
- Condición 4: valores picos experimentales entre 1,4 MPa y 1,5 MPa, Moldex3D nuevamente predijo un valor máximo de 2,31 MPa. Pasando a los

patrones de presión, fueron reconocidos tres picos que difieren en los valores entre lo experimental y lo simulado. En el caso de la placa 18 se reconoció un cuarto pico, el cual es el menor de todos, lo cual puede deberse al colapso de una burbuja.

Estas diferencias en los valores de presión pueden ser consecuencia de la consideración de una inyectora diferente a la utilizada en la U.N.M.d.P. y al uso de un material con comportamiento reológico ligeramente distinto al inyectado.

5.8 Tensiones residuales

En el anexo VII se encuentran tabuladas las imágenes obtenidas con el polariscopio para las probetas representativas de cada condición. Dentro de cada condición de inyección, los patrones de tensiones residuales son similares. En la tabla 5.5 se muestra la comparación de los valores máximos obtenidos aplicando la teoría de la fotoelasticidad y los entregados por Moldex3D.

Tabla 5.5: Máximas tensiones residuales experimentales y simuladas para cada condición de inyección.

	Condición 1	Condición 2	Condición 3	Condición 4
Experimental	0,764 MPa	0,764 MPa	0,831 MPa	0,792 MPa
Simulado	0,702 MPa	0,708 MPa	0,553 MPa	0,544 MPa
Error porcentual*	9%	8%	50%	46%

*Definición de error porcentual en anexo IV

Los valores entregados por Moldex3D corresponden a tensiones residuales inducidas por flujo y térmicamente, no tienen en cuenta otros factores; a esto pueden deberse los valores bajos. A mayor temperatura, las condiciones de flujo son mejores y la componente de la tensión residual que esto aporta es menor, encontrándose así valores menores en las condiciones 3 y 4 (220°C) que en la 1 y 2 (200°C). Otra fuente de error es la precisión en las imágenes obtenidas del polariscopio. Errores en la tonalidad de los colores llevan a tensiones residuales completamente diferentes, al buscar los valores de retardo erróneos en la tabla.

5.9 Procesamiento del Polipropileno

Al realizar las comparaciones entre simulaciones e inyecciones experimentales, se nota que una gran fuente de error es la diferencia entre los polipropilenos utilizados para simular e inyectar.

Luego el Ing. José Luis Nicolini, ex Gerente de Tecnología y Proyectos de Petroquímica Cuyo SAIC y Petroken SA, facilitó los datos de procesamiento del PP utilizado

para la inyección en el laboratorio de la U.N.M.d.P. Estos son importantes, ya que en las diversas etapas de procesamiento se añaden diversos aditivos, los cuales pueden modificar el comportamiento del polímero final. El producto 3240SC es, como se mencionó previamente, un copolímero aleatorio. Este se obtiene por polimerización en fase gaseosa con un contenido de etileno de entre 2 y 3%, y se logra un polímero de alto peso molecular con un MFI aproximado de 1,5. A continuación, éste es modificado para su aplicación final, la cual es la inyección de productos de pared delgada, realizando un crackeo por adición de peróxidos hasta un MFI de 26 durante la etapa de pelletización, haciendo uso del proceso de reología controlada. Estos productos inyectados son utilizados comercialmente, y una de las características principales que se busca en la industria es su transparencia. Para esto, la estructura cristalina del material es modificada mediante la adición de agentes promotores de cristalización y clarificadores de la familia de los sorbitoles, los que le confieren al material un mayor grado de transparencia junto a la elevación de su punto de fusión. El aumento de T_f es de 3° , y el índice de opacidad es un menor a un 13% (El índice de opacidad se obtiene con el procedimiento *Haze* de la norma ASTM D1003).

Se carece de información del procesamiento del PP Exxonmobil, pero se puede afirmar que los procesamientos para obtenerlo son diferentes. Este puede poseer un crackeo con una cantidad diferente de peróxidos o una distinta adición de cristalizadores y clarificadores. Todo esto afecta directamente en la reología y en cómo se comporta el PP a la hora de ser inyectado.

CAPÍTULO 6: SUMARIO Y CONCLUSIONES.

Limitaciones del trabajo experimental

- La inyectora no funciona en modo automático, requiriendo por ello una supervisión constante para volver a comenzar el ciclo de inyección de cada pieza y en consecuencia obteniendo un menor número total de piezas inyectadas en un dado periodo de tiempo.
- Se cuenta con elevada presunción de error debido al uso de datos bibliográficos para los cálculos (por ejemplo, constante de Brewster en el método fotoelástico) y al uso de distintos materiales entre lo inyectado y lo simulado.
- La caracterización absoluta de la geometría interna de la inyectora que requiere Moldex3D para utilizar el modo avanzado es difícil de obtener, debiéndose optar por utilizar la inyectora genérica que brinda el software.

Conclusiones:

- Los pesos obtenidos de las piezas son similares por cada condición de inyección, lo cual prueba la repetitividad del proceso.
- Para geometrías simples, es adecuado utilizar mallados eDesign de orden bajo para obtener buenos resultados en la capa límite, por ejemplo: la ubicación de líneas de soldadura y aire atrapado, además del peso final de las placas inyectadas y las tensiones residuales. Esto sirve para una primera aproximación y caracterización del proceso de inyección.
- Del estudio de convergencia para los diferentes mallados utilizados:
 - Las longitudes de la línea de soldadura en la geometría utilizada con condición de inyección 1 convergen a 1.57cm utilizando mallados eDesign1, eDesign2 y eDesign3.
 - Los valores de peso de las piezas simuladas con la condición de inyección 1 convergen a 9,58gr utilizando mallados eDesign2 y eDesign3.
 - Las tensiones residuales solo convergen a partir de mallados con complejidad eDesign3.

- De la comparación entre las piezas inyectadas y simuladas en Moldex3D:
 - Aproximación certera en el estudio de llenado incompleto del molde, descartándose en ambas la temperatura de inyección de 185°C.
 - El menor error porcentual para el peso de las piezas simuladas se dio para la condición de inyección 2, la cual corresponde a temperatura baja y presión elevada, obteniéndose un error de 1,98%.
 - El menor error porcentual para la longitud de la línea de soldadura se dio para la condición de inyección 3, la cual corresponde a temperatura elevada y presiones de 20% para inyección y 15% mantenida, obteniéndose un error de 5,41%.
 - Buena aproximación de tensiones residuales para 200°C, obteniéndose errores porcentuales de 8 y 9%. Para 220°C se obtuvieron errores de 46 y 50%.
- Las temperaturas captadas por el sensor corresponden a la pared del molde (en lugar a la del fundido en la cavidad de inyección), debiéndose descartar dicho análisis.
- Los patrones de presión en un punto obtenidos por el sensor y las simulaciones son similares, difiriendo en los valores pico.

Consideraciones para trabajos futuros:

- Utilizar una instrumentación más sofisticada de la cavidad de inyección para sensar correctamente la temperatura del fundido.
- Realizar inyección en la condición optimizada calculada por Moldex3D.
- Realizar más inyecciones a temperaturas menores a 220°C para el estudio de tensiones residuales. Las mismas a su vez deben ser mayores que 185°C para evitar el llenado incompleto de la cavidad.

ANEXO I: Hoja técnica Polipropileno CUYOLEN 3240SC**CUYOLEN®**DESARROLLO
PRODUCCIÓN
COMERCIALIZACIÓN
ATENCIÓN AL CLIENTE
www.cuyolen.com
ISO 9001SISTEMA
DE CALIBRACIÓN
CERTIFICADO POR
ISO 14001Hoja
Técnica**PETROQUÍMICA CUYO S.A.I.C.**
Carlos Pellegrini 1163 - Piso 6º
[C1009ABW] Buenos Aires, Argentina
Tel.: [54-11] 4393-6600 - Fax: [54-11] 4394-6940**Copolímero Random****3240SC****USO PRINCIPAL: INYECCIÓN**

Su elevada fluidez, permite la inyección de piezas técnicamente complejas y de paredes delgadas.

PROPIEDADES GENERALES

- ◆ Excelentes propiedades ópticas. Alta transparencia
- ◆ Alta fluidez
- ◆ Baja deformación post moldeo

PROPIEDADES**MÉTODO****UNIDAD****VALOR**

Índice de fluencia (230°C/2.16 kg.)

ISO 1133

g/10 min

26

PROPIEDADES MECÁNICAS

Módulo de elasticidad en Flexión (1)

ISO 178

MPa

1100

Esfuerzo de tracción en la fluencia (2)

ISO 527-2

MPa

29

Elongación en la fluencia (2)

ISO 527-2

%

11

Resistencia al impacto Charpy c/e a 23°C (1)
a 0°C

ISO 179

KJ/m²

6

ISO 179

KJ/m²

1,7

PROPIEDADES TÉRMICAS

Temperatura de deflexión HDT/A (1,80 MPa) (1)

ISO 75-2

°C

50

Temperatura de deflexión HDT/B (0,45 MPa) (1)

ISO 75-2

°C

70

NOTAS :

(1) Probeta inyectada de 4 mm * 10 mm * 80 mm

(2) Probeta inyectada de acuerdo a ISO 3167/A.

En su composición este producto cumple con la reglamentación FDA (21 CFR 177.1520 polímeros definidos).

La información suministrada en esta publicación se basa en nuestro conocimiento y experiencia actuales. Debido a que muchos factores pueden afectar las propiedades del artículo final, los datos presentados aquí no eximen al transformador de la responsabilidad de realizar sus propios controles y ensayos, sobre los artículos que produce. Tampoco estos datos implican una garantía jurídica relativa al cumplimiento de una dada propiedad específica o a la idoneidad del material para una aplicación concreta. Todo el que reciba **CUYOLEN®** será responsable por sí mismo de los derechos de patente existentes así como del cumplimiento de las leyes y disposiciones vigentes.

ANEXO II: Hoja técnica Polipropileno Exxonmobil Exxtral LNV 010

ExxonMobil Exxtral™ PP LNV 010 Random Copolymer

Category: Polymer, Thermoplastic

Material Notes:

Product Description: A specialty thermoplastic polyolefin resin with high gloss, low warpage, and low discoloration in contact with hot water/steam in large electrical appliance such as washing machines. Contains anti-static additive. Availability: Africa & Middle East, Asia Pacific, Europe, North America and South America Features: Good Mold Release Good Surface Finish High Flow Uses: Appliance Components Appliances Consumer Applications Processing Method: Injection Molding Information provided by ExxonMobil

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	0.897 g/cc	0.0324 lb/in ³	ISO 1183
Melt Flow	28 g/10 min @Load 2.16 kg, Temperature 230 °C	28 g/10 min @Load 4.76 lb, Temperature 446 °F	ISO 1133

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength, Yield	34.7 MPa	5030 psi	ISO 527-2/50
Elongation at Yield	7.0 %	7.0 %	ISO 527-2/50
Tensile Modulus	1.60 GPa	232 ksi	Secant; ISO 527-2
Charpy Impact, Notched	0.130 J/cm ² @Temperature -30.0 °C	0.620 ft-lb/in ² @Temperature -22.0 °F	ISO 179
	0.231 J/cm ² @Temperature 22.8 °C	1.10 ft-lb/in ² @Temperature 73.0 °F	ISO 179

Thermal Properties	Metric	English	Comments
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	92.2 °C	198 °F	ISO 75-2/B
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	52.2 °C	126 °F	ISO 75-2/A
Vicat Softening Point	153 °C	307 °F	ISO 306/A50

ANEXO III: Molde utilizado y geometría de las placas inyectadas

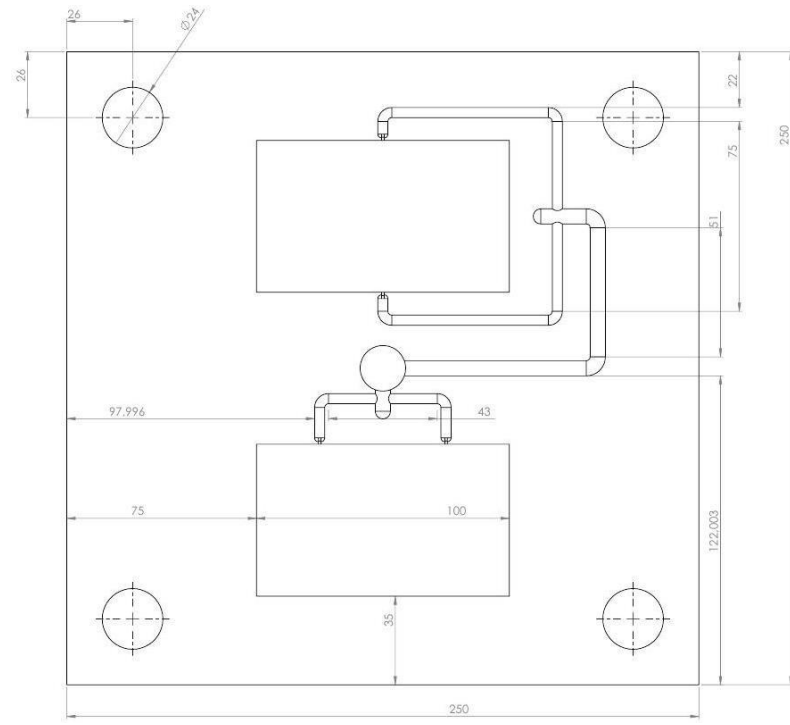


Figura anexIII.1: frente del molde utilizado (medidas en mm).

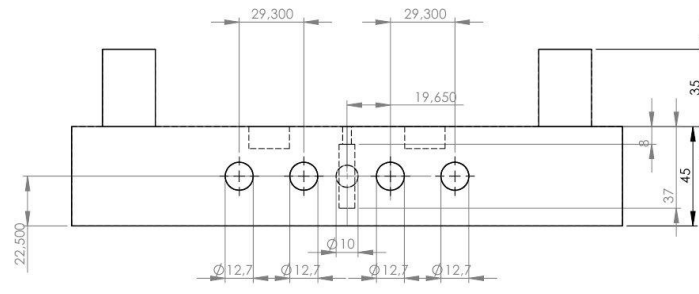


Figura anexIII.2: perfil del molde utilizado (medidas en mm).

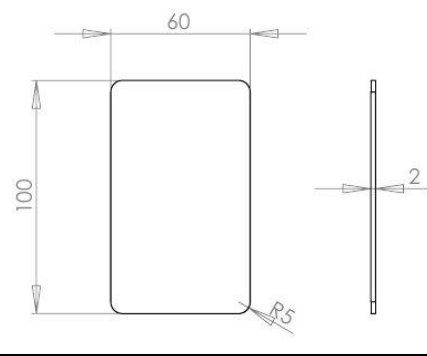


Figura anexIII.3: frente y perfil de las placas inyectadas (medidas en mm).

ANEXO IV: Pesos de las probetas inyectadas y definición de error

Definición del “error porcentual” utilizado:

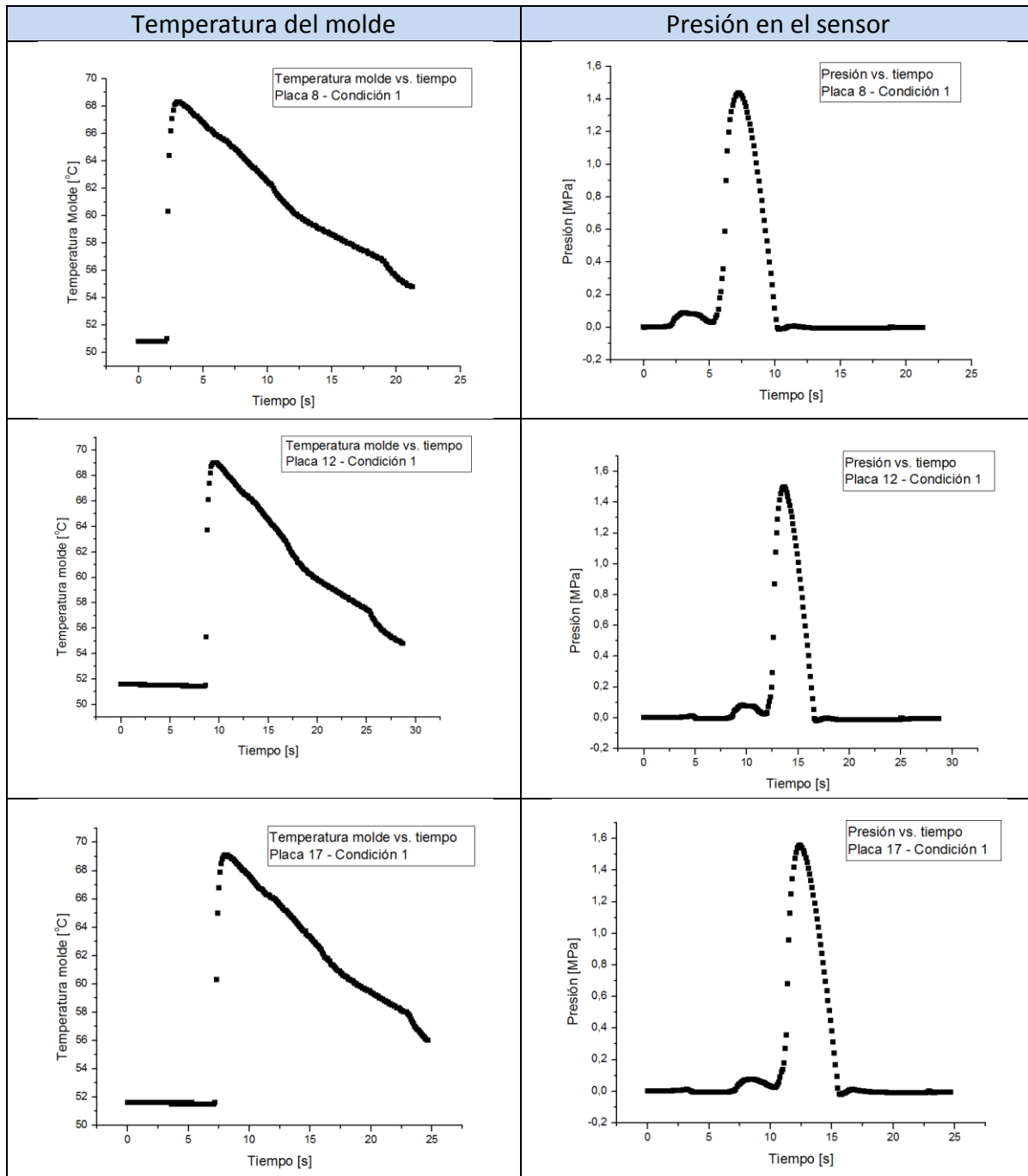
$$\text{Error porcentual} = \frac{|\text{valor simulado} - \text{experimental}|}{\text{valor simulado}} \cdot 100\%$$

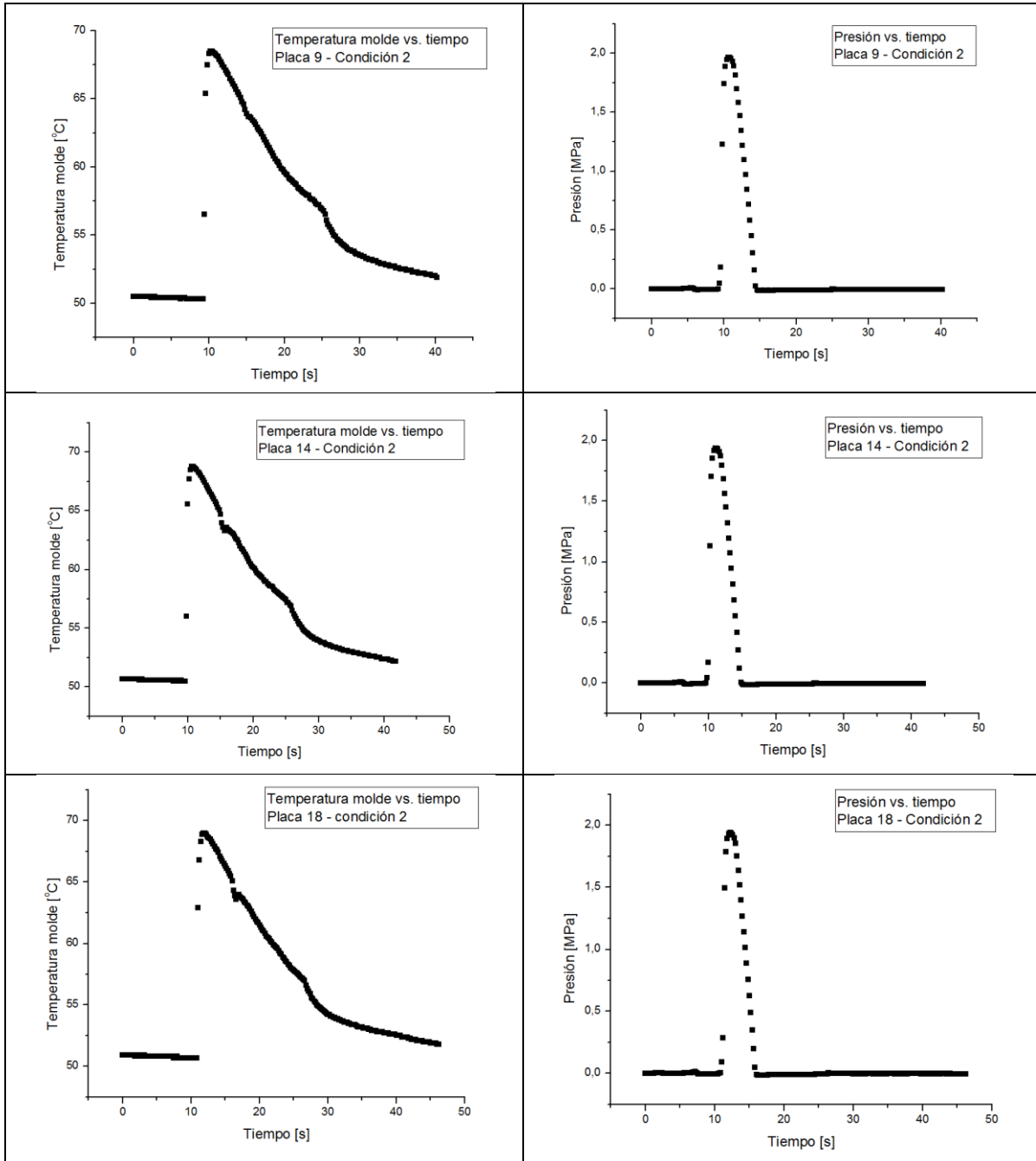
Tabla anexoll.1: pesos para cada probeta inyectada, en gramos.

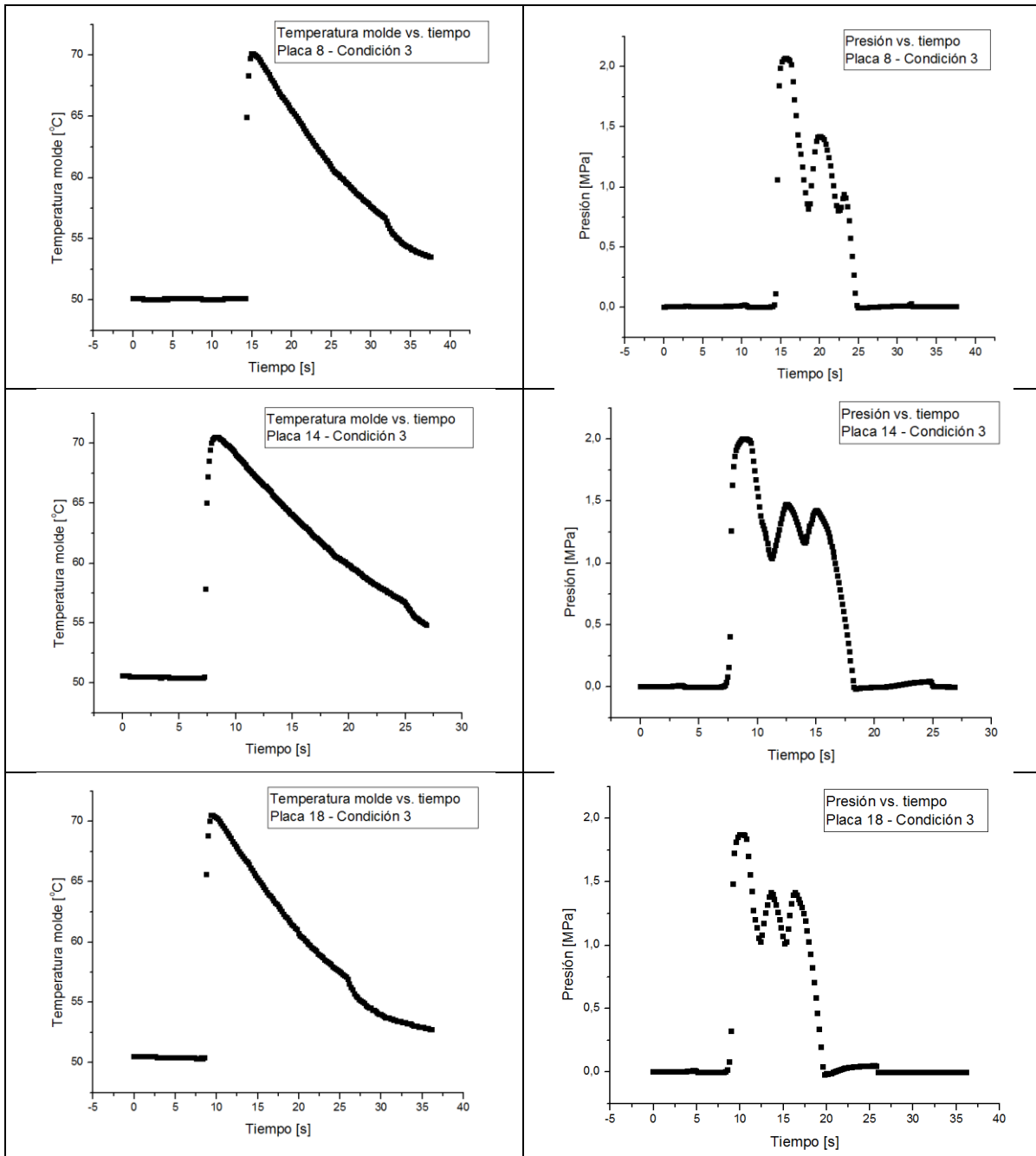
Nº	Condición 1	Condición 2	Condición 3	Condición 4
1	10,1	9,8	10,3	10,3
2	10,0	9,8	10,3	10,1
3	10,1	9,7	10,3	10,1
4	10,1	9,8	10,3	10,3
5	10,1	9,8	10,3	10,2
6	10,1	9,8	10,2	10,3
7	10,1	9,8	10,2	10,1
8	10,1	9,7	10,3	10,0
9	10,1	9,8	10,2	10,2
10	10,1	9,8	10,2	10,1
11	10,1	9,8	10,3	10,2
12	10,1	9,8	10,3	10,2
13	10,1	9,8	10,3	10,1
14	10,0	9,8	10,3	10,1
15	10,1	9,8	10,3	10,1
16	10,1	9,8	10,3	10,3
17	10,1	9,8	10,2	10,1
18	10,1	9,8	10,3	10,3
19	10,1	9,8	10,3	10,3
20	10,1	9,8	10,2	10,1
Promedio	10,09	9,79	10,27	10,18
Error en la pesada	+/- 0,1gr			

ANEXO V: Gráficos de temperatura y presión obtenidos por el sensor y obtenidas de las simulaciones

Tabla anexov.1: gráficos de temperatura y presión obtenidos del sensor.







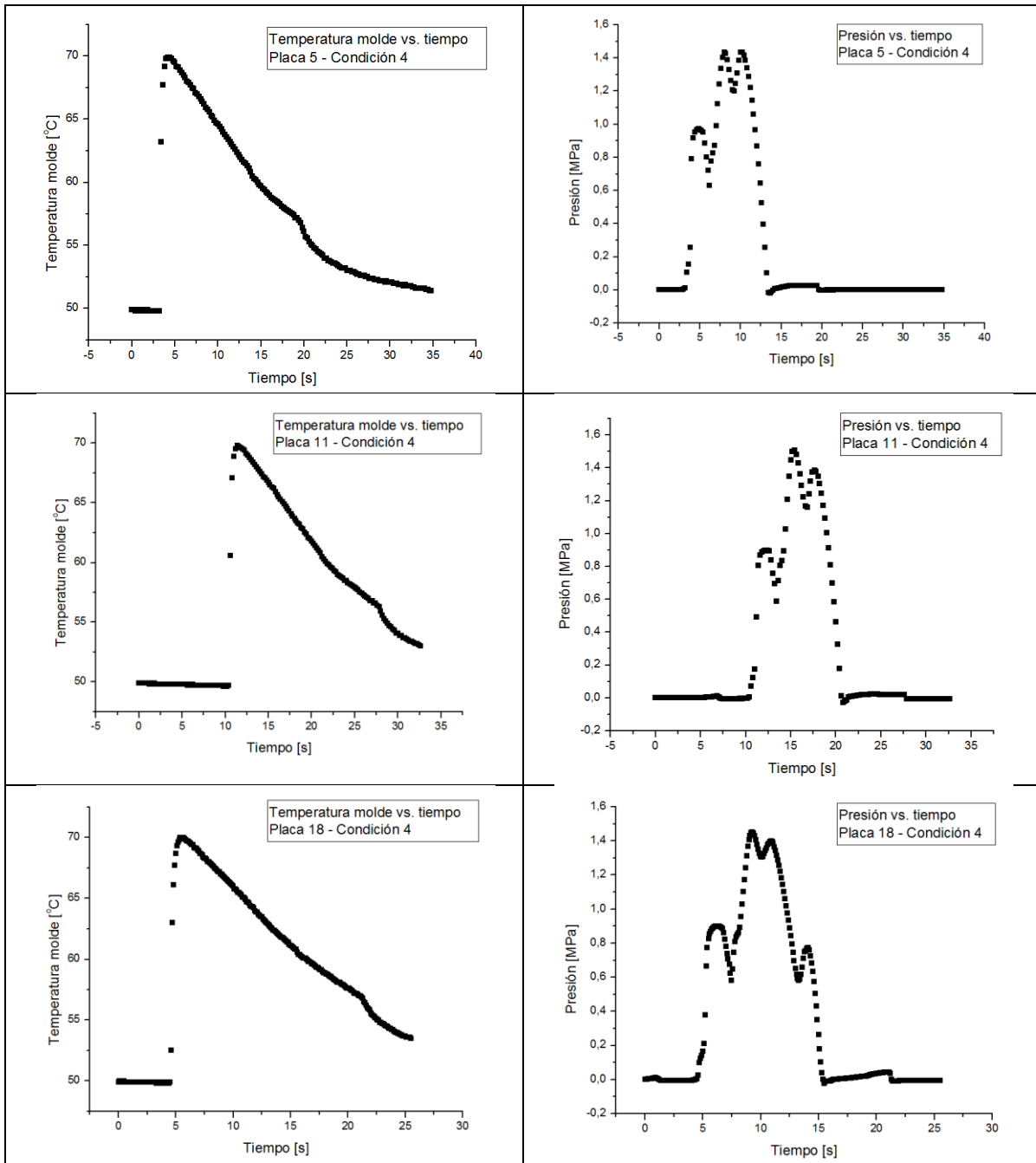
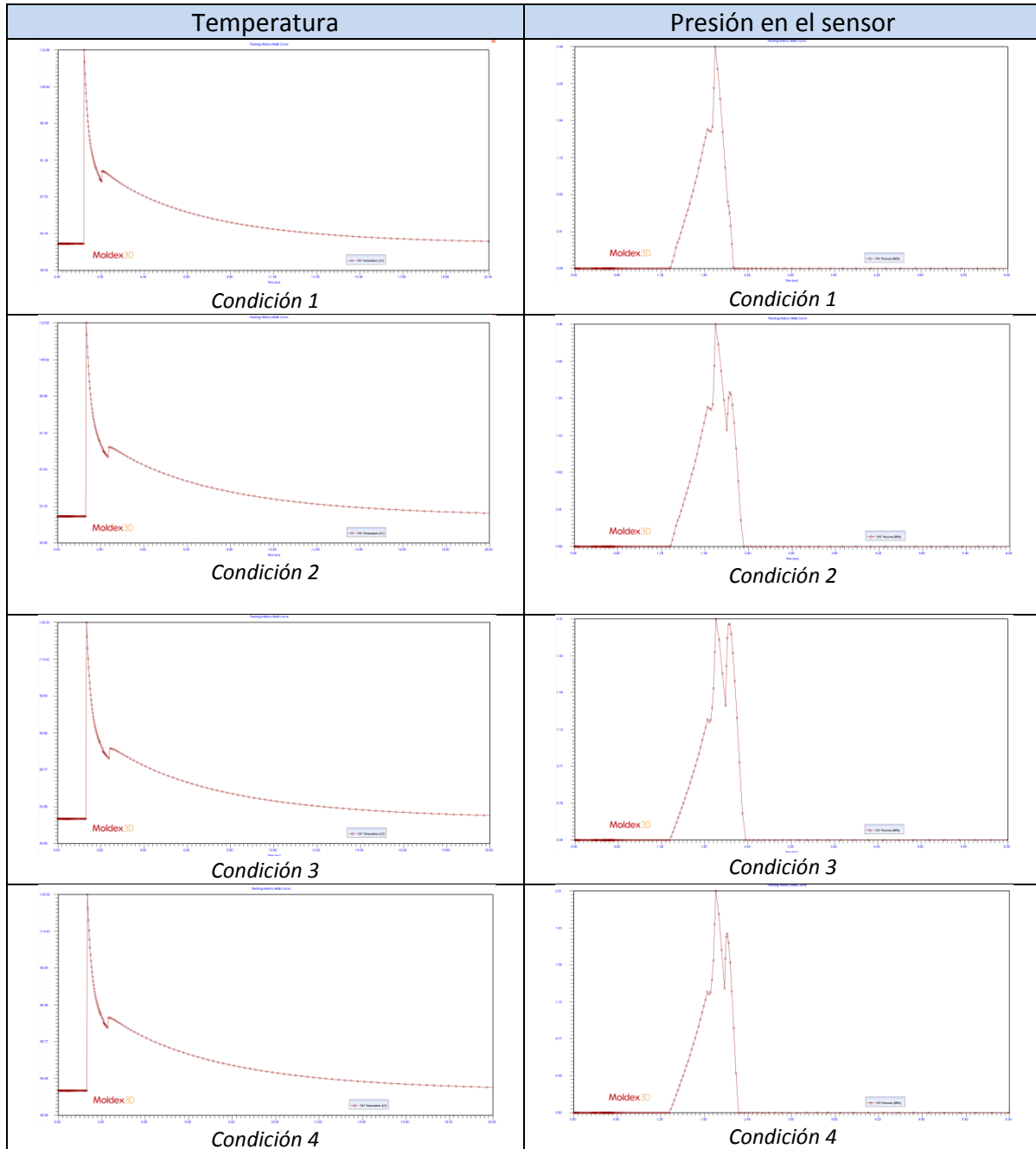


Tabla anexoV.2: gráficos de temperatura y presión obtenidos en las simulaciones.



ANEXO VI: Tabla de retardos y colores correspondientes a la luz emitida en el polariscopio

Retraso δ (nm)	Color transmitido	Valor RGB	Retraso δ (nm)	Color transmitido	Valor RGB
0	Negro	0,0,0	843	Amarillo verde	215,218,46
40	Hierro gris	109,104,101	866	Verde amarillo	182,203,37
57	Gris plomo	121,128,129	910	Amarillo claro	253,202,59
158	Gris azul	156,174,196	948	Anaranjado	255,102,0
218	Gris	157,157,157	998	Anaranjado rojo brillante	195,89,49
234	Verde blanco	214,227,188	1101	Borgoña	153,0,0
259	Marfil	255,255,240	1128	Azul violeta luminoso	208,31,255
267	Amarillo blanco	255,255,204	1151	Índigo(2)	52,83,158
275	Amarillo paja pálido	255,240,163	1258	Ultramar	77,134,126
281	Amarillo pálido	255,247,172	1334	Verde mar	0,128,128
308	Amarillo luminoso	254,252,7	1376	Verde brillante	0,255,8
332	Amarillo brillante	255,239,1	1426	Verde amarillo(2)	153,204,0
430	Amarillo canario	254,207,48	1495	Carnación	249,90,97
505	Rojo anaranjado	226,64,0	1534	Rojo(2)	255,113,92
536	Rojo	253,0,2	1621	Púrpura embotado	107,53,141
551	Rojo profundo	119,4,1	1652	Violeta gris	68,48,53
565	Púrpura	146,67,129	1682	Gris azul(2)	99,129,140
575	Violeta	217,106,235	1711	Verde mar embotado	0,119,116
583	Índigo	57,55,139	1744	Azul verde	0,153,153
664	Azul cielo	146,191,222	1811	Verde luminoso(2)	174,204,96
728	Verde azul	71,146,114	1927	Verde gris luminoso	130,180,130
747	Verde	1,126,0	2007	Blanco verde	234,241,221
826	Verde luminoso	91,250,104	2048	Rojo carne	189,60,60

Fuente: Kuske-Roberston, Photoelastic stress analysis Ed. Awiley. Pág 107

ANEXO VII: Tensiones residuales obtenidas por método fotoelástico

$$\sigma = \frac{\delta}{900 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1} \cdot 2 \times 10^6 \text{ nm}} = \frac{\delta \text{ MPa}}{1800 \text{ nm}}$$

Tabla AnexoVII.1: Longitudes de onda y tensiones residuales para placas de la condición 1.

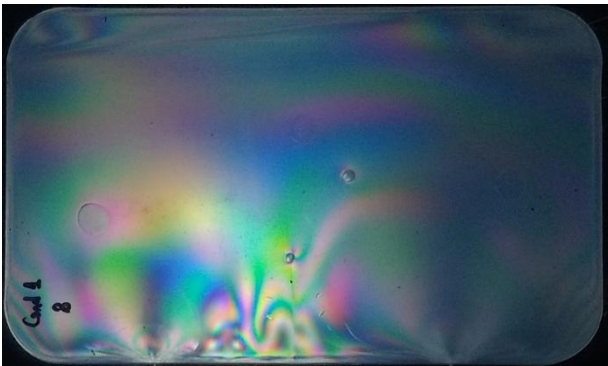
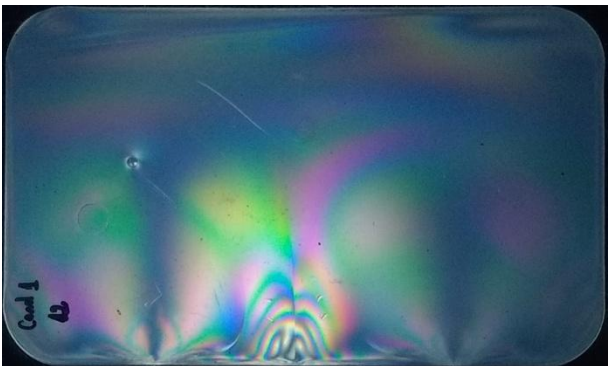
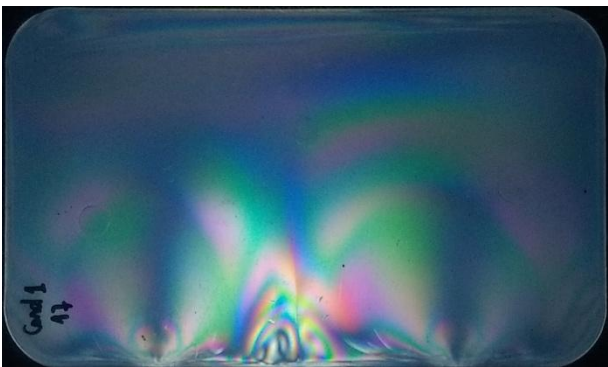
	Foto polariscopio	Colores	Longitud de onda [nm]	Tensión residual [MPa]
Condición 1		Amarillo brillante	332	0,184
		Rojo	536	0,298
		Violeta	575	0,319
		Azul cielo	664	0,369
		Índigo (2)	1151	0,639
		Verde brillante	1376	0,764
		Amarillo brillante	332	0,184
		Rojo	536	0,298
		Violeta	575	0,319
		Azul cielo	664	0,369
		Índigo (2)	1151	0,639
		Verde brillante	1376	0,764
		Amarillo brillante	332	0,184
		Rojo	536	0,298
		Violeta	575	0,319
		Azul cielo	664	0,369
		Índigo (2)	1151	0,639
		Verde brillante	1376	0,764

Tabla AnexoVII.2: Longitudes de onda y tensiones residuales para placas de la condición 2.

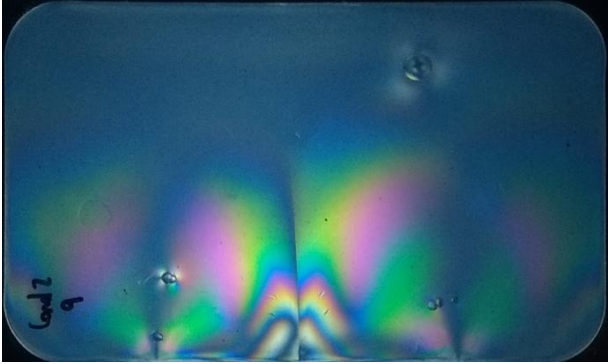
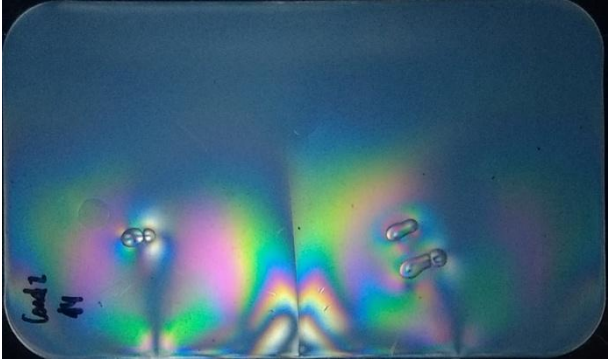
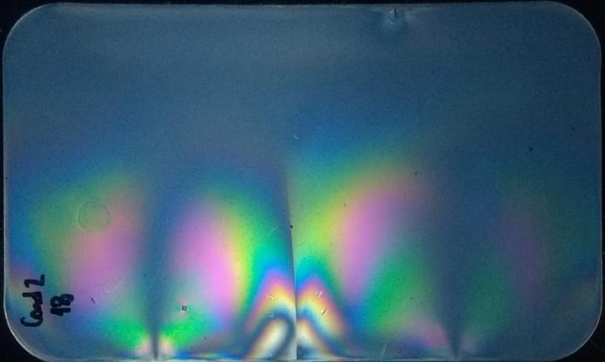
	Foto polariscopio	Colores	Longitud de onda [nm]	Tensión residual [MPa]
Condición 2		Amarillo brillante	332	0,184
		Violeta	575	0,319
		Azul cielo	664	0,369
		Verde	747	0,415
		Azul violeta lum.	1128	0,627
		Índigo (2)	1151	0,639
		Verde brillante	1376	0,764
		Amarillo brillante	332	0,184
		Violeta	575	0,319
		Azul cielo	664	0,369
		Verde	747	0,415
		Azul violeta lum.	1128	0,627
		Índigo (2)	1151	0,639
		Verde brillante	1376	0,764
		Amarillo brillante	332	0,184
		Violeta	575	0,319
		Azul cielo	664	0,369
		Verde	747	0,415
		Azul violeta lum.	1128	0,627
		Índigo (2)	1151	0,639
		Verde brillante	1376	0,764

Tabla AnexoVII.3: Longitudes de onda y tensiones residuales para placas de la condición 3.

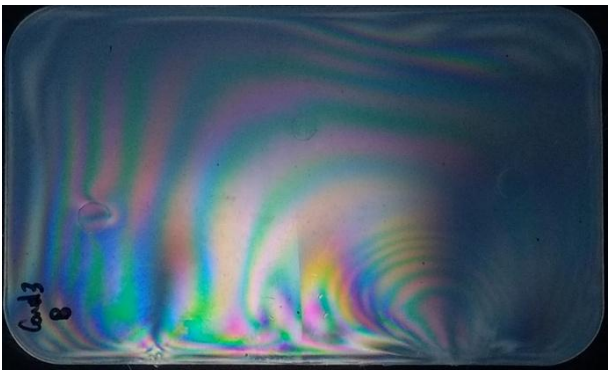
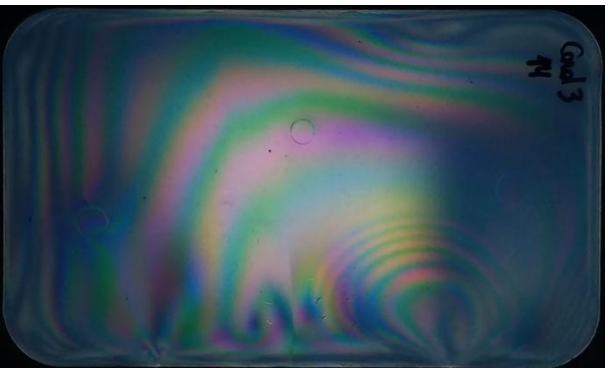
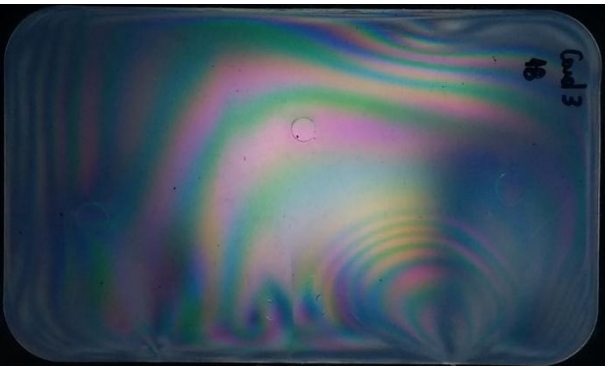

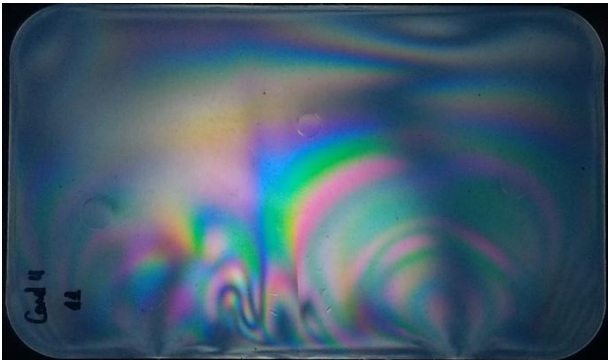
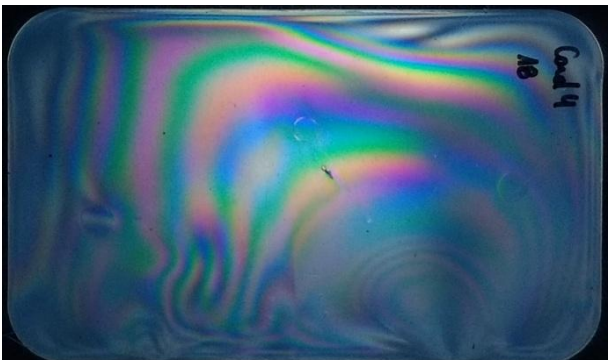
	Foto polariscopio	Colores	Longitud de onda [nm]	Tensión residual [MPa]
Condición 3		Amarillo canario	430	0,239
		Púrpura	565	0,314
		Verde	747	0,415
		Azul violeta lum	1128	0,627
		Carnación	1495	0,831
		Amarillo canario	430	0,239
		Púrpura	565	0,314
		Verde	747	0,415
		Azul violeta lum	1128	0,627
	Amarillo canario	430	0,239	
	Púrpura	565	0,314	
	Verde	747	0,415	
	Azul violeta lum	1128	0,627	
		Carnación	1495	0,831

Tabla AnexoVII.4: Longitudes de onda y tensiones residuales para placas de la condición 4.

	Foto polariscopio	Color	Longitud de onda [nm]	Tensión residual [MPa]
Condición 4		Azul cielo	664	0,369
		Verde luminoso	826	0,459
		Amarillo claro	910	0,506
		Azul violeta lum.	1128	0,627
		Verde amarillo (2)	1426	0,792
		Azul cielo	664	0,369
		Verde luminoso	826	0,459
		Amarillo claro	910	0,506
		Azul violeta lum.	1128	0,627
Verde amarillo (2)		1426	0,792	
	Azul cielo	664	0,369	
	Verde luminoso	826	0,459	
	Amarillo claro	910	0,506	
	Azul violeta lum.	1128	0,627	
	Verde amarillo (2)	1426	0,792	