

Proyecto final

**PROPIEDADES AL IMPACTO DE PIEZAS
DE POLIPROPILENO PROCESADAS POR
INYECCIÓN CON SINGULARIDADES
GEOMÉTRICAS**

María Alejandra Costantino

Director: Dra. Patricia María FRONTINI

Co-Director: Dra. Valeria PETTARIN

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA
FACULTAD DE INGENIERIA
MARZO 2010**



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/).

1.1 Introducción

El moldeo por inyección es un procesamiento utilizado en distintas áreas de la industria, principalmente en la automotriz. El uso creciente de los polímeros está asociado a la reducción en el costo, que resulta de una disminución en el peso de las piezas, eliminación de etapas de procesamiento secundarias y un gasto energético menor en el procesamiento. El polipropileno es un material utilizado ampliamente en muchas aplicaciones debido a que presenta una atractiva relación costo/performance.

Las propiedades mecánicas de las piezas poliméricas inyectadas dependen de su microestructura. La performance de una pieza inyectada es el resultado de la combinación entre las propiedades intrínsecas del material original (peso molecular, tacticidad, etc) y las propiedades resultantes de las estructuras supramoleculares desarrolladas durante el procesamiento [1]. Dentro de los defectos estructurales producidos durante el procesamiento se encuentran las líneas de soldadura. Una línea de soldadura fría (weld line) se forma cuando dos frentes de polímero fundido que viajan en direcciones opuestas colisionan. Una línea de soldadura caliente (meld line) ocurre si dos frentes de polímero fundido fluyen paralelos uno con el otro y crean un enlace entre ellos, debido a que esta línea es formada con tiempo suficiente para que fluyan los dos frentes bajo presión. Tanto las líneas de soldadura calientes como frías pueden ser causadas por huecos o insertos en la pieza, múltiples puntos de inyección o cuando se está en presencia de un espesor de pared del molde variable.

Las líneas de soldadura son “regiones débiles” en las piezas poliméricas inyectadas causadas por enlaces insuficientes (un bajo “entanglement”), orientación molecular desfavorable y formación de un “V-notch” que actúa como un concentrador de tensiones. Esto conduce a una significativa reducción en las propiedades mecánicas de los productos finales.

Una manera común de realizar pruebas de controles de calidad de las líneas de soldadura es llevando a cabo ensayos de impacto. La resistencia de la línea es comparada con la resistencia del material en “bulk” [2].

Por otra parte, la simulación del moldeo por inyección es el ejemplo mas exitoso en cuanto a la simulación de todos los procesos de conformado de polímeros. El costo asociado a diseñar un molde de inyección es alto y la probabilidad de que cualquier tipo de problema pueda llegar a ser descubierto y solucionado en la etapa de producción es muy baja, por lo tanto el costo total de la puesta en marcha e identificación de defectos resulta alto sumado al tiempo de trabajo perdido. Estas características hacen que la simulación resulte de un gran valor para la industria.

1.2 Conceptos generales

1.2.1 Características generales del polipropileno

El polipropileno (PP) es un polímero semicristalino obtenido por polimerización de propileno en presencia de un catalizador específico (Zeigler-Natta) bajo condiciones de presión y temperatura controladas.

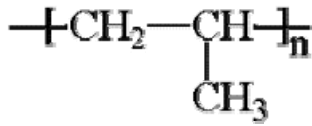


Figura 1.1. Estructura repetitiva de la macromolécula

Actualmente el polipropileno es uno de los termoplásticos mas vendidos en el mundo, con una demanda anual estimada de 40 millones de toneladas. Sus incrementos anuales de consumo han sido próximos al 10% durante las últimas décadas, confirmando su grado de aceptación en el mercado.

La buena acogida que ha tenido ha estado directamente relacionada con su versatilidad, sus buenas propiedades físicas y la competitividad económica de sus procesos de producción. Las propiedades que lo determinan como material idóneo son las siguientes:

- Baja densidad
- Alta dureza y resistente a la abrasión
- Alta rigidez
- Buena resistencia al calor
- Excelente resistencia química
- Excelente versatilidad

Por la excelente relación entre sus prestaciones y su precio, el polipropileno ha sustituido gradualmente a materiales como el vidrio, los metales o la madera, así como polímeros de amplio uso general.

1.2.2 Polipropileno homopolímero

Se denomina homopolímero al PP obtenido de la polimerización de propileno puro. Según su tacticidad, se distinguen tres tipos [3]:

- **PP atáctico:** Material completamente amorfo, tiene pocas aplicaciones.

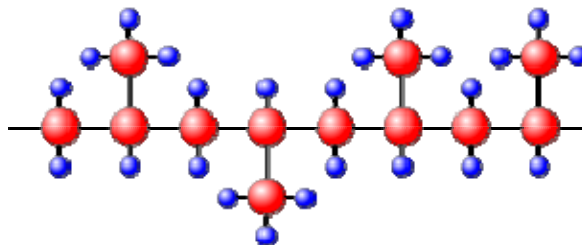


Figura PP atáctico

- **PP isotáctico:** La distribución regular de los grupos metilo le otorga una alta cristalinidad, entre 70 y 80%. Es el tipo más utilizado hoy día.

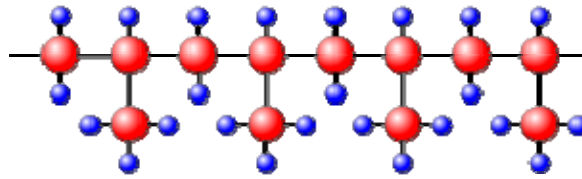


Figura PP isotáctico

- **PP sindiotáctico:** Muy poco cristalino, lo cual le hace ser más elástico que el PP isotáctico pero también menos resistente.

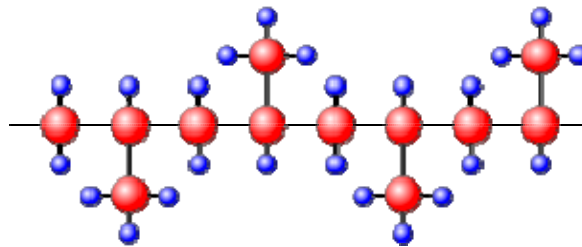


Figura PP sindiotáctico

Desde el punto de vista comercial, el polipropileno isotáctico es más importante comparado con el sindiotáctico y el atáctico; el polipropileno isotáctico es la estructura más stereo-regular del polipropileno. Por esto es logrado un alto grado de cristalinidad. Como resultado, muchas propiedades mecánicas y de procesabilidad del polipropileno son determinadas por el nivel de isotacticidad y su cristalinidad. En la presente tesis se trabajó con polipropileno homopolímero isotáctico.

1.2.3 Polipropileno como polímero semi-cristalino

Dentro del amplio universo de materiales termoplásticos, los hay aquellos que presentan estructuras totalmente amorfas, y otros que muestran, conjuntamente con zonas de estructura amorfa, determinado orden cristalino. A esos materiales se los denomina semicristalinos. El polipropileno, debido a su forma lineal de polimerizar y de su forma isotáctica de ordenarse es uno de ellos.

Bajo determinadas condiciones, generalmente de enfriamiento, polímeros amorfos pueden cristalizar parcialmente volviéndose semi-cristalinos. Esto permite la coexistencia de zonas amorfas con zonas cristalinas. Evidentemente, estas zonas cristalinas modifican notablemente las propiedades, incluso siendo tan sensible dicha respuesta, que pequeños incrementos o descensos de cristalinidad, aumentan o disminuyen notablemente los valores de resistencia mecánica.

Como cualquier otro material, durante la solidificación, los dos procedimientos básicos son la nucleación y el crecimiento de dichos núcleos. De alguna forma, controlando las condiciones de enfriamiento se pueden predecir determinadas formas microestructurales. Esta solidificación se produce homogéneamente si la misma ocurre lentamente, y de la misma forma que con los metales, el porcentaje de cristalinidad se incrementa. Sin embargo, Suajanya, [4] dice que el grado de cristalinidad no solo es afectado por las condiciones de enfriamiento sino también por la presencia de distintos aditivos, sobre todo aquellos que actúan como cargas (tanto rellenos como refuerzos). Estos últimos, en determinados porcentajes tienden a incrementar ligeramente el grado de cristalinidad, ya que actúan como agentes nucleantes, pero si se incrementa por encima de un límite el porcentaje de fase refuerzo, ésta comienza a actuar como una barrera para el ordenamiento.

En polímeros, esta estructura está conformada por lamelas de entre 10-20 nm de espesor, con longitudes de entre 0,1 y 10 μm . Esta cristalinidad, que incrementa ligeramente la densidad del material, se inicia cuando el material se pone en contacto con la superficie del molde. Este porcentaje de fase cristalina, que suele ser bajo en la superficie debido al alto subenfriamiento ($T_i - T_m$) se va incrementando a medida que desciende la velocidad de extracción de calor, que además se magnifica por el bajo coeficiente de conductividad térmica propio de estos materiales. Esto hace que a medida que el espesor de la pieza se incrementa, el porcentaje de cristalinidad aumente, además cambiando de un crecimiento columnar a un crecimiento de los cristales equiaxial. Una representación esquemática de las formas cristalinas, así como de sus dimensiones, se observan en la Figura 1.2

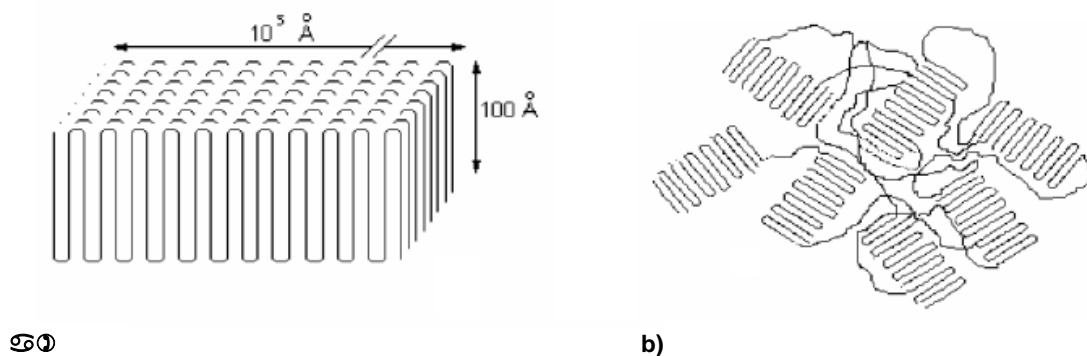


Figura 1.2. Cristalinidad en polímeros a) Modelo de cadena plegada, formada por evaporación de soluciones b) Lamelas obtenidas por cristalización desde el fundido.

Las zonas cristalinas, además de adolecer de T_g poseen un menor volumen específico. Esto hace que si una pieza tiene un espesor considerable, en el interior de la misma, y generalmente situado en el eje térmico de la pieza, resulte en una apreciable reducción del volumen, que resulta en un estado de tensiones predominantemente normales de tracción, mientras que las zonas cercanas a la superficie, presentan esfuerzos normales de compresión. Estos campos de tensiones residuales afectan las propiedades mecánicas de las piezas, inclusive con tendencias a deformaciones tempranas. Y si bien es cierto que los materiales se diseñan para que tengan una orientación preferencial de sus arreglos cristalográficos en función de su historia térmica, a menudo se

opta por inyectar PP en espesores delgados, inclusive manteniendo altas velocidades de enfriamiento, a través de moldes refrigerados. Esto no solo evita grandes diferencias de cristalinidad entre superficie y bulk, sino que además, fundamentalmente disminuyen los ciclos de inyección, aspecto que en la industria es fuertemente condicionante. De hecho, a menudo, por incrementar dicha velocidad de enfriamiento, se genera un efecto contraproducente, ya que la estructura superficial resulta muy fina, creando estados tensionales que derivan en deformaciones permanentes que se producen de manera prácticamente instantánea.

1.3 Moldeo por inyección

El moldeo por inyección es una forma de procesamiento muy utilizada en la industria, apropiada para producir partes plásticas con geometrías complejas y altos requerimientos de tolerancia. La técnica consiste básicamente en calentar pellets (gránulos) plásticos para obtener un fundido homogéneo, el cual es forzado por presión a fluir dentro de una cavidad, el molde, compuesto por dos mitades cerradas. El componente responsable del transporte y fusión de los pellets es un tornillo giratorio, mediante un mecanismo similar al de extrusión. La presión creada en la punta del tornillo por el material recientemente fundido lo fuerza a retroceder a su posición inicial. Luego el mismo tornillo actuando como pistón, se mueve hacia delante, creando la presión necesaria para llenar el molde por completo y presurizar el fundido durante el enfriamiento. Una válvula “sin retorno” al final del tornillo previene que el flujo en retroceso ingrese al barril nuevamente. Dentro del molde el fundido se mantiene bajo presión, mientras se enfría, para compensar la contracción de volumen. Luego que se solidifica el canal de entrada, el tornillo comienza a rotar fundiendo el material para el próximo ciclo y retrocediendo a su posición inicial. Mientras tanto, el material sigue enfriándose dentro del molde, el cual es abierto cuando la pieza adquiere rigidez suficiente para ser eyectado. El molde se cierra nuevamente y el proceso se repite para hacer una nueva pieza.

1.3.1 El proceso y las variables principales

El proceso de moldeo por inyección puede ser dividido en cuatro etapas:

- Plastificación en el barril
- Inyección del fundido dentro del molde (fase dinámica)
- Presurización del material en la cavidad del molde (fase estática)
- Enfriamiento

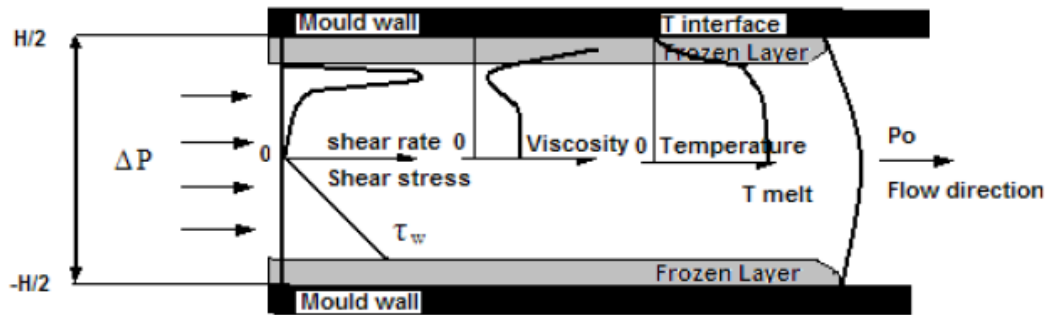


Figura 1.4 Ambiente termomecánico desarrollado durante la etapa de llenado del moldeo por inyección

Durante estas etapas, el material sufre transformaciones sucesivas, siendo sometido a un ambiente termomecánico que determina la microestructura final de la pieza. Este ambiente es definido por un grupo de variables asociadas con:

- Las propiedades del material (viscosidad, propiedades térmicas y físicas)
- Las opciones de diseño del molde (material del molde, sistema de enfriamiento, dimensiones del sistema de alimentación)
- La impresión del molde (espesor, posición y geometría del canal de entrada, relación superficie-espesor)
- El diseño del equipo y su performance (geometría del tornillo, aspectos constructivos)
- Las variables determinadas por las condiciones de funcionamiento impuestas a la máquina (ajustables por el operador)
- Las condiciones ambientales (humedad y temperatura ambiente)

El ambiente termomecánico puede describirse brevemente para las tres etapas principales del ciclo de moldeo (llenado, retención de la presión (holding) y enfriamiento). Durante la etapa de llenado, las cadenas moleculares son forzadas a un alineamiento preferencial debido a los altos valores de velocidad de deformación en los canales y geometrías angostas (especialmente en la zona cercana a la pared del molde), donde el polímero es estirado. A medida que se va llenando la cavidad, el material cercano a las paredes frías del molde solidifica inmediatamente, mientras la porción siguiente del fundido fluye rápidamente a las regiones centrales de la pieza aislado térmicamente por la piel formada previamente. Cuando el fundido orientado llega a un estado estático, las macromoléculas se relajan debido a su naturaleza viscoelástica, hasta alcanzar la temperatura de cristalización. Este fenómeno de relajación depende de la naturaleza del polímero, la velocidad de enfriamiento y la presión [5].

Durante la etapa subsiguiente, retención de la presión, la velocidad del fundido se reduce drásticamente, pero una pequeña cantidad de material sigue introduciéndose en el molde para compensar la contracción volumétrica. Este

flujo lento afecta las distribuciones de velocidad de deformación, especialmente cerca de la interfase sólido-fundido, debido a que las temperaturas locales son menores, y consecuentemente es alta la viscosidad del fundido. Mientras tanto, el núcleo interno se enfría bajo una presión relativamente alta. La duración de esta etapa es determinada por el tiempo de solidificación del canal de entrada.

En el enfriamiento, las capas ya solidificadas actúan como aislantes debido a la baja conductividad térmica, permitiendo un enfriamiento más lento del núcleo mediante una reducción gradual de la presión local (la contracción del material ya no es mas compensada con la presión de la máquina). En el caso de polímeros semicristalinos, el enfriamiento es acompañado por una transición de fase exotérmica (cristalización) y una reducción de volumen significativa [5].

El ambiente termomecánico, es por lo tanto, caracterizado por altos gradientes de temperatura y niveles de tensión [3]. Las simulaciones computacionales son capaces de calcular los perfiles de temperaturas, velocidades de deformación y tensiones a través del espesor.

1.3.2 Ciclo del moldeo

- **1.** Molde cerrado y vacío. La unidad de inyección carga material y se llena de polímero fundido.
- **2.** Se inyecta el polímero abriéndose la válvula y, con el husillo que actúa como un pistón, se hace pasar el material a través de la boquilla hacia las cavidades del molde.
- **3.** La presión se mantiene constante para lograr que la pieza tenga las dimensiones adecuadas, pues al enfriarse tiende a contraerse.
- **4.** La presión se elimina. La válvula se cierra y el husillo gira para cargar material; al girar también retrocede.
- **5.** La pieza en el molde termina de enfriarse (este tiempo es el más caro pues es largo e interrumpe el proceso continuo), la prensa libera la presión y el molde se abre; las barras expulsan la parte moldeada fuera de la cavidad.
- **6.** La unidad de cierre vuelve a cerrar el molde y el ciclo puede reiniciarse.

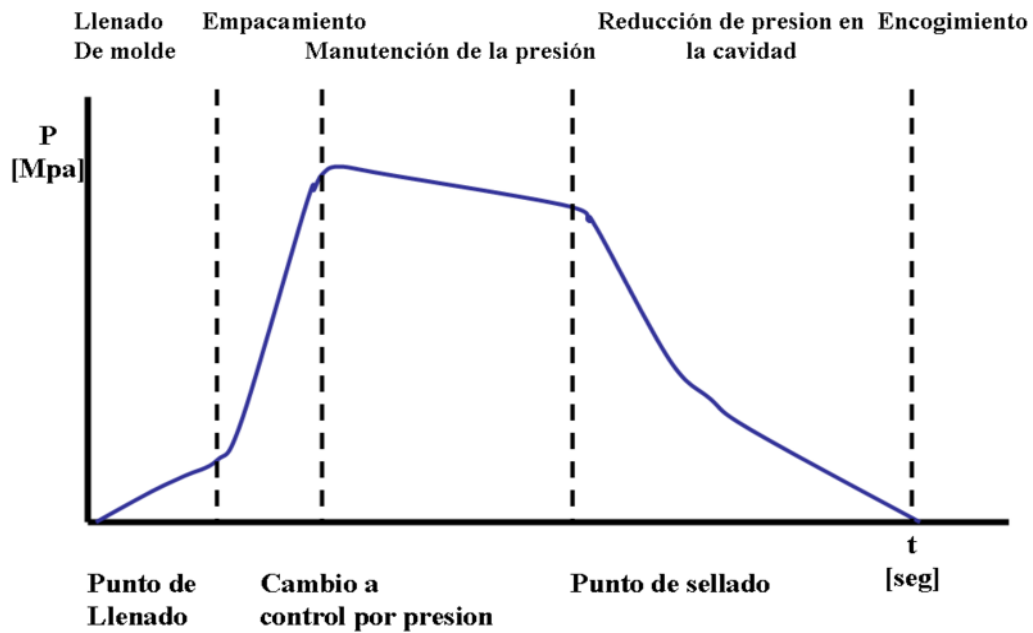


Figura 1.5. Presión dentro de la cavidad de moldeo en función del tiempo transcurrido.

Puede observarse que en la etapa de mantenimiento de la presión (holding) hay un leve decaimiento en la presión, esto es debido a que la pieza en esta etapa comienza a enfriarse y a solidificar en la zona próxima a las paredes y esto inhibe la transferencia de presión y por ello se registra una disminución de presión.

Con materiales semicristalinos, se debe agregar más material dentro del molde que con los amorfos para incrementar la presión al comienzo de la etapa de holding. Mientras el plástico se enfría durante la etapa de holding, más material deberá ser inyectado dentro del molde para compensar la contracción volumétrica y para prevenir la formación de marcas indeseadas en la pieza terminada.

1.3.3 Variables de la máquina

- **Temperatura de inyección:** Generada por la fricción del material contra las paredes del tornillo y por el calentamiento a lo largo del tornillo por medio de resistencias. Es un valor fundamental, siempre superior a la temperatura del molde, con la precaución que si bien cuanto mayor es el sobrecalentamiento (ΔT), menor es la viscosidad y mayor la colabilidad, se puede atentar contra la estabilidad térmica del material. Por otro lado, el calor dentro de las inyectoras está generado por la fricción de los pellets respecto del tornillo de la máquina, mientras que las resistencias externas solo mantienen esa temperatura estable. Además, altos ΔT pueden generar "babeos" en el pico de inyección de la máquina y hasta degradaciones y cambios en el color del material. Siempre se recomienda la menor temperatura de inyección, debido al ahorro de energía y al acortamiento natural de los ciclos de enfriamiento.

- **Tiempo de inyección-Velocidad de inyección:** Determina el flujo de ingreso del material dentro de la cavidad de moldeo. Con altas velocidades de inyección se minimizan las líneas de flujo y se atenúan las líneas de soldadura. Sin embargo, altas velocidades de llenado en cavidades de gran volumen obligan a realizar venteos que permitan un libre llenado de la cavidad sin que la misma se “ahogue”. En caso que esto no ocurra, esa dificultad para llenar la cavidad redonda en altas presiones puntuales, donde se incrementa la temperatura y pueden ocurrir degradaciones térmicas del material.

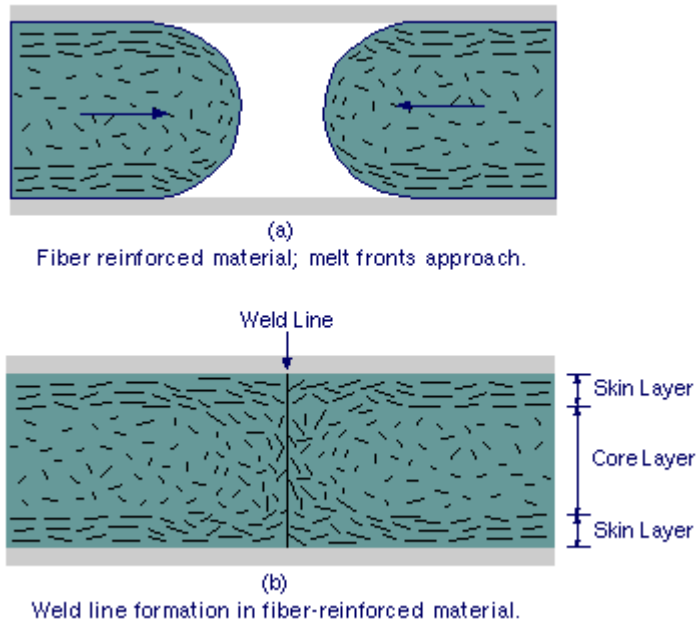
- **Presión de inyección (P_{max}):** Es una de las variables más importantes sobre todo cuando se está frente a piezas con líneas de soldadura. Por un lado, a mayor presión de inyección mayor es el grado de adhesión de los frentes que colisionan, por ende mayor número de “entanglements” en la línea. Por otra parte, a mayor presión de inyección mayor debe ser la fuerza de cierre del molde debido a que si ésta última es superada por la presión de inyección multiplicada por el área proyectada de la pieza, entonces el molde se abre y se producirán rebabas o “flashing” en el producto final. Sin embargo, una presión de inyección demasiado baja no es recomendada debido a que la cavidad de moldeo no llega a ser llenada completamente por el polímero fundido produciendo lo que se conoce como “short shot”.

- **Presión secundaria (holding):** también denominada segunda presión, contra presión de mantenimiento y/o “holding pressure”. Valores bajos de P_2 atentan contra la homogeneidad de la pieza desde el punto de vista del llenado, mientras que altos valores producen lo que comúnmente se conoce como “flashing” (producción de rebabas en la pieza). Este valor incide críticamente sobre la microestructura del material.

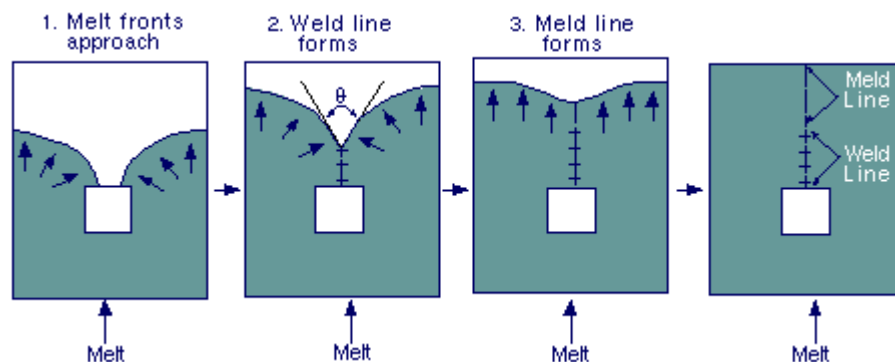
1.3.4 Líneas de soldadura en las piezas inyectadas

Las líneas de soldadura están presentes en muchos productos plásticos incluidos aquellos producidos mediante moldeo por extrusión, moldeo por compresión y sheet moulding compound, pero en el proceso en el que es más factible que ocurran y que han sido más estudiadas es en el moldeo por inyección [6].

La Figura 1.5 ilustra algunas de las circunstancias que conducen a producir líneas de soldadura en el proceso de moldeo por inyección. En un molde con más de un punto de inyección tal como el de la Figura 1.5.a) los frentes de flujo colisionan durante la última etapa del llenado del molde y la mezcla se inmoviliza. La última sección a ser llenada es la cercana a la superficie del molde, esto conduce, no siempre, a la producción de un notch “V-sharped”. En la Figura 1.5b) se observa una situación donde el frente de flujo se divide en dos por un obstáculo y la línea se forma cuando los dos frentes se unen nuevamente. En este caso la estructura de la línea está influenciada por el flujo, [6]



a)



b)

Figura 1.5. Circunstancias que conducen a producir líneas de soldadura.

Las líneas de soldadura son regiones “débiles” en las piezas poliméricas inyectadas, debido a un bajo “entanglement”, orientación desfavorable y formación de un “V-notch” que actúa como concentrador de tensiones. También puede quedar aire ocluido en la zona de la línea, debido a que éste, que residía en la cavidad antes de ser llenada con el polímero fundido, es incapaz de escapar hacia la zona de venteo durante el tiempo del llenado del molde. Cambiando los parámetros de procesamiento, es posible mejorar la resistencia de la línea. Esto puede ser llevado a cabo, a través de la mejora de la cohesión en la región de la línea, el aumento de la orientación molecular en dirección de aplicación de la carga, o el desarrollo de una estructura favorable. La morfología de las líneas de soldadura es determinada por las características intrínsecas del material y las variables de procesamiento [7].

Numerosas investigaciones publicadas en los últimos 20 años (1-5) revelan que lo que llamamos “línea de soldadura” es, de hecho, una zona que se extiende por completo a lo largo del espesor de la pieza inyectada. La cual, puede que, dependiendo del tipo y composición del material, tenga varios milímetros de ancho. En la zona de la línea de soldadura, cada característica estructural del material puede que sea distinta del material en bulk. Como consecuencia, el comportamiento mecánico del material en la línea de soldadura es diferente del resto [8].

1.3.5 Modelado del proceso de inyección

La simulación computacional del proceso de moldeo por inyección es una herramienta importante en el diseño de la calidad de partes plásticas, ya que permite:

- La exploración previa de varias opciones de diseño del molde (posiciones de los canales alimentadores, dimensiones de los canales y la posición de los canales de enfriamiento).
- La redefinición de la geometría de la pieza (cambios en el espesor).
- La elección de la máquina apropiada de inyección (cálculo de la distribución de presión y la fuerza de cierra respectiva).
- La valoración del ambiente termomecánico asociado con una pieza determinada, que limita el desarrollo de la morfología y la calidad de la pieza.

La simulación del proceso de inyección posee ciertas complejidades debido a:

- La naturaleza dinámica y transitoria del proceso (Flujos simultáneos y enfriamiento altamente no isotérmico).
- Las características del material (comportamiento viscoelástico y pseudoplástico, la baja difusividad térmica, la cinética de cristalización, etc.).
- El acoplamiento de problemas térmicos y mecánicos, debido a la disipación viscosa y a la dependencia de la viscosidad con la temperatura.
- Las condiciones de flujo.

Todos estos fenómenos están fuertemente interconectados. En las simulaciones, los fenómenos físicos involucrados son matemáticamente modelados en base a la teoría de mecánica de fluidos y transferencia de calor, considerando el fundido como un continuo. Las ecuaciones de balance son resueltas con técnicas numéricas implementadas en códigos computacionales. Las etapas de llenado, retención de la presión y enfriamiento normalmente son tratadas separadamente, los resultados de la etapa precedente son utilizados como parámetros de entrada de la etapa siguiente. Los balances de masa, materia y energía [9,10] son resueltos simultáneamente con una ecuación constitutiva apropiada para el comportamiento del material. Estos balances deben ser resueltos en el complicado dominio definido por la geometría de la pieza. Generalmente varias suposiciones son realizadas para obtener

soluciones tratables con el poder computacional actual (limitaciones de hardware y de tiempo) y las posibilidades de testeo (requisitos de información del material)[9].

A pesar de la existencia de códigos más generales, las hipótesis más comunes en los softwares comerciales son [9,10]:

- El material es incompresible (al menos durante la etapa de llenado) y asumido como un fluido newtoniano generalizado.
- Las propiedades termofísicas del material se asumen constantes.
- Las hipótesis de la teoría de la lubricación son válidas y se asume un fluido tipo Hele-Shaw: el flujo es laminar y está en estado estacionario; no hay deslizamiento en la pared; los términos inerciales son despreciados; no existen cambios abruptos en el espesor que es mucho menor que las otras dimensiones de la pieza, el perfil de velocidad es plano, se desprecia el movimiento en la dirección del espesor.
- Los cambios de energía debidos a la contracción y expansión del fundido son despreciados, la conducción existe principalmente perpendicular a la dirección del flujo.
- El campo del flujo es simétrico relativo a la línea central de flujo: los perfiles de velocidad y temperatura a través del espesor son entonces simétricos.

2. Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo de fin de carrera es evaluar la incidencia que tienen las principales variables de inyección, en las propiedades mecánicas al impacto de piezas de polipropileno isotáctico con singularidades geométricas como las líneas de soldadura.

Del objetivo principal se desprende un objetivo secundario, el cual es la puesta a punto de un nuevo molde de inyección en la inyectora disponible en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de UNMdP a modo automático.

3. Procesamiento

3.1 Materiales utilizados

Se utilizó PP homopolímero, el mismo se obtuvo gracias al apoyo de la empresa PETROKEN, la cual donó los grados de polipropileno.

3.1.1 Índice de fluencia

Los valores según catálogo de PETROKEN del MFI del polipropileno, se muestra en la tabla 2.1

Material	Grado	Índice de fluencia (230°C 2.16 kg)
PP homopolímero	SM 6100	10.19 g/10 min

Tabla 2.1 grado comercial del polipropileno empleado para este proyecto

3.1.2 Calorimetría diferencial de barrido

Se realizó un análisis por calorimetría diferencial de barrido para determinar la temperatura de fusión del polipropileno. Para ello se empleó un DSC-50 SHIMADZU. Se programó una $T_{\text{máx}}$ de 210°C. Se utilizó una rampa de calentamiento de 10°C/min, bajo atmósfera de N_2 .

A continuación se muestra la correspondiente curva obtenida de la calorimetría y la temperatura de fusión del polipropileno.

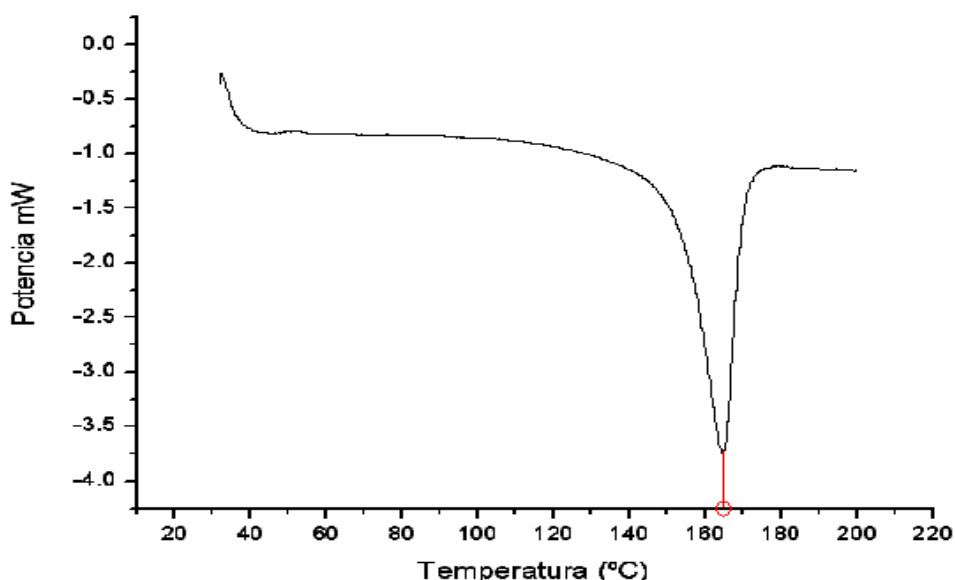


Figura 2.1. Curva de Calorimetría diferencial de barrido del polipropileno isotáctico utilizado.

- Temperatura de fusión polipropileno homopolímero isotáctico: 166 °C.

3.2 Equipamiento utilizado para el procesamiento

El procesamiento de las placas de polipropileno fue llevado a cabo en los laboratorios de INTEMA, Universidad Nacional de Mar del Plata. Las probetas formuladas para un posterior análisis al impacto fueron inyectadas en la inyectora Multiplas HM-10T, figura 2.2. Ésta máquina 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 22 cm³; su fuerza

máxima de cierre es de 100 kN y la máxima presión de inyección es de 1200 Bar.



Figura 2.2 Máquina inyectora Multiplas HM-10 Ton

Para controlar la temperatura de las paredes del molde se utilizó un atemperador de moldes MRT 2E 9°, figura 2.3. Éste puede ser utilizado tanto con agua como con aceite. Su potencia de calefacción es de 9 kW; la temperatura máxima a la que puede trabajar es de 200°C (con aceite) y posee una capacidad máxima de 60 lt/min. Para la atemperación del molde fue utilizado con agua.



Figura 2.3 Atemperador de moldes MTR 2E 9o

3.3 Molde

Se empleó un molde de coladas frías, de ataque directo, para la producción de placas para impacto. Mediante el mismo se pueden inyectar dos tipos de piezas: placas rectangulares con dos puntos de inyección paralelos y placas rectangulares con dos puntos de inyección en contraposición, puede observarse la placa móvil del molde en la Figura 2.4. Este molde que permite la inyección de dos tipos de piezas, lo hace de una a la vez. Es por ello que la colada cuenta con una pieza capaz de rotar 180° (Figura 2.5) y así conmutar la dirección del flujo para llenar la cavidad deseada. Ambas placas del molde poseen conductos de refrigeración de manera de poder llevarlas a una misma temperatura y que las condiciones de pared sean aproximadamente las mismas en todos los puntos de la superficie de la pieza. El molde cuenta con un sistema de extracción de placas por expulsión. La Figura 2.6 muestra la cara móvil del molde.



Figura 2.4. Placa móvil del molde



Figura 2.5. Pieza de conmutación y llave diseñada especialmente para la manipulación de ésta pieza.

3.4 Puesta a punto del sistema de inyección

3.4.1 Automatización del proceso

En el procesamiento industrial de polímeros mediante inyección las reglas del arte están bien definidas y los objetivos son claros: generar piezas que satisfagan los requerimientos correspondientes, en el menor tiempo y costo posibles. Para poder lograrlo, el fabricante ajusta los parámetros de procesamiento de la manera más conveniente para emplear la menor cantidad posible de material (por ejemplo, altas presiones de inyección general elevadas densidades lo cual implica una pérdida innecesaria de material en cada pieza) y lograr que el tiempo del ciclo de inyección sea el menor posible.

La puesta a punto de un sistema de inyección para producción industrial no conlleva grandes complicaciones y el procedimiento se encuentra casi estandarizado. Si la pieza fuese destinada al uso estructural o ingenieril, los recaudos durante la puesta a punto serían seguramente mayores y durante el proceso de inyección debería utilizarse un sistema de control "on-line" de la presión en la cavidad de moldeo así como los otros parámetros relevantes.

Para comenzar a realizar las corridas, primero se puso a punto el sistema de inyección siguiendo las reglas del arte utilizadas por la industria. Para ello, debe comenzarse operando la máquina en modo manual o semi-automático. La diferencia entre estos dos modos de operación reside en que el primero debe realizarse cada uno de los pasos (cierre del molde, avance del carro del tornillo, inyección, rechupe, retracción del carro del tornillo y apertura del molde) manualmente uno tras otro, mientras que en el segundo modo con dar la orden de comenzar el ciclo de inyección este es completado paso tras paso de manera automática; una vez retirada la pieza, cerrar la puerta de seguridad constituye la orden para que el sistema inicie un nuevo ciclo de inyección completo.

En esta primera etapa, se determinan las posiciones de comienzo y fin de la carrera del tornillo de manera de llenar parcialmente la cavidad de moldeo. Se ajusta la velocidad de rotación del tornillo, la cual varía según el tipo de material y las temperaturas que se hayan impuesto a través del barril; la velocidad de inyección y el valor de la contrapresión. Realizados estos ajustes, se pasa al modo automático, en donde la máquina produce una pieza tras otra sin interrupción alguna. Durante esta etapa lentamente se va aumentando la carrera del tornillo hasta lograr llenar por completo la cavidad del molde. Luego se procede a ajustar la presión de inyección y post-inyección de manera de lograr inyectar una pieza completa.

Para lograr que la máquina funcione en modo automático debió fijarse el carro del tornillo de la inyectora mediante sus posicionadores (ver Figura 2.6) y establecerse un tiempo de ciclo mayor a la suma de los tiempos de cada una de las etapas del proceso (cierre del molde, inyección, enfriamiento, apertura del molde). En caso de algún retardo en el proceso, al superarse el tiempo de ciclo instantáneamente la máquina detecta un error y detiene su funcionamiento. Del mismo modo, debieron programarse otros tantos factores de control (posición máxima y mínima del tornillo, tiempo máximo de inyección, etc.) que advierten al usuario sobre algún problema y detienen el funcionamiento automático de la máquina.



Figura 2.6. Posición final de avance del carro y posición final de retracción del carro.

Lograr un satisfactorio funcionamiento del modo automático fue fundamental para el posterior procesamiento de las piezas de este proyecto.

3.4.2 Limitaciones del sistema de cierre

El problema de la inyectora utilizada reside en su baja capacidad de cierre (10 Ton) en relación a la elevada superficie de las dos piezas (coladas paralelas y coladas en contraposición) a inyectar. Durante el proceso de inyección el molde recibe dos fuerzas: la fuerza de cierre generada por el sistema hidráulico de la máquina y la fuerza debido a la presión del fundido que ingresa en la cavidad. Ésta última tenderá a abrir el molde y la fuerza de cierre, cuyo valor máximo es de 10 Ton, es la encargada de mantener la cavidad de moldeo cerrada. Por lo tanto, la fuerza de cierre debería ser mayor a:

$$F_{\text{cierre}} > \text{Área proyectada} \cdot P_{\text{inyección}}$$

Vale aclarar, que si bien las piezas finales son idénticas en cuanto a su tamaño, la superficie proyectada sobre el molde es mayor para las probetas con los dos puntos de inyección en contraposición. Esto ocurre debido a que la cavidad de moldeo para la producción de piezas con líneas de soldadura frías tiene otra configuración de los canales de inyección, los cuales son mucho más largos e intrincados para este caso.

En la Figura 2.7, se puede observar la diferencia mencionada en el párrafo anterior.

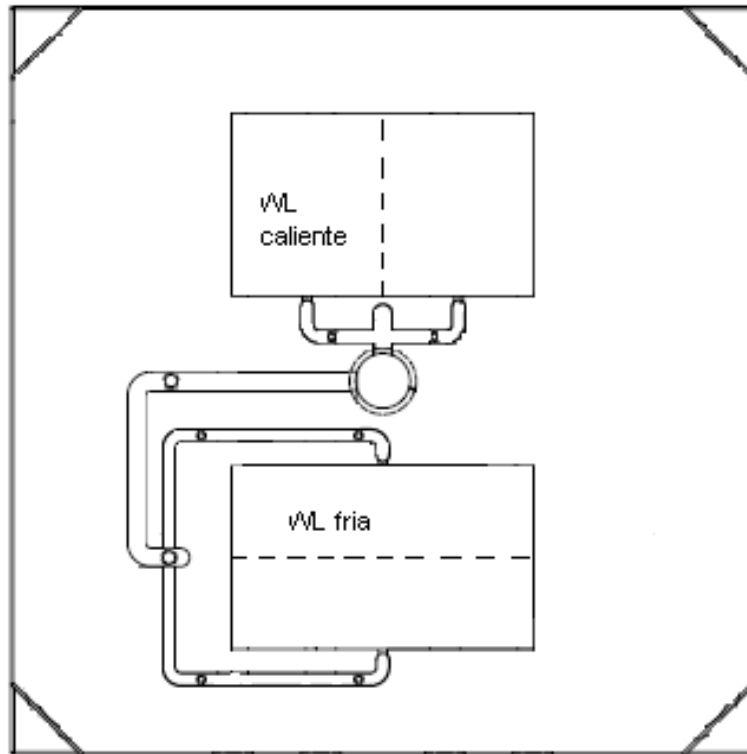


Figura 2.7. Área proyectada de las cavidades de moldeo.

De esta forma se puede calcular cuál es la máxima presión de inyección que puede utilizarse para cada tipo de pieza, con la fuerza de cierre al máximo de su capacidad:

- Coladas en paralelo:

$$P_{inyección} < F_{cierre}^{MAX} / \text{Área proyectada}$$

$$P_{inyección} < 10000 \text{ kgf} / 60,7 \text{ cm}^2$$

$$P_{inyección} < 164,6 \text{ kgf} / \text{cm}^2$$

- Coladas en contraposición:

$$P_{inyección} < F_{cierre}^{MAX} / \text{Área proyectada}$$

$$P_{inyección} < 10000 \text{ kgf} / 77,4 \text{ cm}^2$$

$$P_{inyección} < 129,2 \text{ kgf} / \text{cm}^2$$

La máxima presión de inyección que puede generar la máquina es de 1200Bar (1223,64 kgf/cm²) y por lo tanto, exigiendo el sistema de cierre al máximo de su capacidad, solo podrá trabajarse con presiones de inyección menores a:

- Coladas en paralelo: Presiones menores al 14% de la capacidad máxima.
- Coladas en contraposición: Presiones menores al 10% de la capacidad máxima.

Es importante mencionar que éstos son valores teóricos, y que durante la puesta a punto del conjunto molde-inyectora se pudo elevar la presión de inyección del primer caso (coladas en paralelo) hasta valores cercanos al 31%, debido probablemente a que la capacidad de cierre indicada por el fabricante sea un valor con cierto coeficiente de seguridad.

En caso de utilizar presiones de inyección mayores el material puede escapar de la cavidad de moldeo generando un rebalse o “flashing”, Figura 2.8. Por otro lado, para cada condición de moldeo habrá una presión de inyección umbral por debajo de la cual el fundido no logre llenar la cavidad de moldeo por completo, este fenómeno se denomina “short shot”. Figura 2.9.



Figura 2.8. Pieza con flashing.



Figura 2.9. Pieza con short shot.

Con respecto al segundo caso (coladas en contraposición), utilizando una presión similar a la utilizada en la práctica para las piezas anteriores (coladas en paralelo, 31%), se observó que no se llegó a llenar completamente la cavidad del molde. Esto ocurre debido a que se produce mucho flashing en los canales de inyección (el material que debería llenar el molde se encuentra fuera de la cavidad de moldeo formando rebabas), Figura 2.10.a). Debido a lo mencionado, se decidió disminuir abruptamente la presión de inyección (15%), dando como resultado lo que se puede observar en la Figura 2.10.b). Si bien ya no se producía flashing, no se logró llenar la cavidad de moldeo (short shot). Se decidió aumentar la presión de inyección a un valor intermedio de las establecidas en los casos anteriores (20%). Como puede apreciarse en la Figura 2.10.c), no se logró llenar el molde por completo y nuevamente se produjo flashing en la sección de los canales de inyección (bastante menos debido a que la presión de inyección es bastante menor también). Cabe destacar que se muestran los casos representativos, puesto a que se variaron otras condiciones como: temperatura del fundido y velocidad de inyección, sin obtenerse resultados que disten de los ilustrados en la Figura 2.10. Se debe tener en cuenta que, además del hecho de que el área proyectada de esta pieza es mayor que la correspondiente a la primera, el camino que recorre el polímero por los canales de inyección es más intrincado y largo, Figura 2.7. Por lo tanto, se producen mayores pérdidas por fricción y por carga. Finalmente, esto se traduce en un aumento en la presión de inyección para la obtención de una pieza completa.



a)



b)



c)

Figura 2.10 a) Presión del 31%; b) Presión del 15%; c) Presión del 20%.

Se llegó a la conclusión de que la variable mas importante para el buen desempeño del sistema molde2-inyectora, en este caso particular, es la presión de inyección. Debido a las limitaciones del sistema de cierre de la máquina se concluyó que, para lograr inyectar piezas de buena calidad, es necesario hacer modificaciones en la geometría del molde, como por ejemplo podría ser aumentar el diámetro de las coladas, cambiar la configuración de los canales de inyección, etc.

3.4.3 Limitaciones en la capacidad de llenado del tornillo

En varias de las corridas, bajo las mismas condiciones de inyección, se observó que había ciertas “fluctuaciones” en cuanto a la apariencia de la pieza final. Si bien la máquina presenta un período “inercial” en el que se adapta a las

nuevas variables de inyección, concluido el mismo, se pudo ver que algunas pocas piezas intercaladas presentaban short short. Al mismo tiempo, se escuchaba un sonido extraño, a medida que el tornillo iba siguiendo su carrera. Se relacionó este comportamiento a que el conjunto de la pieza-canales de inyección utiliza gran cantidad de material. De esta forma, todo el sólido que es fundido en un ciclo, es utilizado en ese mismo ciclo para llenar la cavidad de moldeo. Entonces, ocurrió que en algunas piezas no se llegaba a llenar del toda la cavidad por la ausencia de material fundido. Y el ruido provenía justamente del sólido, que chocaba contra la camisa.

En el caso del molde con las dos coladas en contraposición, el problema se acentúa debido a que los canales de inyección son bastante más largos que los utilizados para el molde con los puntos de inyección paralelos, por lo cual la cantidad necesaria de material es mayor. En la Figura 2.11 se puede observar la diferencia de tamaños que existe entre un canal y otro.



Figura 2.11. A la derecha canal de inyección de la placa con dos puntos de inyección en paralelo, a la izquierda canal de inyección de la placa con dos puntos de inyección en contraposición

3.4.4 Ubicación de las líneas de soldadura

Durante la puesta a punto del sistema se observó que la línea de soldadura se encontraba desplazada hacia la derecha con respecto a la zona central de la pieza. Debido a la importancia que radica obtener probetas simétricas para su posterior análisis al impacto, se modificó la geometría del molde hasta conseguir el resultado buscado (ubicar la línea en la región del centro de la probeta). Se trabajó a temperaturas bajas debido a que tanto las líneas de flujo, como las líneas de soldadura se visualizan mejor. Se modificaron los diámetros de las coladas hasta lograr ubicar la línea donde era deseado. La metodología realizada fue a modo de prueba y error, a medida que se fue inyectando se fue observando la ubicación de la misma y en función a esto último se variaron los diámetros (a ojo) de las coladas.

3.5 Condiciones de operación

Se realizó un barrido sistemático con las variables del proceso de inyección que mas afectan el comportamiento mecánico, tanto de las líneas de soldadura como del material en bulk, según recomendaciones de la bibliografía.

Las mismas son:

- Presión de inyección
- Presión de “holding”
- Temperatura del fundido y
- Velocidad de inyección.

Se modificaron individualmente, dejando el resto de las variables constantes y se procedió a elegir, para cada caso, una ventana de procesamiento. El criterio utilizado para el descarte de las probetas se basó en su inspección visual. Se eliminaron aquellas que presentaron: alabeo superficial, flashing, short shot y burbujas. Con un cierto margen de tolerancia, esto es, las probetas que presentaban poco flashing y alabeo superficial no se descartaron, se puede observar en la Figura 2.12 el criterio empleado.



a)



b)



c)



d)

Figura 2.12. Piezas que presentan una calidad en apariencia no admisible para su posterior ensayo;a) contracción diferencial y flashing en los canales de inyección;b) mucha contracción diferencial;c) flashing excesivo; d) aire ocluido

3.5.1 Barrido en la Presión de inyección

Se partió de la condición obtenida (condición número 5 de la tabla) en la puesta a punto del sistema molde-inyectora y se varió la presión de inyección dejando el resto de las variables constantes.

A continuación se puede observar en la Tabla 2.5 los valores que adoptan las variables para cada condición de inyección:

Condición	1	2	3	4	5	6	7
Tiempo de holding (s)	10	10	10	10	10	10	10
Tiempo de inyección (s)	1	1	1	1	1	1	1
Velocidad de inyección	55	55	55	55	55	55	55
Temperatura del fundido (°C)	200	200	200	200	200	200	200
Temperatura del molde (°C)	25	25	25	25	25	25	25
Presión de "holding" (bar)	19	24	26	28	30	32	34
Presión de inyección (bar)	20	25	27	29	31	33	35

Tabla 2.5 Valores que adoptan las variables para cada las distintas condiciones de inyección (barrido en presión de inyección)

En este caso, se debió tener especial cuidado con la presión de "holding" puesto que ésta no debe ser mayor que la presión de inyección. Si la primera supera a la segunda se producirá "flashing" en las piezas. Este fenómeno ocurre debido a que una vez que el molde está lleno, no hay que llenar espacios vacíos con el polímero fundido, solo hay que evitar el rechupe y esto se logra con una pequeña presión. Por lo tanto, a medida que se disminuyó la Presión de inyección a valores menores que la Presión de "holding", se disminuyó ésta última de la misma manera que la primera.

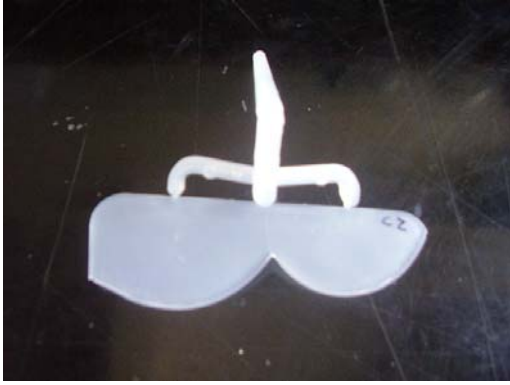


Figura 2.13. a) Presión de inyección 20%

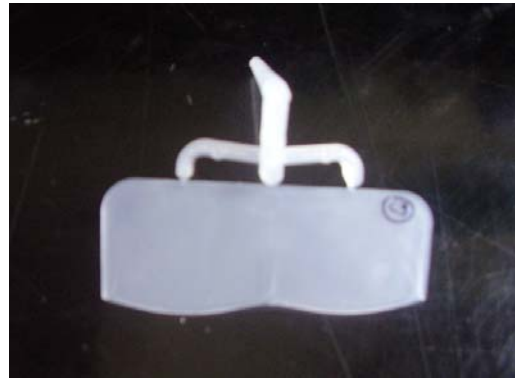


Figura 2.13. b) Presión de inyección 25%.



Figura 2.13. c) Presión de inyección 27%.



Figura 2.13. d) Presión de inyección 29%.



Figura 2.13. d) Presión de inyección 31%.



Figura 2.13. e) Presión de inyección 33%.



Figura 2.13. f) Presión de inyección 33%.

Se puede observar a ojo desnudo que variando la presión de inyección, varía la calidad de la pieza final. A presiones muy bajas como en el caso de las condiciones 1 y 2 el polímero fundido no fue capaz de llenar la cavidad del molde. Se produjo un fenómeno denominado “short shot”. Esto se puede apreciar en las Figura 2.13 a) y b). Con respecto a la condición número 3, si bien se logró inyectar una pieza completa, se puede observar en la Figura 2.13 c) que la misma presenta contracción diferencial en su superficie. En caso de moldear un producto para la industria las condiciones hasta aquí citadas serían inadmisibles. Para evaluar la incidencia, que tienen las variables de inyección en el comportamiento al impacto, se decidió utilizar algunas de las probetas que pertenecen a la condición número 3 (las que cumplen el criterio establecido). En el otro extremo, cuando las presiones de inyección son altas (condiciones 6 y 7), se puede observar en las Figura 2.13 d) y e) que las mismas presentan “flashing”, como era de esperarse, puesto que a mayor presión de inyección mayor es la fuerza contraria a la de cierre del molde y entonces, mayor la probabilidad que se produzcan rebabas en la pieza final. Sin embargo, la terminación superficial de los productos finales resultó buena, a pesar del fenómeno de “flashing” presente. Por lo tanto, no fueron descartadas para luego ser ensayadas.

En todos los casos se pueden observar las líneas de flujo, producidas por el polímero fundido, a medida que llena la cavidad del molde. Esto se atribuye a la baja temperatura utilizada.

Se descartaron aquellas piezas que no presentaron los requisitos mínimos establecidos por su apariencia. Y se decidió trabajar en un rango del 27%-34% para ensayar al impacto.

3.5.2 Barrido en la Temperatura del fundido

Se partió de la condición número uno de la tabla 2.6 y se varió la temperatura, manteniendo el resto de las variables constantes.

Condición	1	2	3
Tiempo de holding (s)	10	10	10
Tiempo de inyección (s)	1	1	1
Velocidad de inyección	55	55	55
Temperatura del fundido (°C)	210	220	230
Temperatura del molde (°C)	25	25	25
Presión de “holding” (bar)	30	30	30
Presión de inyección (bar)	31	31	31

Tabla 2.6 Valores que adoptan las variables para cada las distintas condiciones de inyección (barrido en la temperatura del fundido)

En este caso, se produjo flashing y contracción diferencial en la mayoría de las piezas inyectadas, Figura 2.14. A pesar de ello, las probetas obtenidas bajo estas condiciones fueron utilizadas para ver la incidencia del cambio de temperatura sobre el comportamiento al impacto, puesto que las mismas entraban en el rango de tolerancia establecido. En el extremo de temperatura más alta, es decir en la condición número 3, sumado al fenómeno de “flashing” producido en todas las condiciones se observó, en la mayoría de las piezas, la presencia de aire ocluido y burbujas, Figura 2.14 d). Estos defectos no solo hacen que la pieza presente una calidad estética desfavorable, sino que también actúan como concentradores de tensiones cuando el componente en servicio es solicitado

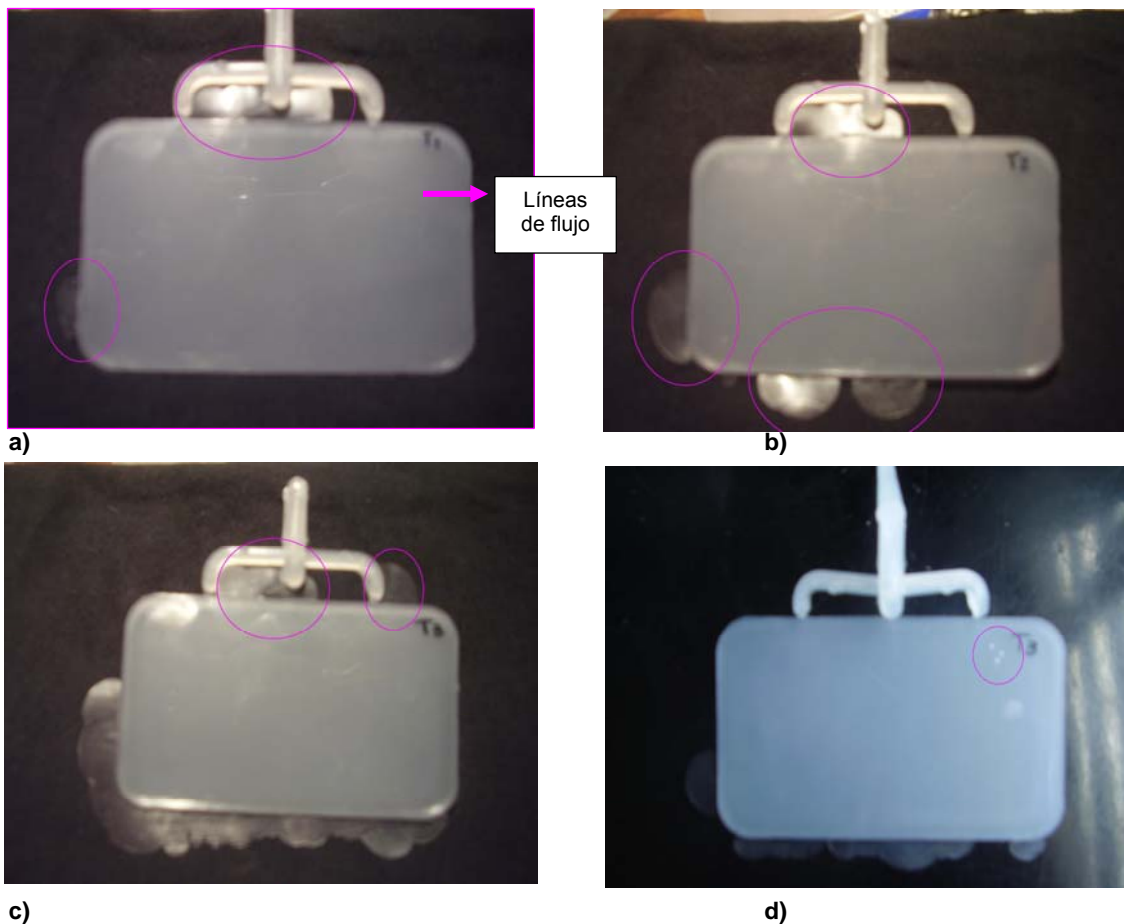


Figura 2.14, a) Condición 1; b) Condición 2; c) Condición 3; d) Condición 3 pieza con aire ocluido.

Se observó que las líneas de flujo presentes hasta el momento iban desapareciendo al ir aumentando la temperatura del fundido, hasta llegar a un máximo de transparencia a los 230°C. No se continuó incrementando la temperatura debido a que la ventana térmica de procesamiento del polipropileno homopolímero es angosta.

3.5.3 Barrido en la presión de holding

Se partió de la **Condición 1** que se presenta a continuación y se modificó la presión de “holding”, manteniendo todas las otras variables constantes.

Condición	1	21	3	4
Tiempo de holding (s)	15	15	15	15
Tiempo de inyección (s)	1	1	1	1
Velocidad de inyección	55	55	55	55
Temperatura del fundido (°C)	230	230	230	230
Temperatura del molde (°C)	40	40	40	40
Presión de "holding" (bar)	21	20	18	15
Presión de inyección (bar)	22	22	22	22

Tabla 2.7 Valores que adoptan las variables para cada las distintas condiciones de inyección (barrido en presión de "holding")

Se utilizó este rango de presiones puesto a que por debajo de los 15% las piezas presentaban mucho alabeo superficial y por encima de los 21 se producía flashing excesivo.

A continuación se presentan fotos de las probetas inyectadas bajo estas condiciones:



a)



b)



c)



d)

Figura 2.15. a) Condición número 1; b) Condición número 2;c) Condición número 3;d) Condición número 4

Como se puede observar, a medida que la presión de holding disminuye, la contracción diferencial se hace cada vez más notoria. Aquí se demuestra que la presión de holding es uno de los parámetros que más está relacionado con la apariencia de la pieza final.

3.5.4 Barrido en la velocidad de inyección

Se partió de la condición 1 indicada en la tabla 2.5 y se varió la velocidad de inyección, dejando todos los demás parámetros constantes.

Condición	1	2	3	4	5
Tiempo de holding (s)	15	15	15	15	15
Tiempo de inyección (s)	1	1	1	1	1
Velocidad de inyección	45	50	60	65	70
Temperatura del fundido (°C)	230	230	230	230	230
Temperatura del molde (°C)	40	40	40	40	40
Presión de "holding" (bar)	21	21	21	21	21
Presión de inyección (bar)	22	22	22	22	22

Tabla 2.5 Valores que adoptan las variables para cada las distintas condiciones de inyección (barrido en la velocidad de inyección)

Las piezas obtenidas bajo las distintas condiciones citadas anteriormente se muestran a continuación:



a)



b)



c)



d)



e)

Figura 2.16. a) Condición 1; b) Condición 2; c) Condición 3; d) Condición 4; e) Condición 5.

Como se puede observar en la Figura 2.16, la calidad de la superficie de las piezas no varió en gran medida al modificar la velocidad de inyección. Para la mayoría de las condiciones se obtuvieron piezas similares en cuanto a su aspecto, con la excepción de la condición 1. En esta última condición se notó un marcado desmejoramiento en la calidad superficial, que es la condición de menor velocidad. A menor velocidad de inyección, y a un mismo tiempo de llenado de la cavidad de moldeo, menor es el material fundido que ingresa.

Conclusión

Tomando como criterio la apariencia de todas las piezas inyectadas se llegó a la conclusión de que la condición más satisfactoria es la siguiente:

- Tiempo de “holding”: 15 segundos.
- Tiempo de inyección: 1 segundo.
- Velocidad de inyección: 55%.
- Temperatura del fundido: 230°C.
- Temperatura del molde: 40°C.
- Presión de “holding”: 21% de 1200 bar.
- Presión de inyección: 22% de 1200 bar.

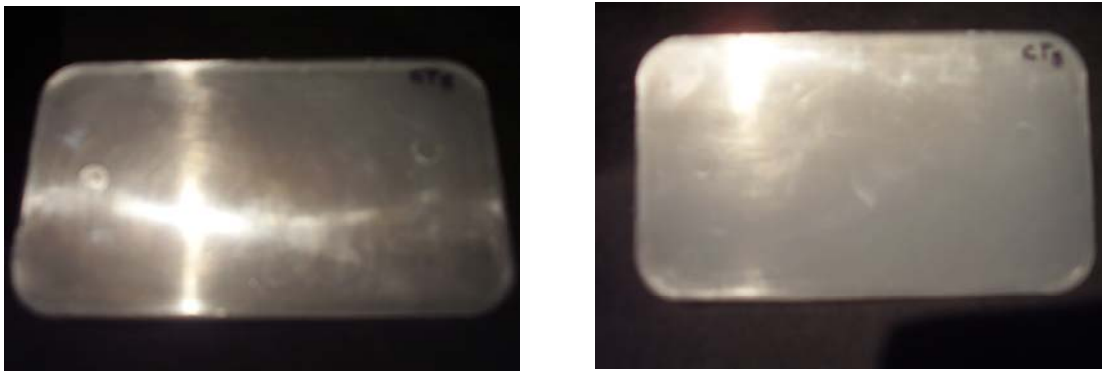


Figura 2.17. Condición óptima

Las piezas no presentan rebabas y tiene un acabado superficial de buena calidad. Por otra parte, se puede observar además que no se ven ni las líneas de flujo ni las líneas de soldadura.

4. Simulación

Se realizó la simulación de llenado del molde para evaluar la capacidad predictiva del *MOLDFLOW Plastics Insight 5.0*.

Los parámetros establecidos en la simulación fueron los siguientes:

Tiempo de inyección: 1 segundo.
Tiempo de “holding”: 15 segundos.
Tiempo de enfriamiento: 4 segundos.
Tiempo total para un ciclo: 20 segundos.
Temperatura de inyección: 230°.
Temperatura del molde: 40°C.
Temperatura canales de enfriamiento: 40°C

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

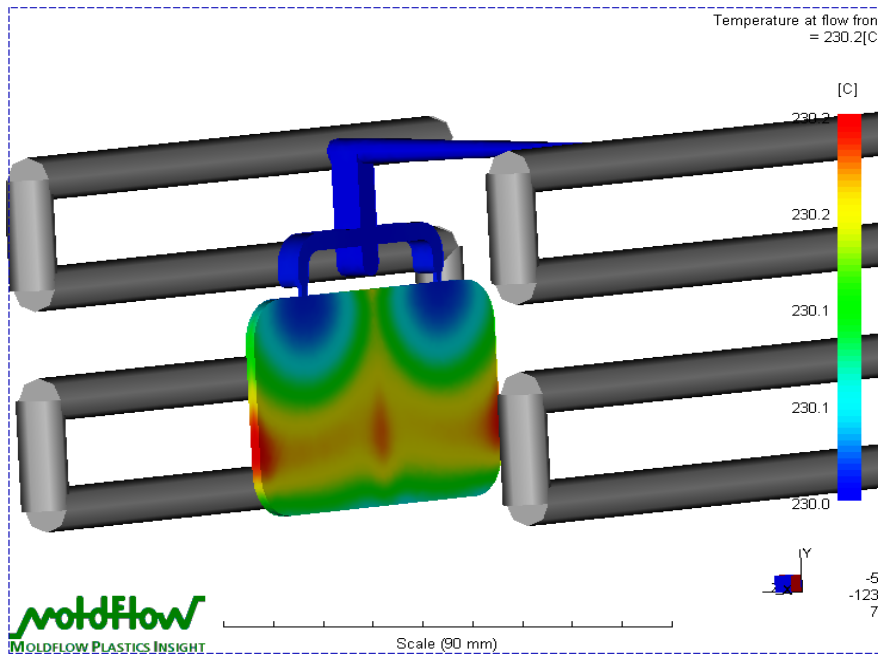


Figura 3.1. Temperatura en el frente de flujo

En la figura anterior (Figura 3.1) se puede observar que los frentes de flujo avanzan con la misma temperatura en todo su recorrido con una diferencia máxima de 0,2°C.

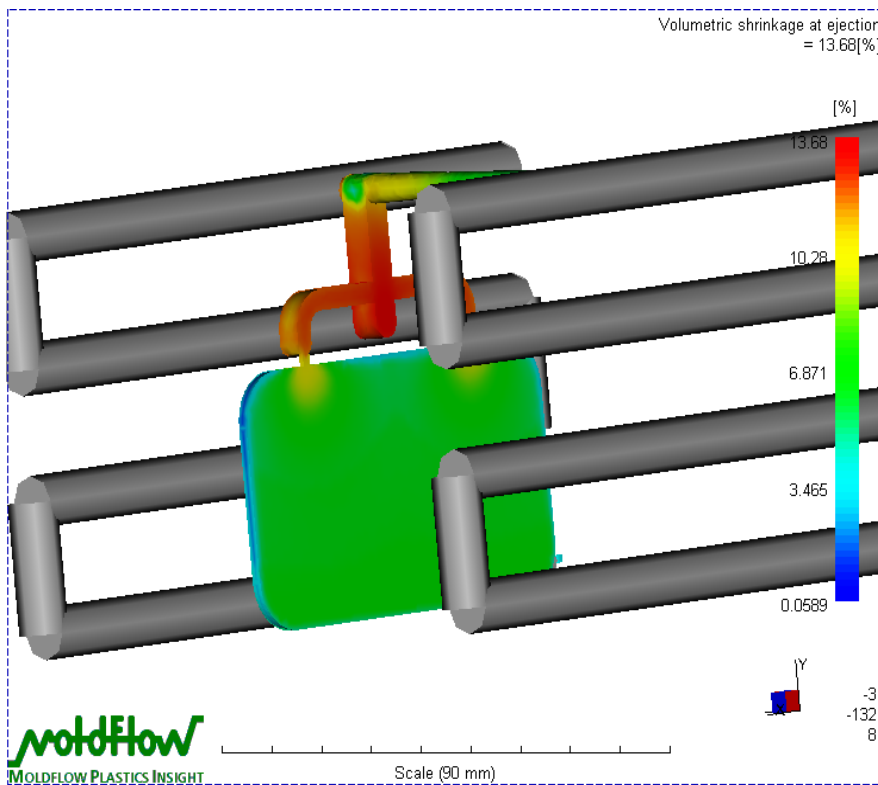


Figura 3.2 Contracción volumétrica en la eyección.

Con respecto al análisis de la contracción diferencial, se puede ver que no se generan gradientes de contracción ni en las caras planas del producto final ni a lo largo de su espesor, Figura 3.2. Debido a la distribución homogénea de la contracción se deduce que la pieza no presentará alabeos ni contracción diferencial y su acabado superficial será de una buena calidad, como ocurre en la práctica. La contracción predicha por el software es del tipo isotrópica, es decir, la misma para los tres ejes de simetría principales. Entonces si la contracción global es del 6 %, la contracción en cada una de las direcciones del espacio es menor al 2%. Es decir, que para la dimensión de la pieza mas grande (que es de 10 mm) la diferencia producida por la contracción es menor a 2 mm, el cual es un número razonable para este tipo de polímero, debido a que es altamente cristalizable.

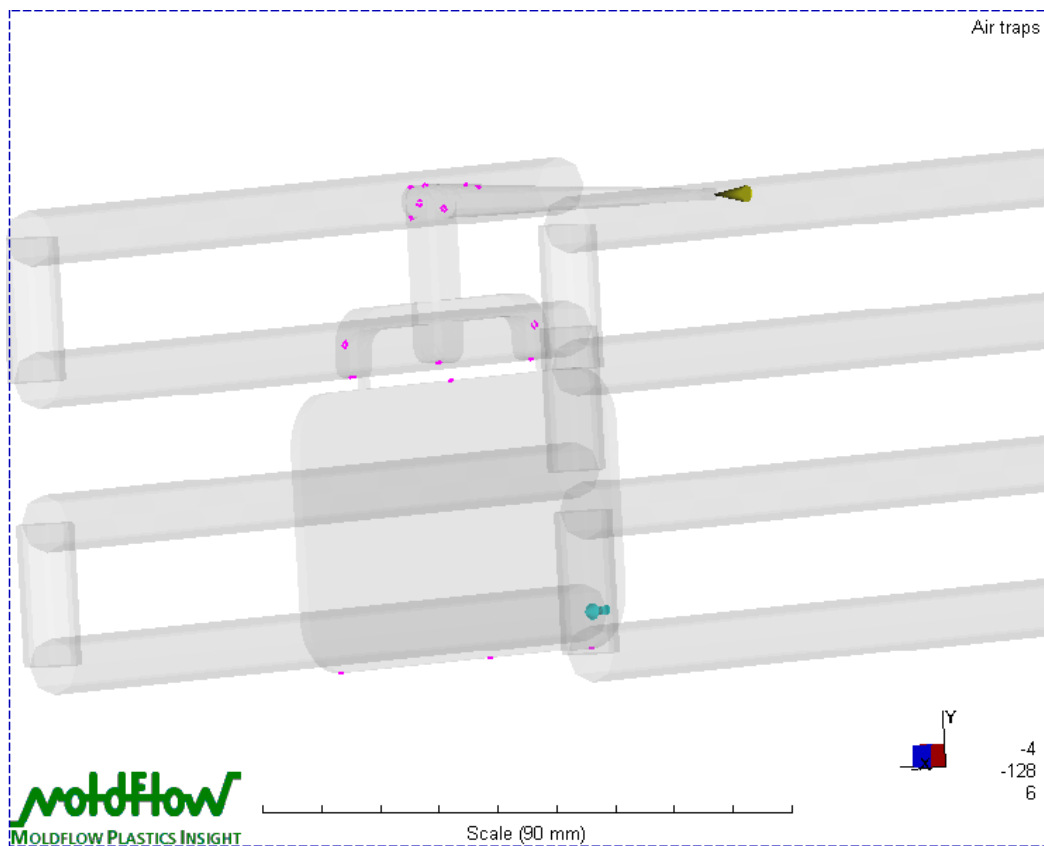


Figura 3.3 Aire atrapado.

En la Figura 3.3, se puede observar cómo es el patrón de aire ocluido en la pieza. El mismo es similar al obtenido en la práctica. Se pueden observar las burbujas producidas principalmente en los canales de inyección, mientras que no se observaron burbujas en la placa como lo predicho por el software

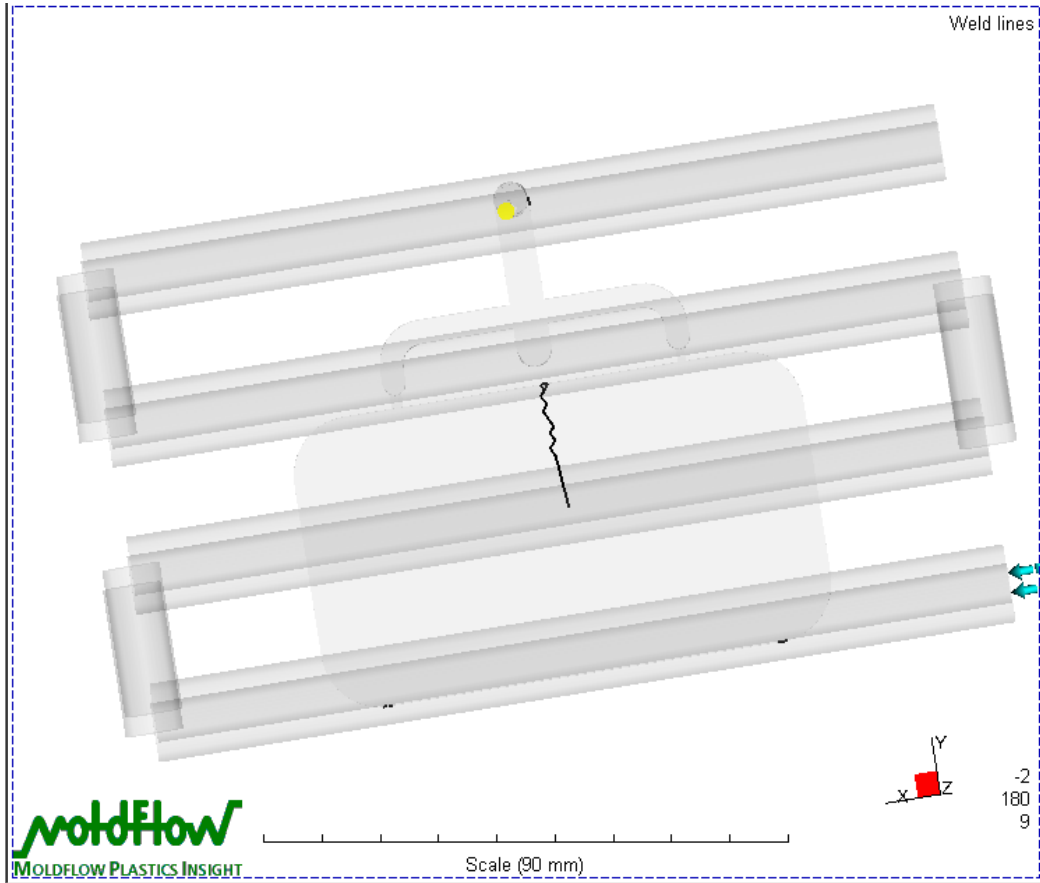


Figura 3.4 Línea de soldadura

En la Figura 3.4 se puede ver que la línea de soldadura se ubica en una zona central de la probeta igual que en el caso de la pieza inyectada en la práctica.

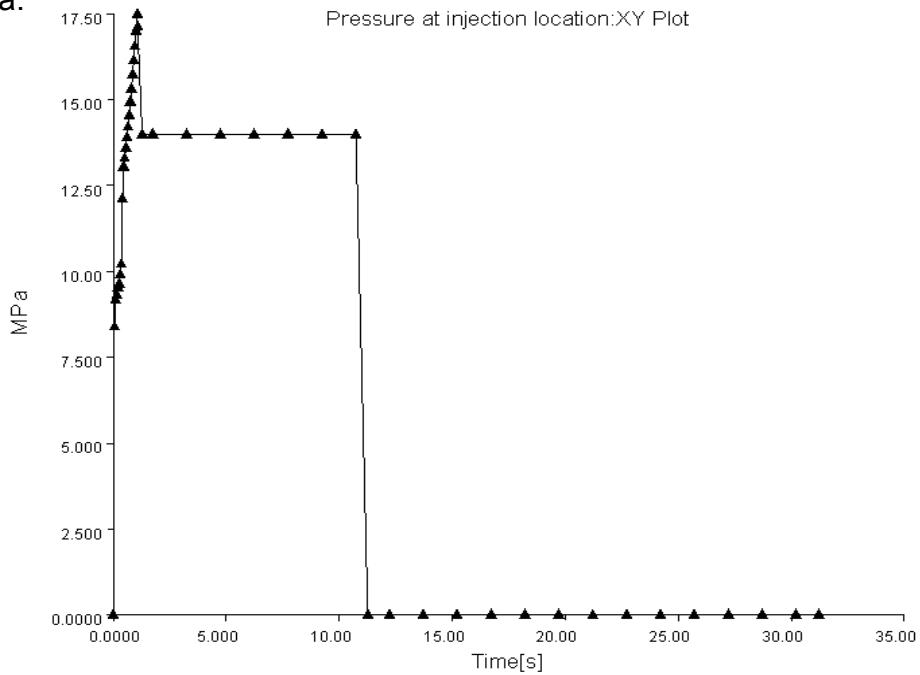


Figura 3.5 Presión de inyección vs. Tiempo de inyección

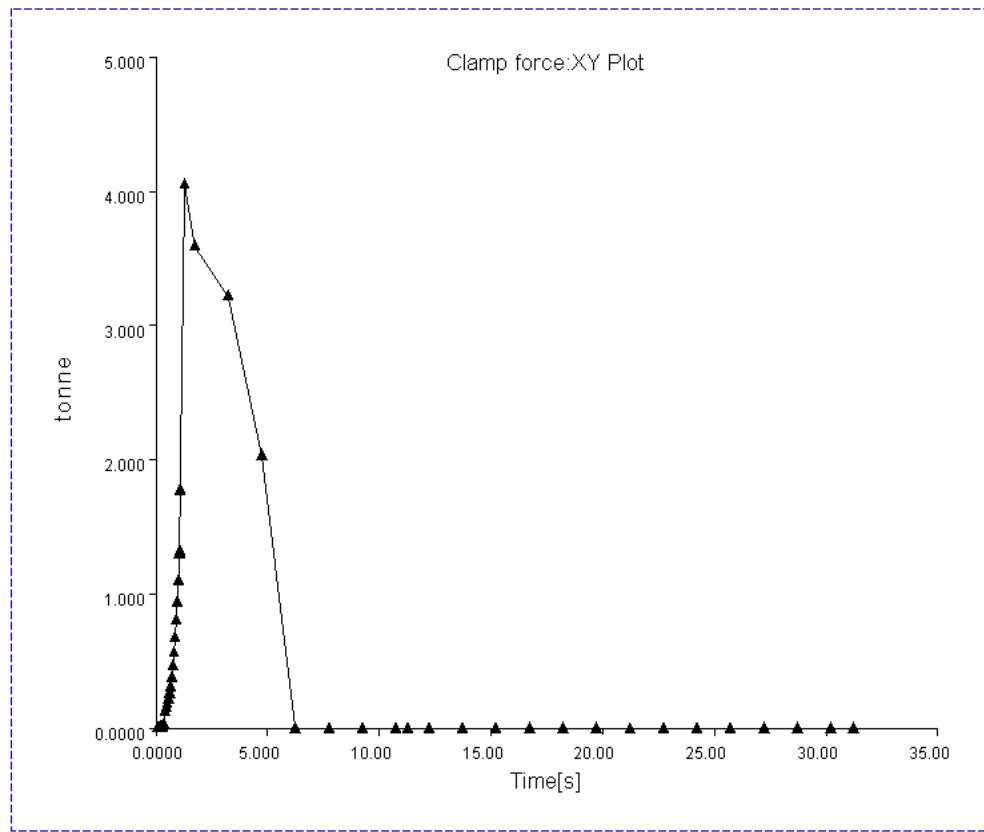


Figura 3.6 Fuerza de cierre vs. Tiempo de inyección.

La Figura 3.5 representa la presión en el punto de inyección vs. el tiempo de inyección. Se observa un ciclo típico, en el cual en un principio la presión aumenta hasta un máximo donde la cavidad de moldeo ha sido completamente llenada, luego disminuye hasta la presión de “holding”, la cual permanece constante por un tiempo determinado y luego vuelve a disminuir hasta caer a cero. La presión utilizada, en el caso real para estas mismas condiciones que se establecieron en el software, fue de 26,4 MPa, con la fuerza de cierre al máximo de su capacidad, es decir, 10Ton. La presión máxima predicha por el programa fue de 17,5 MPa, en combinación con una fuerza de cierre bastante menor que la utilizada en la realidad de 5Ton. Debido a esta diferencia notable entre la presión de la simulación y la real, y debido a no tener piezas inyectadas bajo las condiciones recomendadas por el software (no se bajó de 26,4 MPa a la temperatura de 230°C), se decidió realizar otra corrida. La misma se llevó a cabo a la temperatura, donde se realizó el barrido en la presión de inyección (200°C).

Los parámetros establecidos en la segunda simulación fueron los siguientes:

- Tiempo de inyección: 1 segundo.

- Tiempo de “holding”: 15 segundos.
- Tiempo de enfriamiento: 4 segundos.
- Tiempo total para un ciclo: 20 segundos.
- Temperatura de inyección: 200°.
- Temperatura del molde: 25°C.
- Temperatura canales de enfriamiento: 25°C.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la presión de inyección y la fuerza de cierre, Figura 3.7 y 3.8 respectivamente. Los resultados relacionados con el perfil de temperatura del fundido, contracción volumétrica, aire atrapado y línea de soldadura son similares y pueden observarse en el anexo del presente proyecto final.

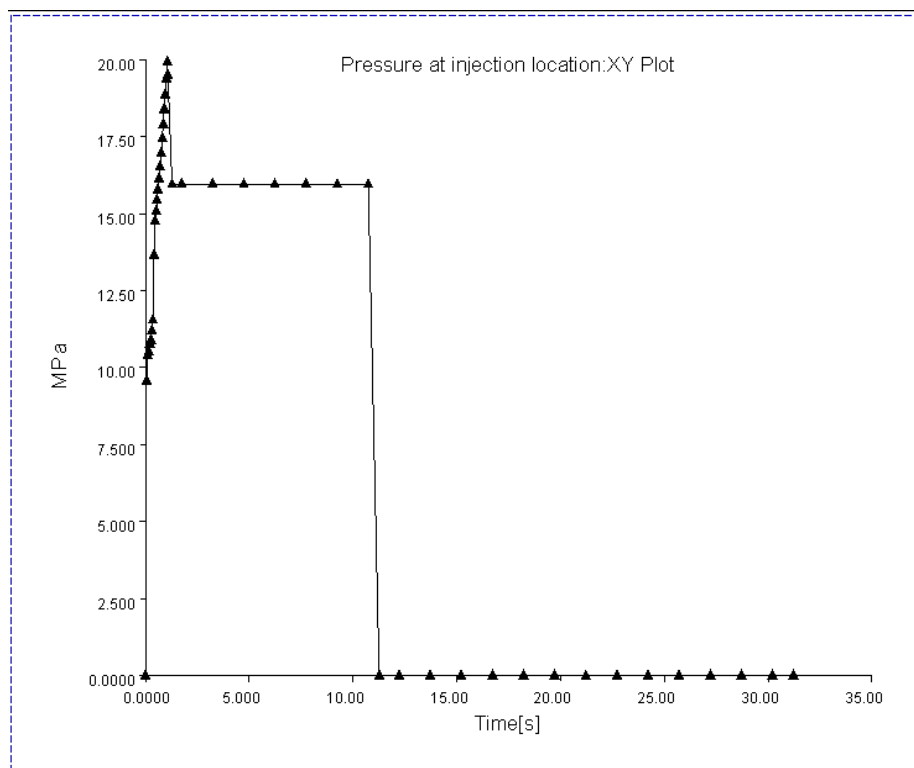


Figura 3.7. Presión de inyección vs. Tiempo de inyección simulación 2.

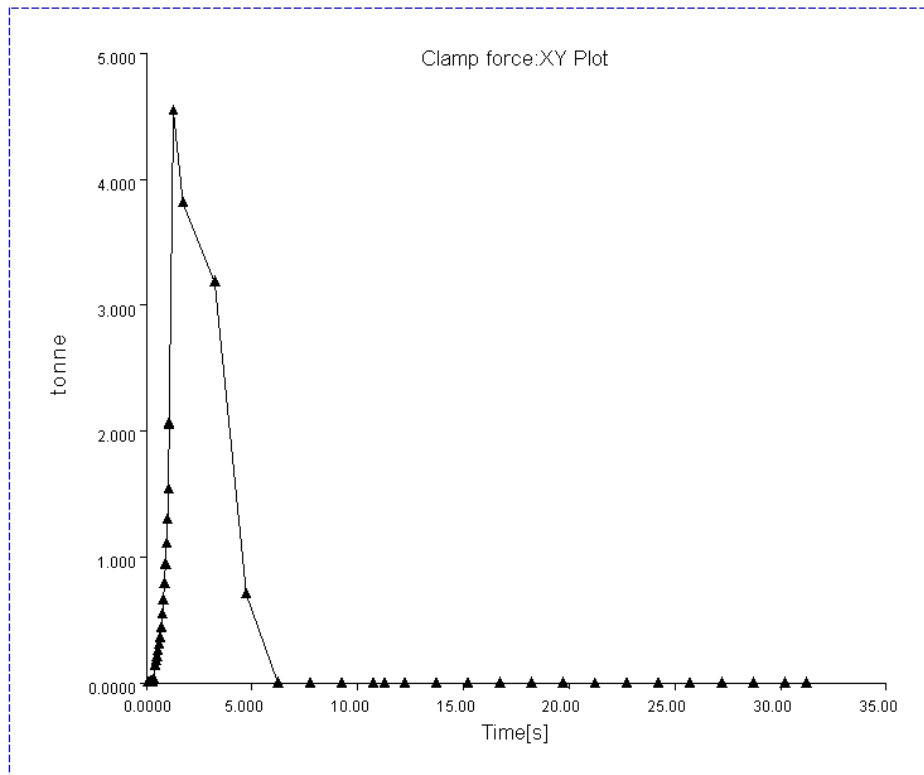


Figura 3.8. Fuerza de cierre vs. Tiempo de inyección simulación 2.

Como se puede observar de la curva de Presión de inyección y de la de fuerza de cierre vs. tiempo de inyección, Figura 3.7 y 3.8, los resultados no distan demasiado de los obtenidos en la simulación anterior (con un $\Delta T_{\text{fundido}}=30^{\circ}\text{C}$ y un $\Delta T_{\text{molde}}=15^{\circ}\text{C}$). La presión máxima predicha por el software es de aproximadamente 20 MPa, con una fuerza de cierre de 5 Ton. La presión de inyección utilizada en la práctica, para las mismas condiciones que se establecieron en la segunda simulación, fue de 37.2 MPa. Y la mínima presión utilizada a esa temperatura fue de 24 MPa, obteniendo piezas que sufren Short Shot. Como se puede notar, si con una presión 4 unidades mayor que la predicha por el software no se llega a completar ni la mitad de la cavidad de moldeo, Figura 2.13.a), entonces se debe tener especial cuidado en el uso de los simuladores. Las diferencias que se produjeron entre la simulación y la práctica pueden deberse básicamente a tres factores principales:

- Las propiedades y parámetros del polímero utilizado en la simulación son distintos que los del polímero real
- La inyectora trabaja con control por velocidad de inyección y luego en algún momento del ciclo cambia a control por presión de inyección y esto no ocurre de la misma manera (en el mismo tiempo del ciclo) que en la simulación.
- Por último, puede ocurrir que la malla resuelta para la pieza no sea la adecuada.

Para descartar la tercera hipótesis se realizó un análisis de convergencia reduciendo el tamaño de la malla utilizada a la mitad para ver si se producía alguna diferencia significativa. A continuación se presentan las curvas obtenidas a partir de la simulación:

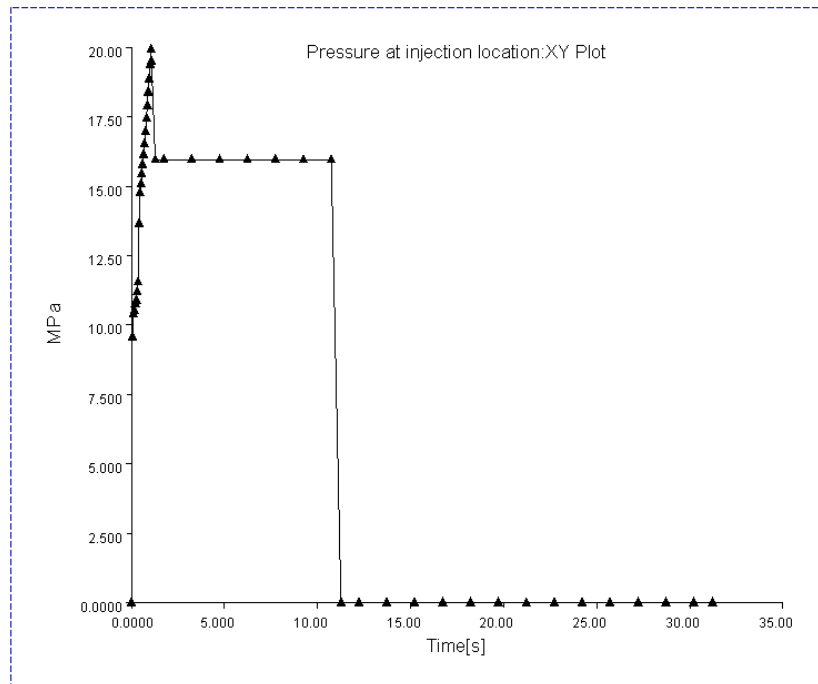


Figura 3.11. Fuerza de cierre vs. tiempo de inyección para la simulación 3.

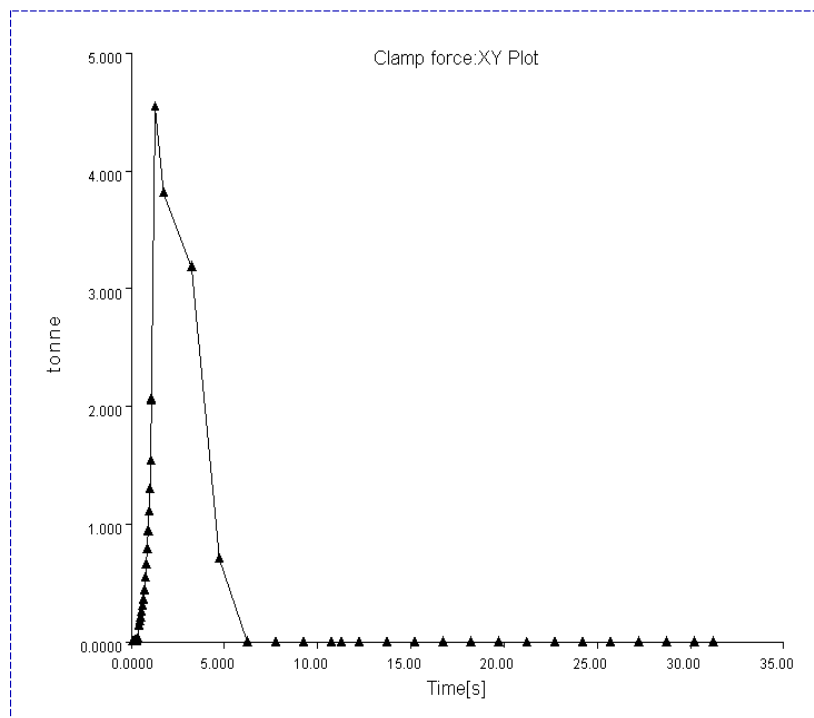


Figura 3.11. Fuerza de cierre vs. tiempo de inyección para la simulación 3.

Como se puede observar en las Figuras 3.10 y 3.11 respectivamente, ni la presión de inyección ni la fuerza de cierre sufrieron cambios significativos. Por lo tanto se descartó que el mallado haya inducido algún tipo de error.

5. Caracterización mecánica al impacto

5.1 Descripción del ensayo y el equipamiento

Se analizó la respuesta en impacto de las placas de polipropileno homopolímero inyectadas. Esto se llevó a cabo a través de ensayos de impacto instrumentado de dardo sobre disco (ASTM 3763-93).

Para la realización de este ensayo se empleó una máquina de Impacto instrumentado Fractovis Ceast (falling weight), Figura 4.1.a), que adquiere datos a través de un D.A.S. 4000. Se empleó el soporte para discos que se muestra en la Figura 4.1.b), el cual retiene empotrado al disco durante su ensayo. El diámetro interno del soporte es de 40 mm. El impactador utilizado fue de tipo dardo, el cual posee una punta semiesférica que solo hace contacto con la probeta en un punto. Los parámetros empleados durante los ensayos se muestran en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor utilizado
Masa	20 Kg
Velocidad de impacto	1
Tiempo de muestreo	$1 \cdot 10^{-3}$ ms

Tabla 4.1. Parámetros utilizados en el ensayo

A partir del ensayo de disco se obtiene la energía de perforación específica, por integración numérica de las curvas carga-desplazamiento del registro. Dado que el espesor de las piezas es constante, se relevarán los valores de energía absorbida únicamente, tanto para la línea como para el material en bulk.

Las piezas obtenidas mediante el proceso de moldeo por inyección presentan microestructuras anisotrópicas. En el ensayo tipo dardo el nivel de energía absorbida es afectado por el grado de anisotropía de la probeta, debido a que el área debajo del percusor está en tensión biaxial de igual magnitud. Altos niveles de orientación de las cadenas en las capas superficiales pueden resultar en una marcada disminución en la energía de impacto. La rotura de la probeta, ocurre siempre en la dirección más débil. En los ensayos de dardo, una cabeza semiesférica golpea a un disco empotrado o simplemente apoyado. [11] Una ventaja de los ensayos de impacto de dardo, es que se puede estudiar como la superficie (por ejemplo espesor de la skin en piezas inyectadas) fragiliza al material.[12]



a)



b)

Figura 4.1. a) Máquina de Impacto instrumentado Fractovis Ceast (falling weight); b) Soporte para discos

5.2 Resultados obtenidos

5.2.1 Comportamiento en impacto de las piezas

Puesto a que la respuesta al impacto del polipropileno fue similar en todas las condiciones de procesamiento, sólo se muestran las curvas pertenecientes al barrido en temperatura. Los gráficos restantes se pueden observar en el Anexo 1 de la presente tesis.

Condición T1:

- Temperatura del fundido: 210°C.
- Temperatura del molde: 40°C.
- Presión de inyección: 37,2 MPa.
- Presión de holding: 36 MPa.
- Tiempo de inyección: 1 s.
- Tiempo de holding: 10 seg.
- Velocidad de inyección: 55%.

Condición T2:

- Temperatura del fundido: 220°C.
- Temperatura del molde: 40°C.
- Presión de inyección: 37,2 MPa.
- Presión de holding: 36 MPa.

- Tiempo de inyección: 1 s.
- Tiempo de holding: 10 seg.
- Velocidad de inyección: 55%.

Condición T3:

- Temperatura del fundido: 210°C.
- Temperatura del molde: 40°C.
- Presión de inyección: 37,2 MPa.
- Presión de holding: 36 MPa.
- Tiempo de inyección: 1 s.
- Tiempo de holding: 10 seg.
- Velocidad de inyección: 55.

Condición T1:

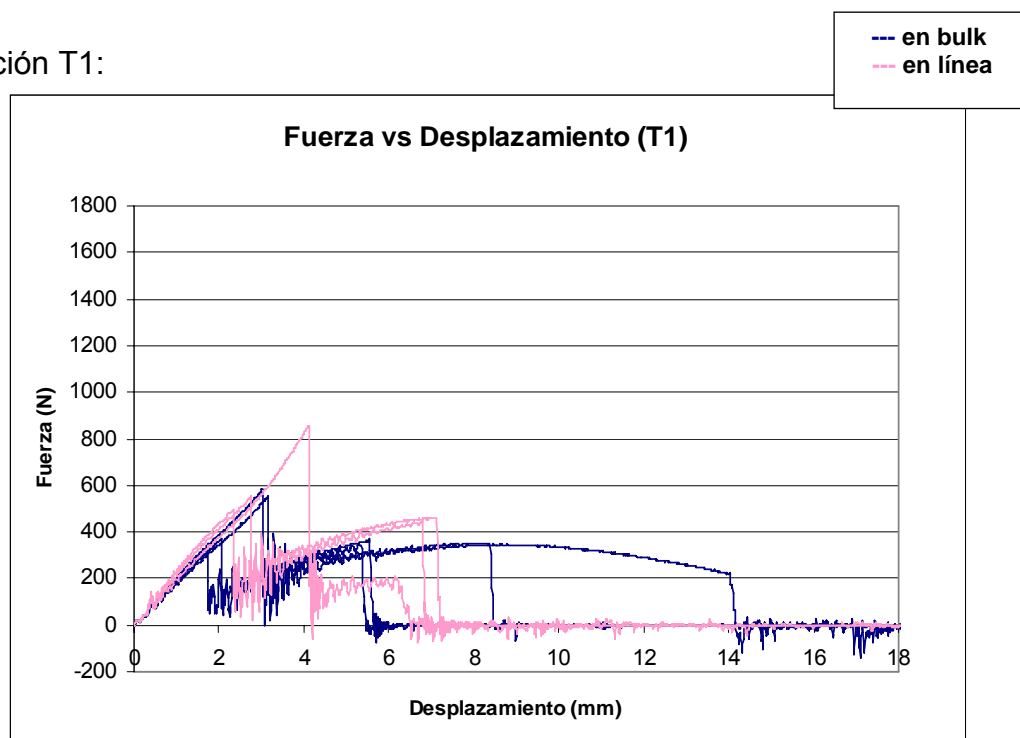


Figura 4.3. Fuerza vs. Desplazamiento

Condición T2:

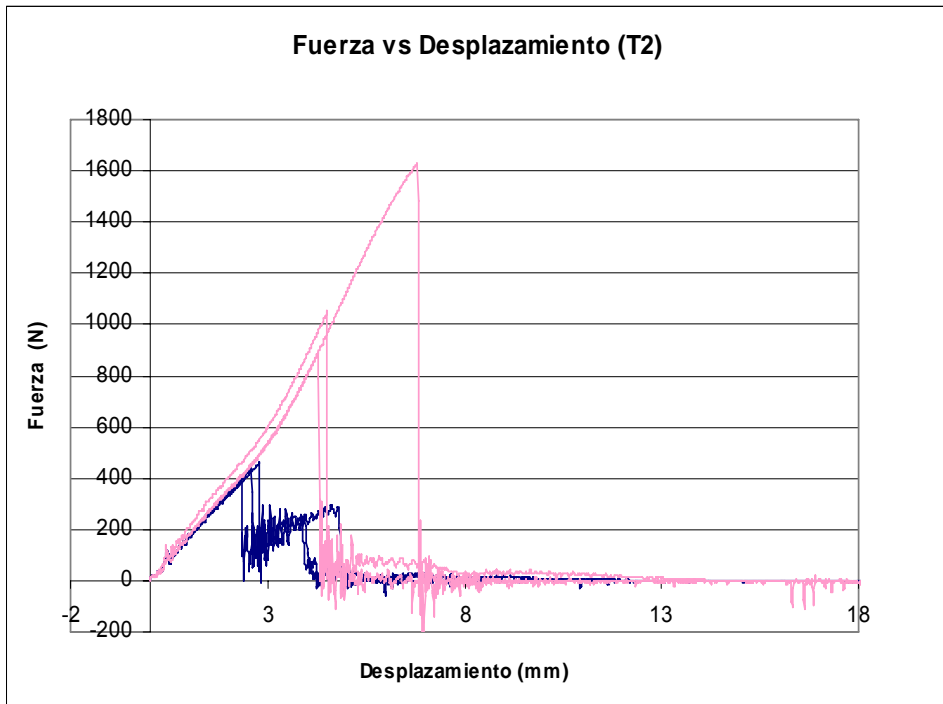


Figura 4.4. Fuerza vs. Desplazamiento

Condición T3:

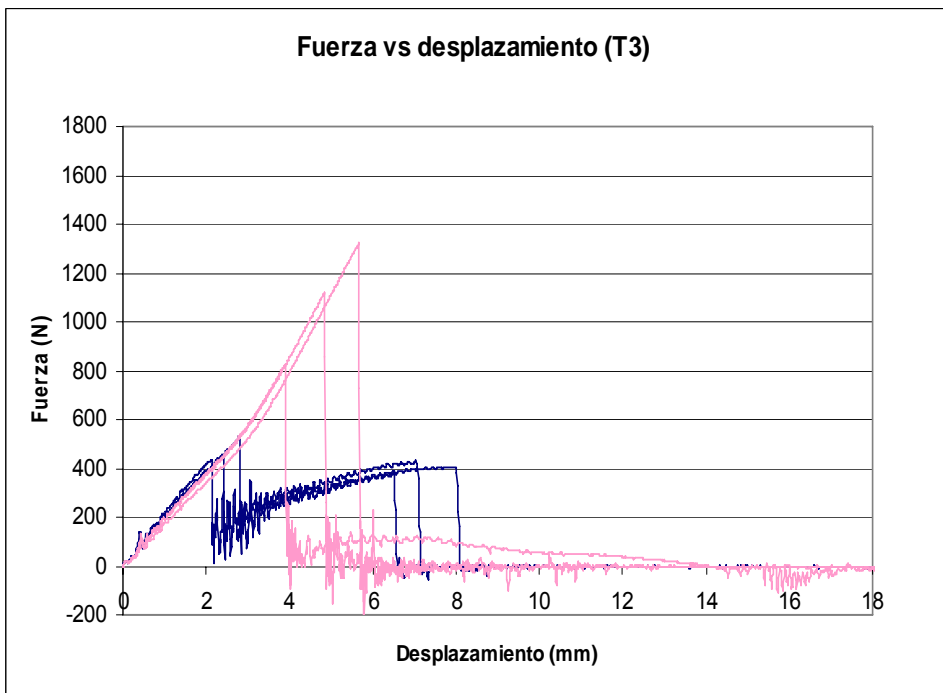
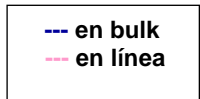


Figura 4.5. Fuerza vs. Desplazamiento

Se puede observar en las gráficas anteriores que el comportamiento al impacto es similar, respecto de línea con línea y material en bulk con material en bulk, en las tres condiciones. Además, se observaron todas las superficies de fractura, y se vio que las mismas presentaban el mismo patrón de rotura, Figura 4.6.

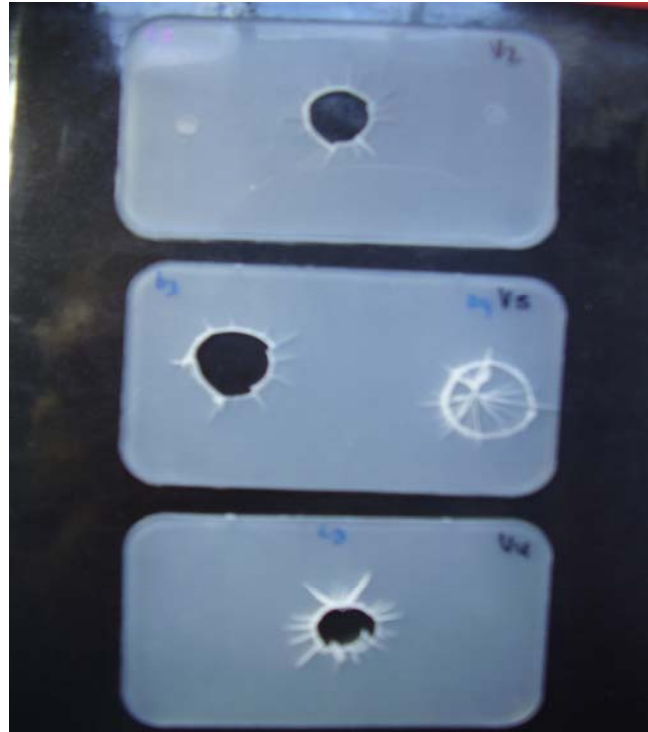


Figura 4.6. Probetas impactadas

Como se puede ver en la Figura 4.6, las probetas presentan fisuras radiales que comienzan desde el punto en donde impacta el percusor y una fisura circunferencial, que es la responsable de producir la falla final. Las fisuras circunferenciales ocurren donde una “depresión” causada por el percusor produce un gran momento flector y un alto nivel de curvatura fuera del plano. Este tipo de patrones es típico de fallas frágiles, es decir, fallas de baja energía de absorción y de una gran dispersión en los resultados.

5.2.2 Influencia de las condiciones de procesamiento en el comportamiento al impacto

Para caracterizar la influencia que tienen las condiciones de procesamiento en el comportamiento al impacto, se calculó la energía absorbida mediante la integración numérica de la curva Fuerza vs. Desplazamiento del primer pico, correspondiente a la primera falla debido que produciría que un componente en servicio sea descartado. Como las piezas inyectadas poseen todas el mismo espesor, se graficaron las energías absorbidas medias para cada condición en función de las distintas variables de procesamiento. Las barras de error se obtuvieron a través del cálculo de la desviación estándar para cada condición de procesamiento.

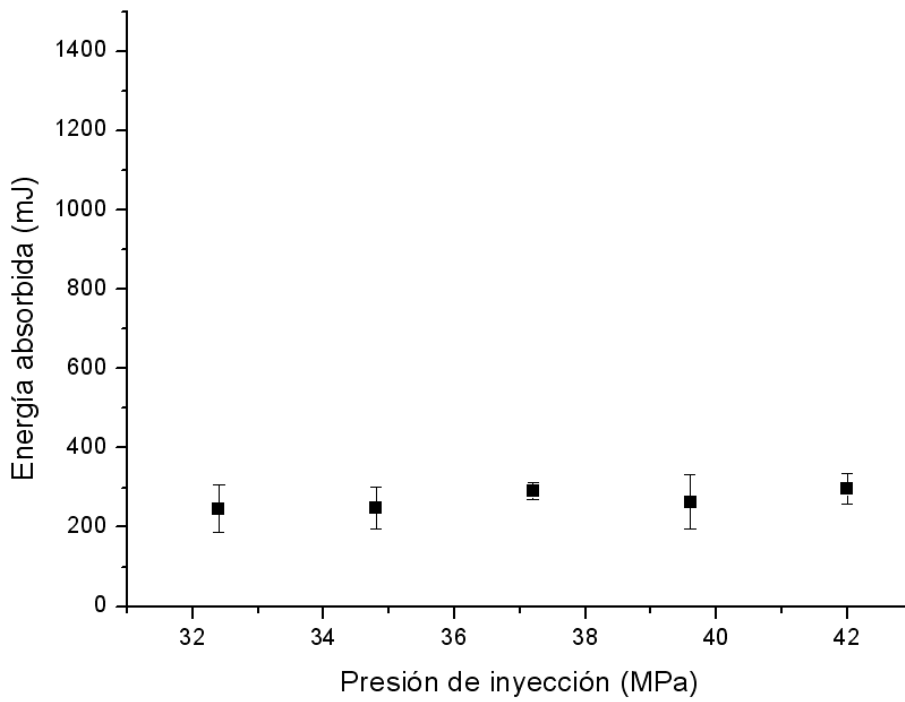


Figura 4.7.a) Energía absorbida vs. Presión de inyección (en bulk)

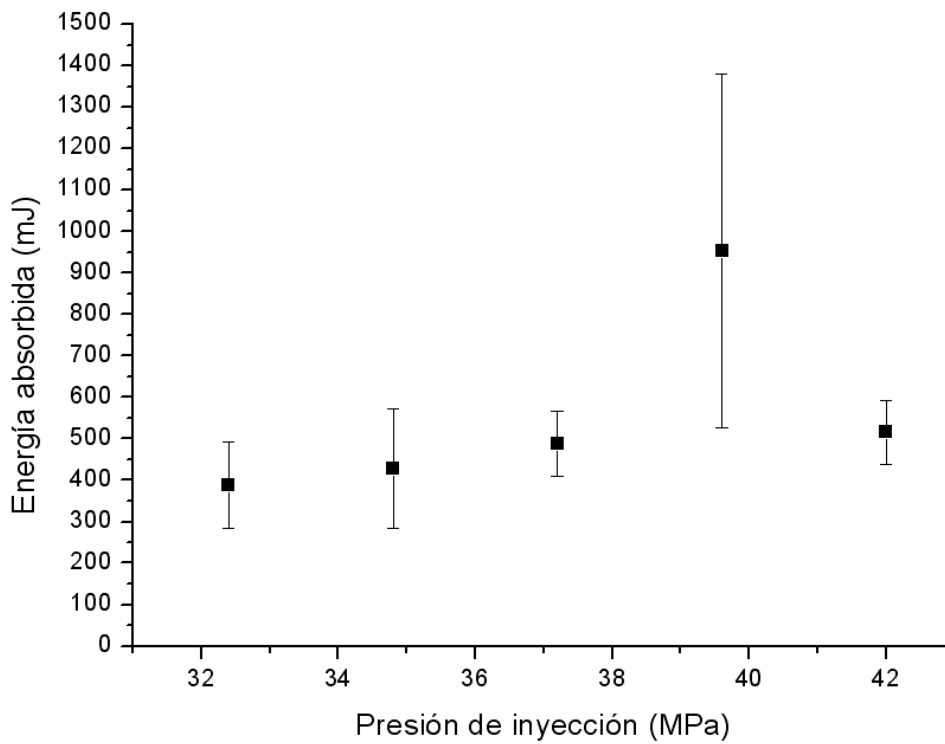


Figura 4.7.b) Energía absorbida vs. Presión de inyección (en línea)

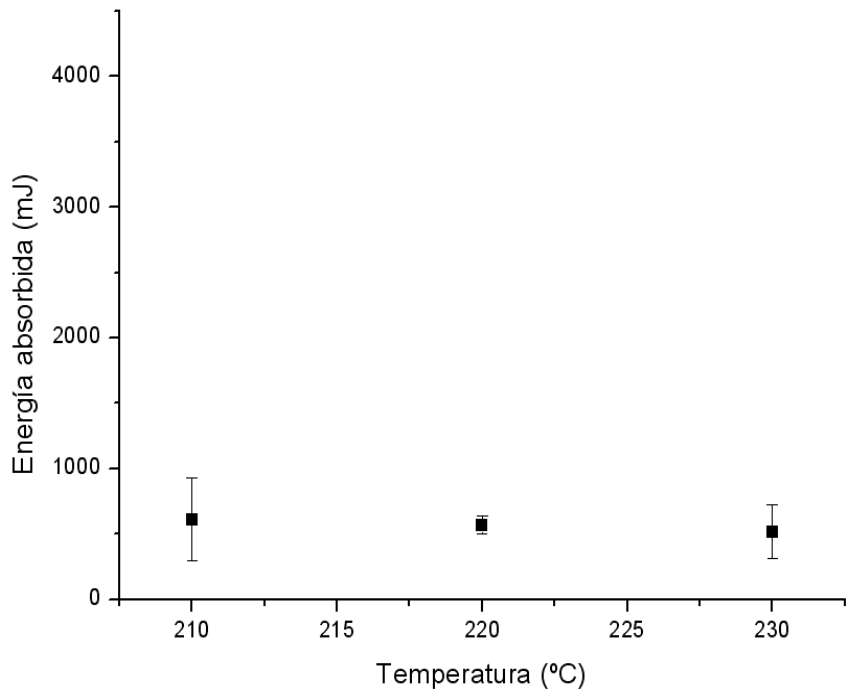


Figura 4.7.c) Energía absorbida vs. Temperatura del fundido (en bulk).

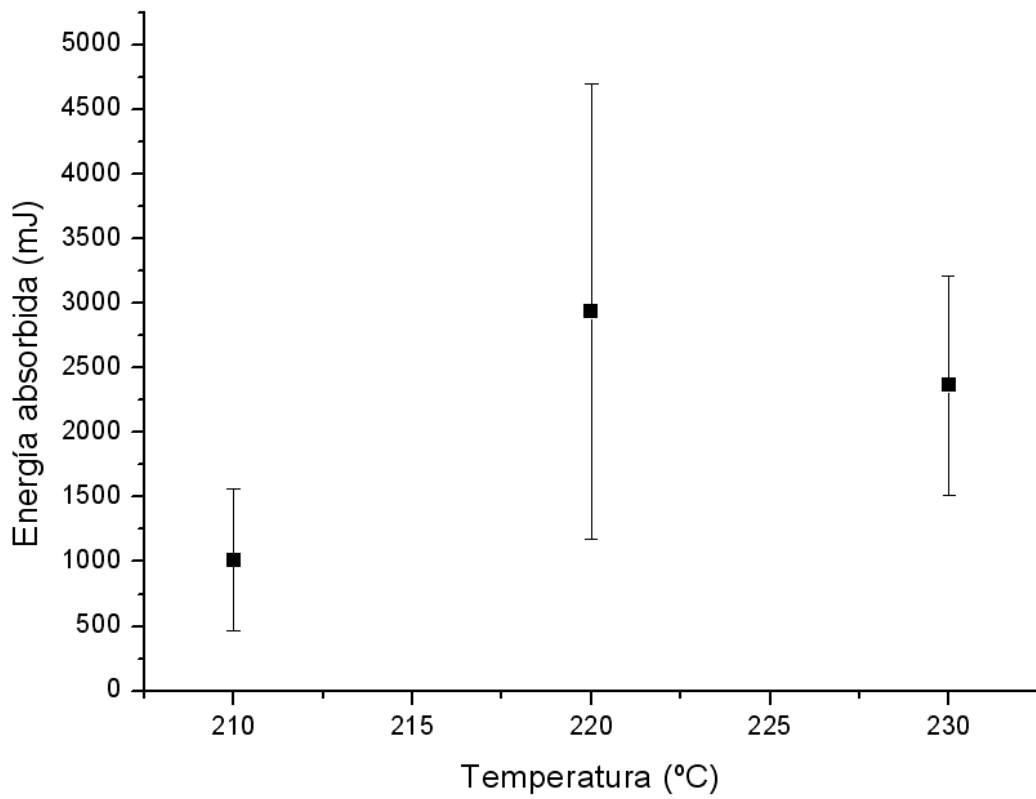


Figura 4.7.d) Energía absorbida vs. Temperatura del fundido (en línea).

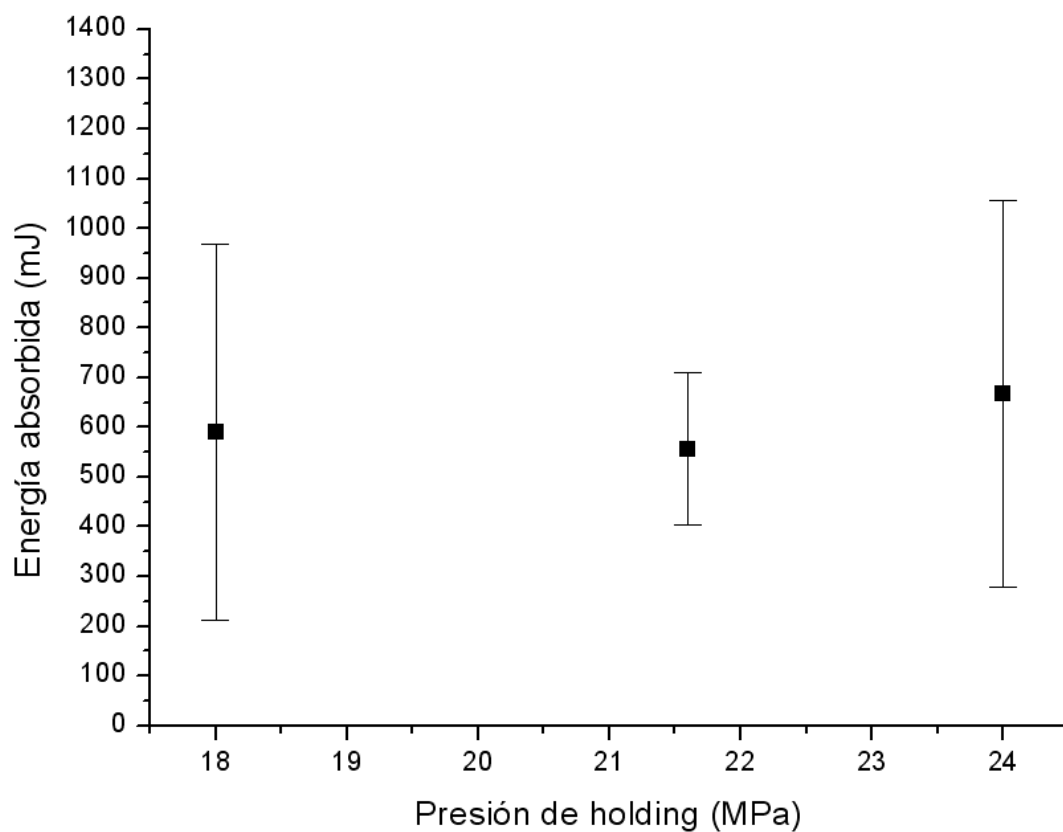


Figura 4.7.e) Energía absorbida vs. Presión de holding (en bulk).

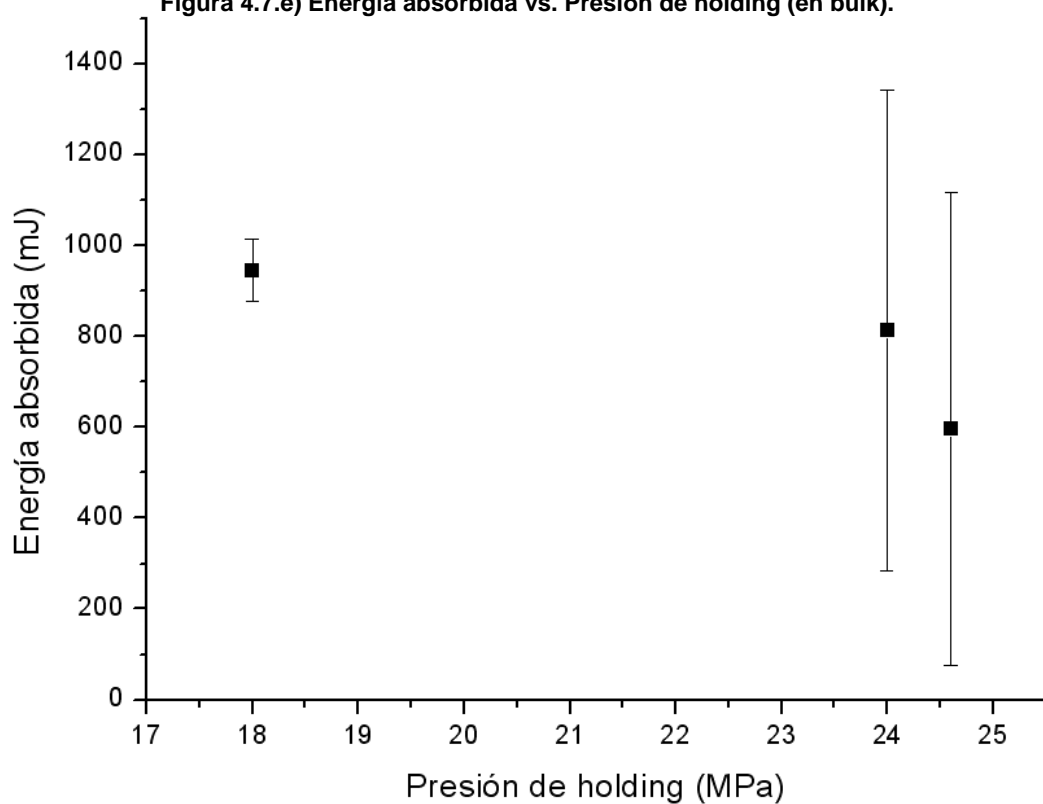


Figura 4.7.e) Energía absorbida vs. Presión de holding (en línea).

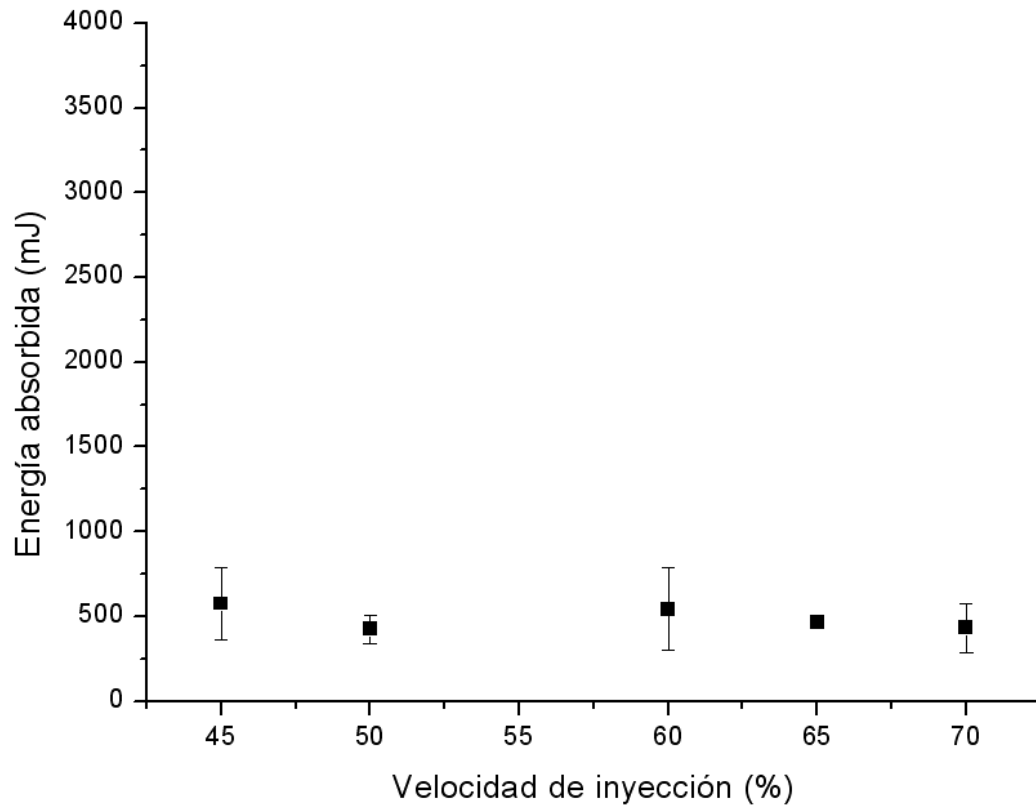


Figura 4.7.f) Energía absorbida vs. Velocidad de inyección (en bulk).

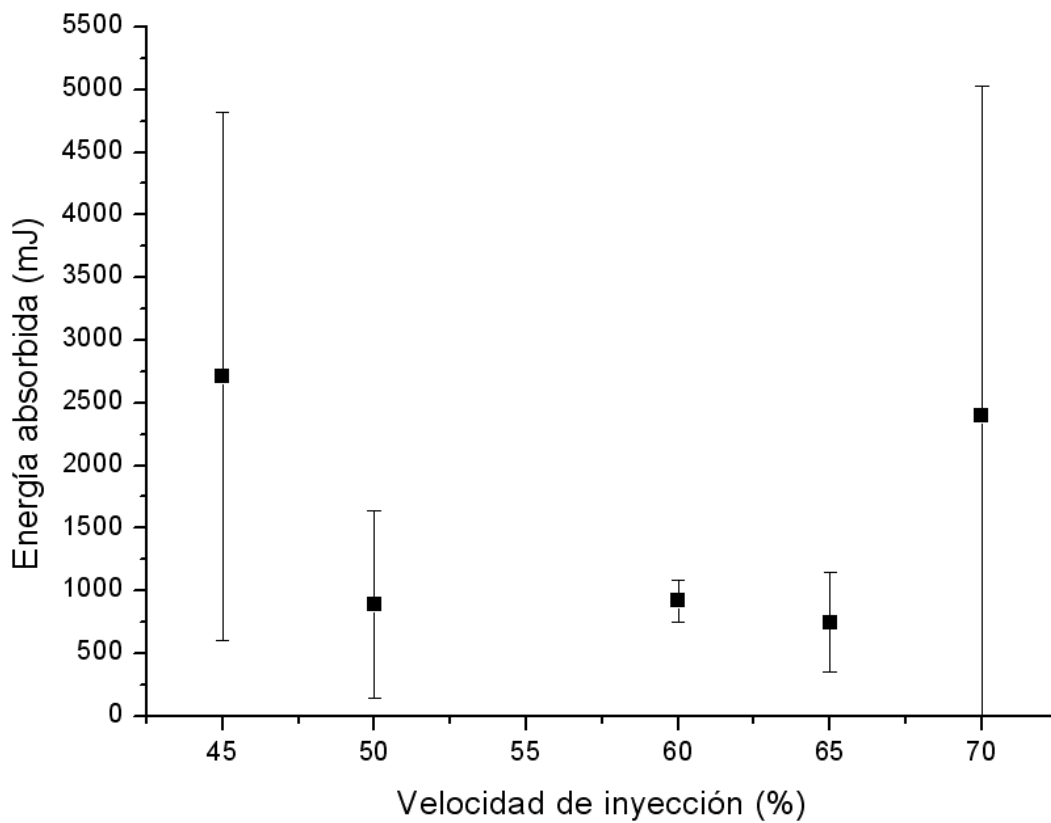


Figura 4.7.g) Energía absorbida vs. Velocidad de inyección (en línea).

De los gráficos anteriores se puede concluir que, en las ventanas de procesamiento en las que se trabajó, las variables de inyección no producen cambios significativos en la energía absorbida. Por otra parte, la dispersión observada se puede atribuir al comportamiento del polímero sobre las condiciones de ensayo (presenta fractura frágil, la misma se caracteriza por una gran dispersión en los resultados).

5.2.3 Efecto de las condiciones de procesamiento en la eficiencia de la WL

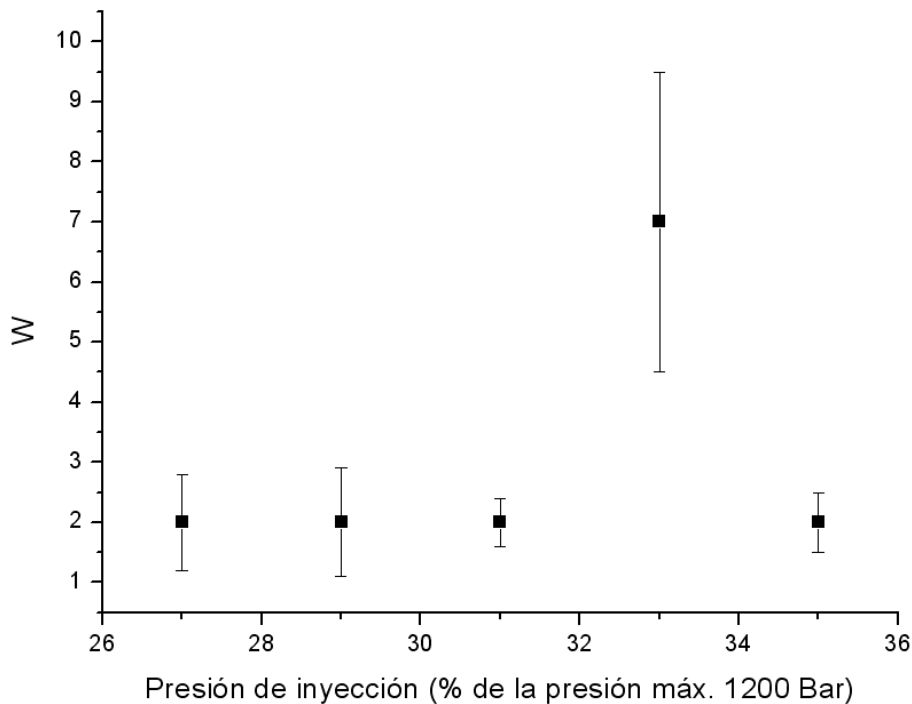
Se sacó la relación entre la energía absorbida por la línea de soldadura y la absorbida por el material en bulk. a dicha relación se la llamó "W". para calcular la propagación del error correspondiente al cociente se utilizó el método de las derivadas. A continuación se muestran las gráficas obtenidas con sus respectivas barras de error y la fórmula utilizada para las mismas.

Si

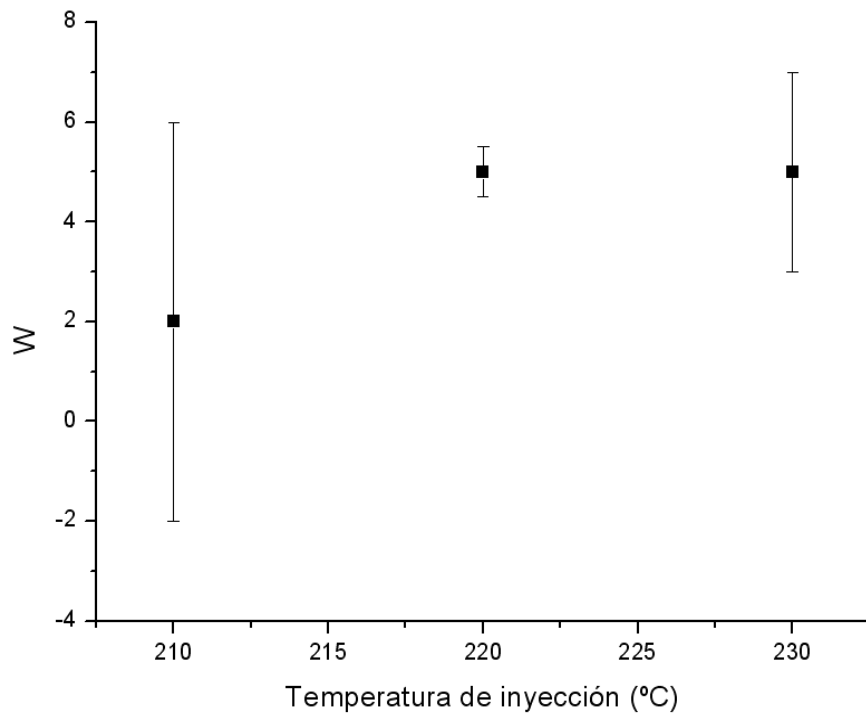
$$W = E_{\text{línea}} / E_{\text{bulk}} = L/B$$

Entonces

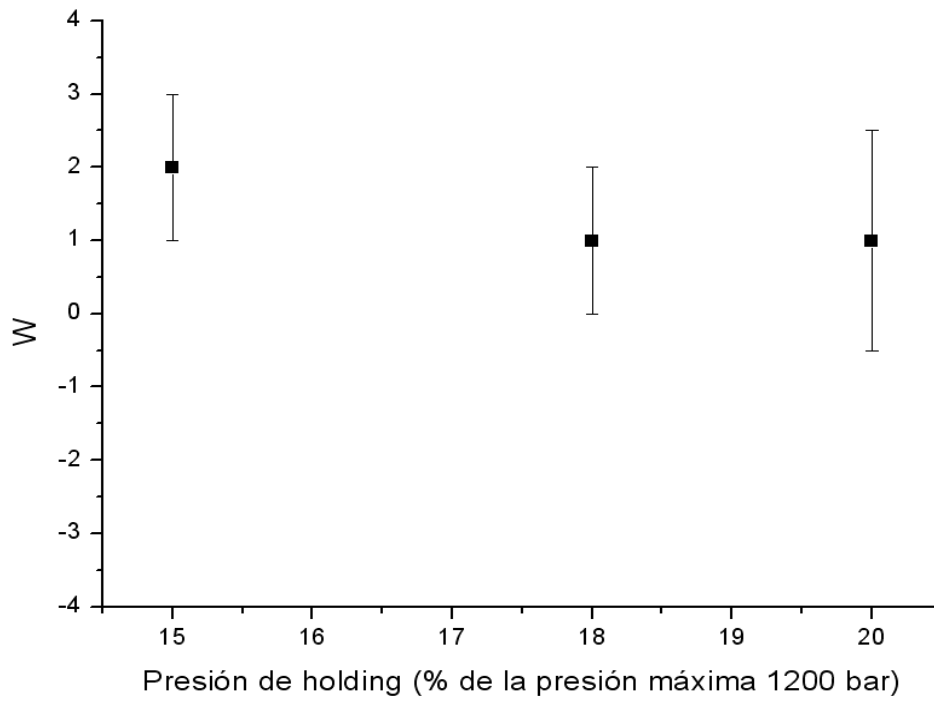
$$\Delta W = \left| \frac{\Delta L}{B} \right| + \left| \frac{L}{B^2} \Delta B \right|$$



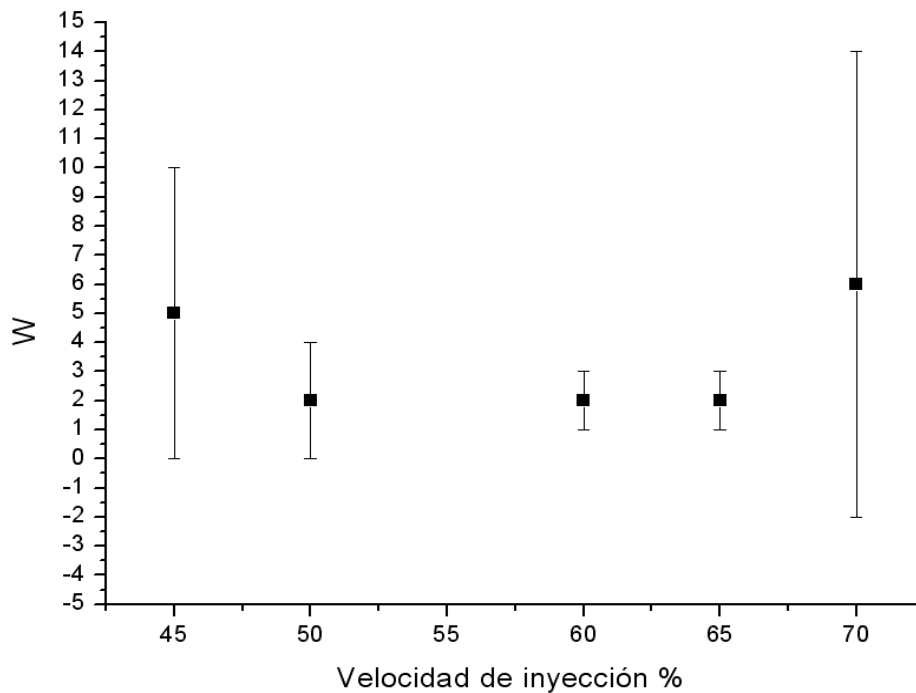
a)



b)



c)



d)

Figura 4.8.a) W vs. Presión de inyección;b)W vs. Temperatura del fundido;c) W vs. Presión de holding;d) W vs. Velocidad de inyección.

Como se puede observar en las gráficas anteriores, aparentemente la energía absorbida por la línea de soldadura es siempre igual o mayor que la absorbida por el material en bulk, para todas las condiciones. Comportamiento no esperado, que debe ser comprendido. A continuación se presentan los estudios realizados con este fin.

5.2.3.1 Estudios de cristalinidad

Para el presente estudio se empleó un DSC-50 SHIMADZU. Se programó una $T_{\text{máx}}$ de 210°C. Se utilizó una rampa de calentamiento de 10°C/min, bajo atmósfera de N_2 . Los resultados del análisis de las muestras de material, en bulk y en la línea de soldadura, se muestran en el gráfico de la Figura 4.8.

Temperaturas de procesamiento de las muestras:

- T1: 210 °C
- T2: 220 °C.
- T3: 230 °C.

Estudios anteriores atribuyeron la diferencia de absorción de energía a diferencias en el porcentaje de cristalinidad, tamaño y morfología de los cristales presentes en distintos lugares de la pieza [13].

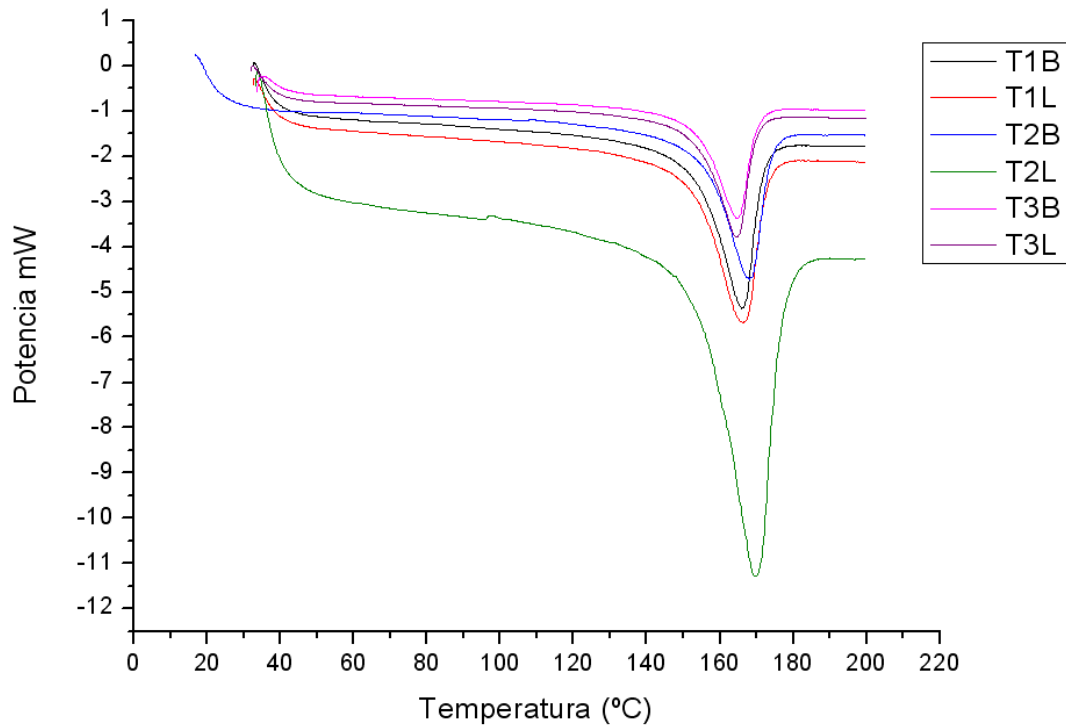


Figura 4.8. Endotermas de fusión

A partir del análisis de las endotermas de fusión se determinó el grado de cristalinidad tanto del material en bulk como de la línea. Para ello se calcularon los calores de fusión a través del software del equipo, el cual realiza la integración del área correspondiente al pico de fusión y calcula el calor de reacción (en J/g) mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta H = (A.60)/m.v_h$$

Donde ΔH es el calor de reacción (J/g); A área del pico en W°C; m la masa de PP en la muestra (g) y v_h , velocidad de calentamiento (°C/min)

A continuación se muestran las curvas obtenidas y los respectivos resultados:

	ΔH bulk (J/g)	ΔH línea (J/g)
Tinyección 210 °C	93.67	89.37
Tinyección 220 °C	76.48	80.15
Tinyección 230 °C	90.17	90.79

Tabla 4.2. ΔH de fusión.

La cristalinidad se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$X_c(\%) = (\Delta H/\Delta H^*) \cdot 100$$

Donde ΔH^* es el calor de fusión del polipropileno 100% cristalino. Este valor tomado de bibliografía es: 209 J/g Para el polipropileno isotáctico 100% cristalino (Quirk y Alsamire, 1990). En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos:

	X_c(%) bulk	X_c(%) línea
Tinyección 210 °C	44.81	42.76
Tinyección 220 °C	36.59	38.35
Tinyección 230 °C	43.14	43.44

Tabla 4.3. Porcentaje de cristalinidad

Puede observarse que la variación en la cristalinidad entre la línea de soldadura y el material en bulk es muy pequeña y entra dentro del error experimental. Tampoco se vio una diferencia notable en función de la temperatura de inyección.

A continuación se presentan las respectivas temperaturas de fusión para cada caso:

	T_{fusión} (°C)
Tinyección 210 °C bulk	166 °C
Tinyección 210°C línea	166 °C
Tinyección 220°C bulk	169 °C
Tinyección 220°C línea	168 °C
Tinyección 230°C bulk	164 °C
Tinyección 230°C línea	164 °C

Tabla 4.2. Teperaturas de fusión.

Si se observan los valores de la tabla 4.2 se puede ver que, para cada condición de temperatura de procesamiento, las temperaturas de fusión son iguales tanto para la zona de la línea como la del material en bulk. Con la excepción de la condición a 220°C en la cual se produce una diferencia de un grado, lo cual no es un indicio de una diferencia notable en el tamaño de los cristales.

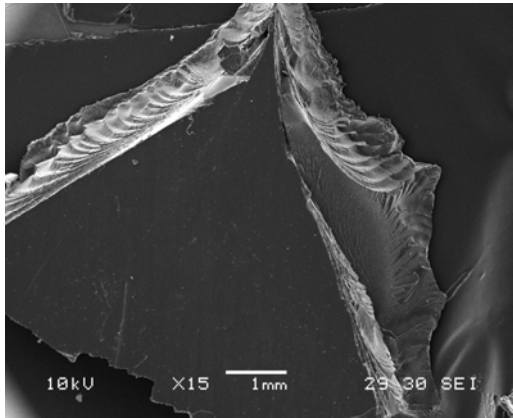
Se puede observar a través de la Figura 4.8 que las curvas no presentan indicios de una segunda fase cristalina, puesto que para cada caso se produjo un único pico de fusión.

Por lo tanto, los factores de eficiencia observados no pueden justificarse a través de diferencias en la morfología, tamaño y porcentaje de los cristales.

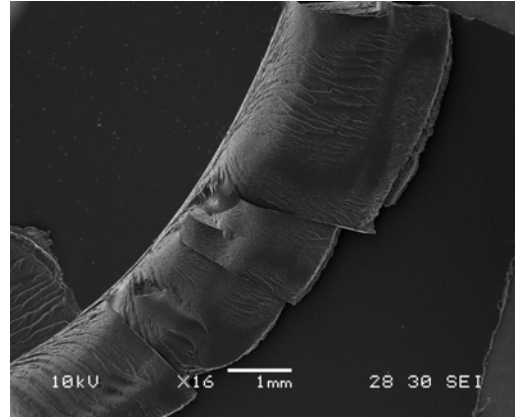
5.2.3.2 Análisis macro y micrográfico

Se realizó la observación minuciosa de las superficies de fractura de todas las probetas a ojo desnudo, Figura 4.6, sin encontrar un cambio de patrón entre las piezas ensayadas en la línea y las ensayadas en bulk [14].

Se decidió realizar un análisis micrográfico sobre las superficies de fractura para ver si se observaban mecanismos de deformación diferentes en ambas zonas analizadas anteriormente de manera macroscópica. Se tomaron micrografías mediante SEM sobre las superficies de fractura, tanto en la línea de soldadura como en el material en bulk. A continuación se presentan las imágenes obtenidas:

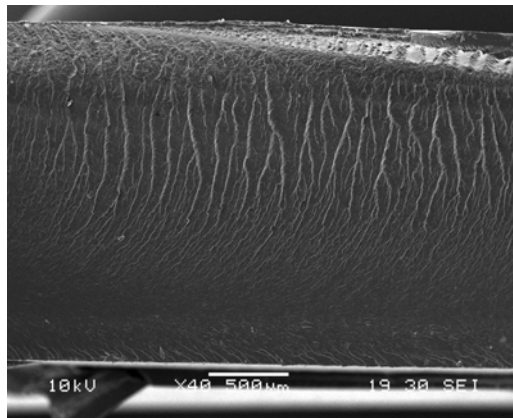


a)

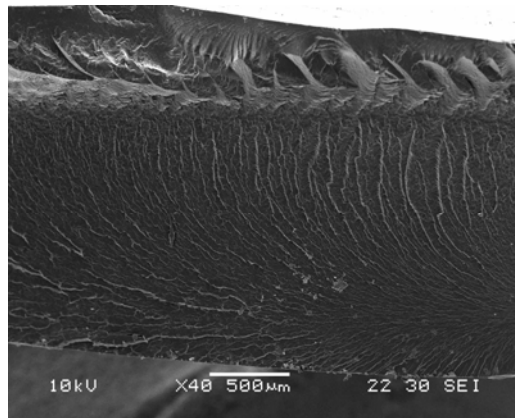


b)

Superficie traccionada



c)



d)

Figura 4.9; a) superficie de fractura del material en bulk; b) superficie de fractura del material en la línea; c) superficie de fractura de canto del material en bulk; d) superficie de fractura de canto del material en la línea.

La Figura 4.9.a) representa la superficie de fractura de la fisura radial producida en el material en bulk, mientras que la Figura 4.9.b) es la correspondiente a la superficie de fractura de la fisura circunferencial en la línea de soldadura. Mediante la observación de las figuras anteriores, se notó que para el caso de la línea de soldadura, ésta presentaba un área de material involucrado en la fractura bastante mayor (Figura 4.10), pero con mecanismo de rotura similar al de la fractura del material en bulk. Otra vista del mismo fenómeno puede observarse en las Figuras 4.9.c) y d), correspondientes a la superficie de fractura de canto del material en bulk y de la línea de soldadura, respectivamente. En la figura 4.9.d) se ve en la zona traccionada un cambio en la topografía, esto está relacionado a que la superficie se va desgarrando gradualmente a medida que el percusor penetra la probeta. Mientras que en la Figura 4.9.c) esto es prácticamente inexistente. Este fenómeno se explica a continuación.

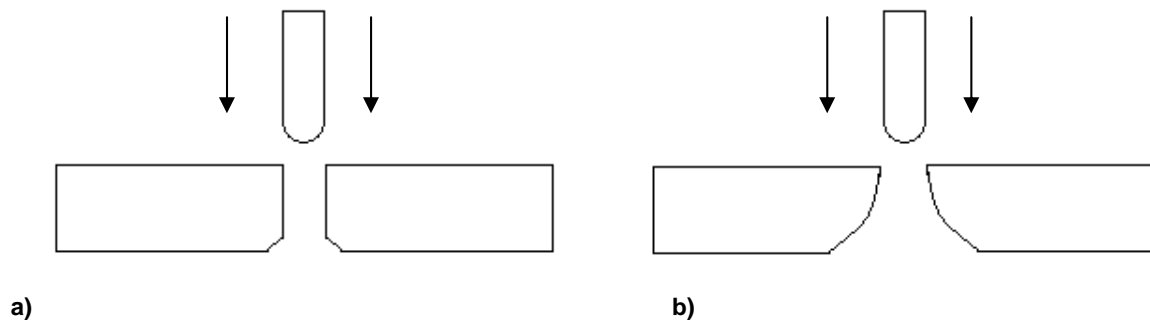


Figura 4.10. Esquemas del área involucrada en la fractura; a)bulk;b)línea.

Como se puede apreciar en la Figura 4.10., las áreas involucradas en la fractura son distintas y es bastante mayor para el caso de la línea de soldadura. Por lo tanto, se llegó a la conclusión que este tipo de ensayo no fue bueno para la caracterización de la línea de soldadura, puesto a que si bien es cierto que la energía absorbida es mayor, también lo es el área de material involucrado. Por lo tanto, no se deprecian las propiedades en la línea respecto con el bulk.

6. Sumario y Conclusiones

6.1 Sistema de inyección

Se puso en funcionamiento en modo automático al sistema molde-inyectora Multiplas HM-10T.

En relación al funcionamiento del sistema mencionado se permitieron esclarecer algunos aspectos operacionales del mismo:

- La fuerza de cierre resultó baja para piezas de superficie relativamente alta como las procesadas. En consecuencia, debió trabajarse dentro de un entorno de procesamiento reducido.
- La capacidad de llenado del tornillo es acotada y se observaron fluctuaciones de las condiciones de la apariencia de las piezas inyectadas.

6.2 Polipropileno

- El comportamiento al impacto de las piezas inyectadas no fue sensible a los cambios en las variables de procesamiento, debido al rango angosto en el que se trabajó.
- Se generaron fracturas de diferente área que impiden que los valores de energía medidos sean comparables.

7. Bibliografía

- [1] J.C. Viana, A.M Cunha, *“The use of thermomechanical indices to establish straightforward processingmechanical properties relationships”*.
- [2] R. Seldén, swedish institute for fiber and polymer research s-431 22 molndal, sweden *“Effect of processing on weld line strength in five thermoplastics”*.
- [3] <http://www.textoscientificos.com/polímeros/polipropileno>.
- [4] C. Suajanya, S. Sainkar & S. Radhakrishnan. Structure and Properties of PP/SBS/Glass Fiber Hybrid Composites. Part 1:Crystallization behavior and Morphology. Polymer composites. Vol 22 (2001), N°1,221-231.
- [5] A.M. Cunha and S. Fakirov in *“Structure developed during processing”* 255-277.
- [6] B. FISA and M. RAHMANI *“Weldline Strength in Injection Molded Glass Fiber-Reinforced polypropilene”*, Departament of Mechanical Engineering Ecole Polytechnique de Montreal, Montreal, Québec, Canadá H3C 3ª7.
- [7] *“Assessment of weld line performance of pp/talk holding produced in hot runner injection molds”*.
- [8] B. FISA and M. RAHMANI, *“Weldline Strength in Injection Molded Glass Fiber-Reinforced polypropilene”*, Departament of Mechanical Engineering Ecole Polytechnique de Montreal, Montreal, Québec, Canadá H3C 3ª7.
- [9] Z. Tadmor and C.G. Gogos, *Principles of Polymer Processing*, John Wiley & Sons, New York (1979).(5).
- [10] Kennedy P, in *“Flow analysis of injection moulds”*, Carl hanser, Munchen, (1995).
- [11] R.P Nimmer, *“Analysis of puncture of Bisphenol-A Polycarbonate Disc”*, General Electric Company, Corporate Research and Development, Schenectady, New York 12301.
- [12] C.B. Bucknall *“Application of Fracture Mechanics to the Prediction of the Ductile-Brittle Transition”*, Cranfield Institute of Technology, Cranfield, Bedford, UK.
- [13] Gurhan Kalay and Michael J. Bevis *“Processing and Physical Property RelationShips in Injection-Molded Isotactic Polypropilene”*, Wolfson Centre for Materials Processing, Department of Materials Engineering, Brunel University, Uxbridge, Middlesex UBB 3PH, UK.
- [14] *“Impact Properties and Microhardness of DG”*