



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Tesis Doctoral

MODELADO Y VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO A TRACCION DE PROBETAS BIMATERIAL TERMOPLASTICAS. (PP-PE Y ABS-HIPS).

Autor

Antonio V. Martínez Sanz

Director: Santiago Ferrándiz Bou

Codirector: Raúl Navarro Vidal

Valencia, Diciembre 2015

Agradecimientos:

Deseo expresar mi agradecimiento a mis dos directores de Tesis: Dr. Santiago Ferrándiz Bou y el Dr. Raúl Navarro Vidal por su ayuda y aportaciones que han permitido la mejora de este trabajo.

Al Dr. Juan López Martínez y al Dr. Vicente Colomer Romero, por su ayuda incondicional en la ardua tarea para la realización de esta tesis.

Al personal técnico del laboratorio de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la E.P.S.A., en especial a mis amigos Matías Monzó y Angel Sánchez Macizo por el apoyo técnico que me han prestado en el empleo de sus instalaciones.

A mis amigos Albert Viu, Clara Gómez y Jacobo Domenech, en especial a éste último que me ha demostrado que con esfuerzo y tesón se puede llegar a ser un buen profesional, que sin vuestra ayuda y esfuerzo nunca hubiera finalizado mi tesis.

A mi familia por su apoyo y comprensión durante los 4 años que me ha costado su finalización, en especial a mi madre y mi padre.

Y en general a todas aquellas personas que han hecho posible la culminación de mi tesis.

Contenido

I.	Introducción	15
1.1	Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).....	15
1.1.1	Componentes del ABS	16
1.1.2	Estructura del ABS	17
1.1.3	Identificación del ABS.....	18
1.1.4	Propiedades.....	19
1.1.5	Usos y aplicaciones.....	22
1.2	Poliestireno.....	24
1.2.1	Estructura del PS.....	24
1.2.2	Identificación del PS	26
1.2.3	Propiedades.....	26
1.2.4	Usos y aplicaciones.....	29
1.3	Polietileno (PE)	30
1.3.1	Estructura del PE.....	31
1.3.2	Identificación del PE	32
1.3.3	Propiedades.....	32
1.3.4	Usos y aplicaciones.....	34
1.4	Polipropileno (PP).....	35
1.4.1	Estructura del PP	35
1.4.2	Identificación del polipropileno.....	36
1.4.3	Propiedades del Polipropileno	37
1.4.4	Usos y aplicaciones.....	39
1.5	Procedimientos y métodos a emplear.....	40
1.5.1	Secado previo de la granza	40
1.5.2	Fundamentos de la técnica.....	40
1.6	Procesado de las mezclas por inyección.....	41
1.6.1	Descripción del equipo de inyección.....	41
1.6.2	Tipos de procesos de inyección aplicables	43

1.7	Aspecto básico para el diseño de piezas	46
1.7.1	Longitud de Flujo y Espesor de Pared.....	47
1.7.2	Contracción del material	47
1.7.3	Resolución de problemas con sobremoldeo	47
1.7.4	Selección de la maquina inyectora	52
1.8	Estado del arte.....	53
1.8.1	Tendencias actuales.....	53
1.8.2	Fuentes de información consultadas.....	54
	Fuentes de información consultadas.....	55
	Proceso reglado utilizado	59
II.	Objetivos.....	67
2.1	Objetivos.....	67
2.2	Planificación de la investigación.....	67
III.	Experimental.....	73
3.1	Materiales.....	73
3.1.1	Materiales empleados para las probetas	73
3.2	Procedimientos y métodos.....	76
3.2.1	Ensayo de tracción.....	76
3.2.2	Ensayo de Flexión	77
3.2.3	Microscopia electrónica de barrido (SEM)	78
3.3	Modelos matemáticos de comportamiento.....	81
3.3.1	Caracterización mecánica de tracción.....	81
3.3.2	Caracterización mecánica a flexión	82
IV.	Resultados y discusión.....	85
4.1	Evaluación del molde de las probetas	85
4.1.1	Simulación mediante el proceso e inyección	85
4.1.2	Resultados	85
4.2	Caracterización mecánica de los materiales	87
4.2.1	Evaluación del comportamiento mecánico	87
4.3	Estudio mediante programa Moldflow de las probetas objeto de estudio	91

4.3.1	Consideraciones iniciales.....	91
4.3.2	Simulación mediante Moldflow proceso sobremoldeo	91
4.3.3	Simulación mediante Moldflow proceso co-inyección.....	100
4.3.4	Conclusiones parciales.....	107
4.4	Estudio mediante el programa Ansys Workbench del comportamiento a tracción de las probetas objeto de estudio.....	108
4.4.1	Consideraciones iniciales.....	108
4.4.2	Configuración de los materiales	108
4.4.3	Configuración de la geometría	110
4.4.4	Configuración de la malla	112
4.4.5	Configuración de los contactos	112
4.4.6	Configuración de las condiciones de contorno	113
4.4.7	Preparación de los resultados	114
4.4.8	Resultados obtenidos	115
4.4.9	Conclusiones parciales.....	124
4.5	Estudio mediante el programa Ansys Workbench del comportamiento a flexión de las probetas objeto de estudio.....	124
4.5.1	Consideraciones iniciales.....	124
4.5.2	Configuración de los materiales	124
4.5.3	Configuración de la geometría	125
4.5.4	Configuración de la malla	125
4.5.5	Configuración de los contactos	125
4.5.6	Configuración de las condiciones de contorno	126
4.5.7	Preparación de los resultados	127
4.5.8	Resultados obtenidos	127
4.5.9	Conclusiones parciales.....	134
4.6	Caracterización mecánica de los materiales	134
4.6.1	Ensayo de tracción.....	134
4.6.2	Conclusiones parciales.....	136
4.6.3	Ensayo de tracción de las probetas reforzadas por recalentamiento	136
4.7	Caracterización morfológica.....	141

4.8	Conclusiones parciales.....	141
V.	Conclusiones.....	149
VI.	Líneas futuras de trabajo.....	153
VII.	Referencias	157
VIII.	Apéndices	161

Resumen:

Dentro de los procesos de conformado de los termoplásticos destaca por su importancia industrial el proceso de Inyección. Se emplea para la fabricación de una gran diversidad de productos debido a que cumple perfectamente con los objetivos globales de minimización de costes económicos, errores dimensionales finales y práctica desaparición de defectos en las piezas terminadas.

Se han realizado muchas publicaciones y estudios científicos para la determinación y control del conjunto de variables que afectan a dicho proceso de transformación.

Este estudio busca dar un paso más en la generación de conocimiento, ya que se han detectado posibilidades de empleo de materiales termoplásticos bimateriales en el sector deportivo y en el de accesorios de automoción, siendo necesario el estudio y determinación de las posibilidades reales de empleo de programas informáticos de simulación en este tipo de piezas coinyectadas para la predicción del comportamiento mecánico en este tipo de procesos específicos.

La calidad predictiva de las informaciones técnicas obtenidas depende de las propiedades de los materiales a coinyectar, variables de los ensayos y de los modelos matemáticos susceptibles de empleo para la simulación del comportamiento.

Permitirá aglutinar de forma ordenada los resultados obtenidos mediante el proceso simulado, para su comparación con los ensayos reales para su análisis y obtención de conclusiones.

Resum:

Dins dels processos de conformat dels termoplàstics destaca per la seva importància industrial el procés de Injecció. S'utilitza per a la fabricació d'una gran diversitat de productes donat que compleix perfectament amb els objectius globals de minimització de costos econòmics, errors dimensionals finals i pràctica desaparició de defectes en les peces acabades.

S'han realitzat moltes publicacions i estudis científics per a la determinació i control del conjunt de variables que afecten aquest procés de transformació.

Aquest estudi busca donar un pas més enllà a la generació de coneixement, ja que s'han detectat possibilitats d'ocupació de materials termoplàstics constituïts per dos materials al sector esportiu i al d'accessoris d'automoció. Es fá, per tant, necessari l'estudi i determinació de les possibilitats reals d'ocupació de programes informàtics de simulació en aquest tipus de peces coinjectades per a la predicció del comportament mecànic en aquest tipus de processos específics.

La qualitat predictiva de les informacions tècniques obtingudes depèn de les propietats dels materials a coinjectar, variables dels assajos i dels models matemàtics susceptibles d'ocupació per a la simulació del comportament.

Ens permetrà aglutinar de forma ordenada els resultats obtinguts mitjançant el procés simulat, per la seva comparació amb els assajos reals per a la seva anàlisi i obtenció de conclusions.

Abstract

The injection process is a very important part of the manufacture of thermoplastics. They are used for the fabrication of a wide variety of products because they comply perfectly with the overall objectives of low cost, precise size and almost the complete elimination of defects in the finished product.

Many publications and scientific studies have been completed about the determination and control of the set of variables that affect the above-mentioned technological process.

There are more and more applications for thermoplastics in a variety of areas such as the automotive and sports sectors. This thesis researches if computer programs can predict the behavior of materials that are used in the injection process.

The quality of the predictive data depends on the properties of the materials injected, the variables of the tests and the mathematic models that can be used to simulate the behavior.

Thanks to the simulation process, results can be combined and ordered so they can be used for comparison in real trials and they can be analyzed in order to confirm the conclusions on the behavior.

INTRODUCCIÓN I

I. Introducción

1.1 Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

El acrilonitrilo butadieno estireno, frecuentemente abreviado ABS, (del inglés acrylonitrile butadiene styrene) es un termoplástico de ingeniería, cuya elaboración y procesado es más complejo que la de los plásticos comunes tipo polioleofinas (polietileno, polipropileno).

El acrónimo procede de los tres monómeros utilizados para producirlo: acrilonitrilo, butadieno y estireno. Este termoplástico se le denomina temopolímero (copolímero compuesto de tres bloques), por estar constituido por estos tres monómeros diferentes.

Los primeros plásticos de ABS se fabricaban a través de la mezcla mecánica de los ingredientes en seco o de la mezcla del látex de un caucho basado en butadieno y la resina del copolímero acrilonitrilo-estireno (SAN). Este producto tenía buenas propiedades comparado con otros materiales disponibles en aquellos años, pero tenía varias deficiencias entre las que se pueden destacar una mala capacidad para ser procesado y una falta de homogeneidad.

Para mejorar sus propiedades se fueron incorporando modificaciones en el proceso de fabricación. La mejora más importante consistió en la polimerización del acrilonitrilo-estireno en presencia del caucho. El caucho en un principio tenía un alto contenido en acrilonitrilo pero fue remplazado por otros con bajo contenido como el polibutadieno, el caucho natural, el caucho estireno butadieno y elastómeros acrílicos.

En la actualidad el ABS se fabrica mediante la polimerización del estireno y el acrilonitrilo en presencia de polibutadieno, resultando una estructura de polibutadieno con cadenas de SAN (estireno acrilonitrilo) injertadas en él.

1.1.1 Componentes del ABS

1° Poliacrilonitrilo

El primer componente del ABS es el acrilonitrilo (Figura I.1. Poliacrilonitrilo) (textos científicos.com). Los bloques de este material proporcionan rigidez, resistencia a ataques químicos, estabilidad a alta temperatura y dureza.

Para su fabricación se utiliza un método en fase vapor en el que se produce la oxidación del propileno y amoníaco con catalizadores. El proceso comercial utiliza un reactor de lecho fluido en el cual el propileno, el amoníaco y el aire se ponen en contacto con un catalizador sólido a una temperatura de 400 °C a 510 °C y una presión entre 0.5 y 2 atm.

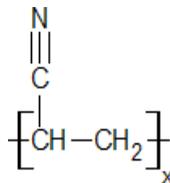


Figura I.1. Poliacrilonitrilo.

2° Polibutadieno

El segundo componente del ABS es el butadieno (Figura I.2. Polibutadieno.) (textos científicos.com) el cual es un elastómero. Los bloques de este material proporcionan tenacidad a cualquier temperatura. Esto es especialmente interesante para ambientes fríos, en los cuales otros plásticos se vuelven quebradizos.

El butadieno se obtiene principalmente como un subproducto en el vapor del cracking de hidrocarburos para producir etileno.

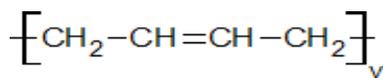


Figura I.2. Polibutadieno.

3° Poliestireno

El tercer componente del ABS es estireno (Figura I.3. Poliestireno.) (textos científicos.com). Los bloques de este material aportan resistencia mecánica y rigidez.

La fabricación del estireno se realiza principalmente por el método de la deshidrogenación del etilbenceno. En este proceso, la deshidrogenación del etilbenceno a estireno tiene lugar en presencia de un catalizador de óxido de hierro y otro de óxido de potasio, en un reactor de lecho fijo a una temperatura entre 550 – 680 °C en presencia de vapor y a baja presión (0.41 Atm), dado que bajas presiones favorecen el avance de la reacción.

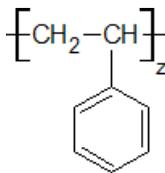


Figura I.3. Poliestireno.

Por tanto el ABS dispone de una mezcla de propiedades, llamada sinergia, que indica que el producto final contiene mejores propiedades que la suma de ellos.

1.1.2 Estructura del ABS

La estructura del ABS (Figura I.4. Estructura del ABS.) (textos científicos.com) está formada por una fase dura y rígida (cadenas de SAN) un copolímero vítreo, que es mezcla de estireno y acrilonitrilo, y un compuesto elástico (principalmente el polímero de butadieno), que forma la fase elástica.

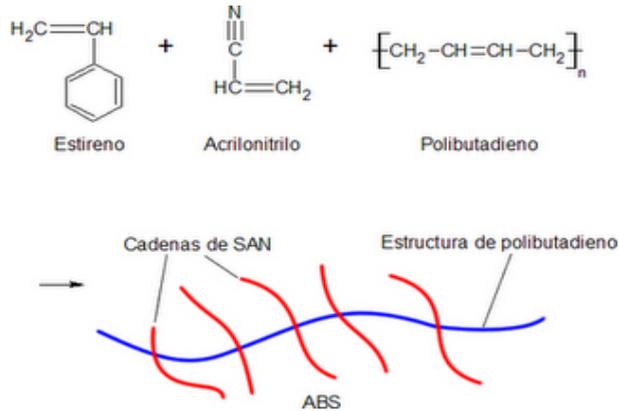


Figura I.4. Estructura del ABS.

El ABS es un plástico fuerte debido a los grupos nitrilo. Estos grupos son muy polares, así que se atraen mutuamente permitiendo que las cargas opuestas de los grupos nitrilo puedan estabilizarse. Esta fuerte atracción mantiene firmemente las cadenas de ABS, haciendo el material más fuerte. También el polibutadieno, con su apariencia de caucho, hace al ABS más resistente que otros termoplásticos más comunes.

1.1.3 Identificación del ABS

Las piezas que están fabricadas del material ABS deben estar marcadas de acuerdo con la norma ISO 11469 (DIN 58840), (Figura I.5. Identificación del ABS.) (tecnologiadelosplasticos.blogspot.com). De esta manera se facilita el reciclado de los productos realizados con los termoplásticos.



Figura I.5. Identificación del ABS.

1.1.4 Propiedades

Las diferentes piezas fabricadas con ABS tienen importantes propiedades de ingeniería como son: buena resistencia mecánica y resistencia al impacto, pero a su vez combinado con la facilidad para el procesado.

La resistencia al impacto del termoplástico ABS se ve incrementada al aumentar el porcentaje de contenido en butadieno pero disminuyen entonces las propiedades de resistencia a la tensión y la Vicat, temperatura de deflexión térmica. Las excelentes propiedades del ABS son debidas a las propiedades que presentan cada uno de sus componentes:

El *acrilonitrilo* proporciona:

- Resistencia térmica
- Resistencia química
- Resistencia a la fatiga
- Dureza y rigidez

El *butadieno* proporciona:

- Ductilidad a baja temperatura
- Resistencia al impacto
- Resistencia a la fusión

El *estireno* proporciona:

- Facilidad de procesado (fluidez)
- Brillo
- Dureza y rigidez

El ABS es opaco (excepto en películas delgadas) y puede ser de color oscuro o marfil. También se puede pigmentar para obtener la mayoría de los colores, obteniéndose además piezas de acabado fino. La mayoría de los plásticos ABS son no tóxicos e inodoros.

Los ABS pueden ser extruidos, moldeados por inyección, soplado y prensado. Los grados de bajo impacto son, generalmente, los que más fácil se procesan. Los de alto impacto son más difíciles de procesar porque son más viscosos, al tener un mayor contenido en caucho.

El ABS por estructura es altamente inflamable aunque se puede aditivar para alcanzar diferentes grados de resistencia a la llama: V0, V1 o V2.

Entre todos los termoplásticos, el ABS es importante por sus propiedades balanceadas. El ABS se destaca por combinar dos propiedades muy importantes como son: la resistencia a la tensión y la resistencia al impacto en un mismo material.

En la Tabla I.1. Propiedades cuantitativas del ABS (textos científicos.com) se observan las propiedades cualitativas del ABS y en la Tabla I.2. Propiedades Cuantitativas del ABS (Techno Polymer) aparecen las cualidades cuantitativas del ABS, exactamente el ABS 55 de Techno Polymer.

Tabla I.1. Propiedades cuantitativas del ABS.

Propiedad	Característica
Resistencia a la abrasión	Alta
Permeabilidad	Todos los grados son considerados impermeables al agua, pero ligeramente permeables al vapor
Propiedades relativas a la fricción	No los degradan los aceites son recomendables para cojinetes sometidos a cargas y velocidades moderadas
Estabilidad dimensional	Es una de las características más sobresalientes, lo que permite emplearla en partes de tolerancia dimensional cerrada. La baja capacidad de absorción de la resina y su resistencia a los fluidos fríos, contribuyen a su estabilidad dimensional
Pigmentación	La mayoría de estas resinas, están disponibles en colores estándar sobre pedido, se pueden pigmentar aunque requieren equipo especial
Facilidad de unión	Se unen fácilmente entre sí y con materiales plásticos de otros grupos mediante cementos y adhesivos
Cap. de absorción	Baja
Propiedades ambientales	La exposición prolongada al sol produce una capa delgada quebradiza, causando un cambio de color y reduciendo el brillo de la superficie y la resistencia a la flexión. La pigmentación en negro provee mayor resistencia a la intemperie
Resistencia química	Generalmente buena aunque depende del grado de la resina, de la concentración química, temperatura y esfuerzos sobre las partes. En

	general no son afectadas por el agua, sales inorgánicas, álcalis y por muchos ácidos. Son solubles en ésteres, acetona, aldehídos y en algunos hidrocarburos clorados
Formado	Se adaptan bien a las operaciones secundarias de formado. Cuando se calientan, los perfiles extruidos, se pueden doblar y estampar
Facilidad de maquinado	Sus características son similares a las de los metales no ferrosos, se pueden barrenar, fresar, torneare, aserrar y troquelar
Acabados superficiales	Pueden ser acabados mediante metalizado al vacío y electro plateado
Resistencia a la fatiga	Se presenta para cargas cíclicas o permanentes mayores a 0.7 Kg mm ²
Recocida	Se mantiene 5° C arriba de la Temperatura de distorsión durante 2 a 4 h

Tabla I.2.Propiedades Cuantitativas del ABS (Techno Polymer).

REOLOGICAS	Método ISO	Unidades	Valor
Índice de fluidez (220 °C/10 Kg),	1133	cm ³ /10min	10,15
FISICAS	Método ISO		Valor
Densidad	1183	g/cm ³	1,11
Adsorción de agua 23 °C	similar al ISO 62	%	0,95
MECANICAS	Método ISO		Valor
Módulo de tensión, 23 °C	527	MPa	220
Tensión de rotura 23°C	527	MPa	44
Alargamiento a la tracción (50 mm/min) 23 °C	527	%	2,4
Alargamiento a la tracción hasta la rotura (50 mm/min),	527	%	12
Tensión a la flexión, 23 °C	178	MPa	65
IMPACTO	Método ISO		Valor
Resistencia al impacto Izod 23 °C	180	kJ/m ²	22
Resistencia al impacto Charpy con entalla 23 °C	179	kJ/m ²	19
Resistencia al impacto Charpy sin entalla 23 °C	179	kJ/m ²	125
TERMICAS	Método ISO		Valor
HDT A (1.8 MPa)	75	° C	94
HDT B (0.45 MPa)	75	° C	99
Coefficiente de expansión térmica lineal, longitudinal	ISO 11359-1/-2	mm/mm °C	0.95 x10 ⁻⁴
Temperatura de reblandecimiento Vicat VST/B/50	306	°C	95
ELECTRICAS	Método ISO		Valor
Resistividad volumétrico	IEC 60093	Ohm*m	>1E13
Resistencia eléctrica, Tiempo corto, 1.5 mm	IEC 60243-1	kV/mm	38

INFLAMABILIDAD	Método ISO	Valor
Inflamabilidad, espesor de 1.5mm	UL94	Categoría HB
Máxima temperatura en servicio (ciclo corto de trabajo)		°C 80
PROCESABILIDAD	Método ISO	Valor
Procesabilidad: moldeo por inyección (M), Extrusión (E), Soplado (B)		M
Temperatura de secado		°C 80
Tiempo de secado	H	2 - 4
Temperatura de inyección		°C 180 - 260
Temperatura del molde		°C 30 - 70
Contracción en moldeo, longitudinal		% 0,4 - 0,7

1.1.5 Usos y aplicaciones

Los termoplásticos ABS se pueden utilizar en infinidad de sectores. Dos sectores importantes son el del automóvil y los electrodomésticos.

Automóviles. El ABS se caracteriza por ser un material muy fuerte y liviano, lo suficientemente fuerte como para ser utilizado en la fabricación de piezas para automóviles. El empleo de plásticos, como ABS, hace más livianos a los automóviles, lo que promueve una menor utilización de combustible. Se utiliza tanto en el interior: el panel de instrumentos, consolas, cobertores de puertas y otras partes decorativas del interior. Como en aplicaciones del exterior del automóvil: la parrilla del radiador, cuna de faros, alojamiento del espejo. Un automóvil puede llegar a tener más de 12 kg de ABS.

Electrodomésticos. En recubrimiento interior y exterior de las puertas de frigoríficos. En carcasa de aparatos eléctricos como televisores, teléfonos, ordenadores, taladros, radios, aspiradoras, máquinas de coser, secadores de pelo, etc. El ABS puede tener diferentes combinaciones de colores. También puede ser cromado por electrólisis, estampado o metalizado. Dependiendo del molde utilizado, las superficies pueden ser opacas, brillantes o satinadas.



Figura I.6. Aplicaciones del ABS.

En la Figura I.6. Aplicaciones del ABS.(tecnologiadelosplasticos.com, zonaplastica.com, elpais.com) aparecen algunas imágenes de productos realizados con ABS.

1.2 Poliestireno

El poliestireno es uno de los plásticos más utilizados en la vida diaria debido a que es un material económico y resistente, probablemente sólo sea superado por el polietileno. En este trabajo se empleará Poliestireno de alto impacto (HIPS) que es una variedad de ABS, que ha sido “reforzado” con moléculas de Polibutadieno como se explicará a posteriori.

1.2.1 Estructura del PS

El poliestireno se obtiene calentando etilbenceno en presencia de un catalizador para conseguir el estireno. La polimerización del estireno requiere la presencia de una pequeña cantidad de un iniciador, como son los peróxidos. Los peróxidos permiten la formación de radicales que ayudan a la unión de los monómeros (Figura I.7. Proceso de polimerización del PS).



Figura I.7. Proceso de polimerización del PS

El producto obtenido de la polimerización del estireno puro se le denomina poliestireno cristal, que es transparente, duro y frágil. Es vítreo a temperaturas inferiores a los 100°C y por encima de esta temperatura es fácilmente procesable (Figura I.8. Estructura del PS cristal.).

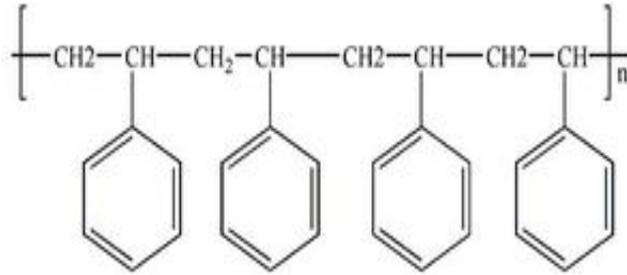


Figura I.8. Estructura del PS cristal.

Si la polimerización por radicales libres del estireno se agrega caucho Polibutadieno (Figura I.9. Estructura del HIPS) el material obtenido es poliestireno de alto impacto (HIPS). La estructura obtenida es una cadena de poliestireno con cadenas de Polibutadieno que emergen de ella. Estas cadenas son altamente beneficiosas para el poliestireno, ya que aunque el Polibutadieno no se combine con el poliestireno forma pequeñas bolitas que están unidas al poliestireno permitiendo absorber energía cuando el polímero es golpeado con algo, confiriendo una resistencia superior al poliestireno normal.

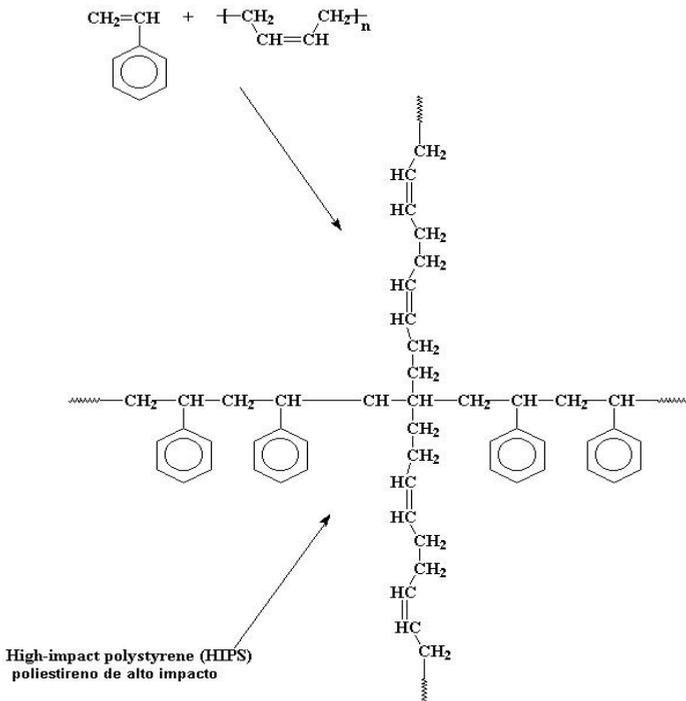


Figura I.9. Estructura del HIPS.

1.2.2 Identificación del PS

Las piezas que están fabricadas con material PS deben estar marcadas de acuerdo con la norma ISO 11469 (DIN 58840), El número 6 y las siglas PS indican que se trata de poliestireno. El triángulo con flechas indica que se trata de un plástico reciclable (en ningún caso significa que el objeto esté hecho con plástico reciclado), Figura 1.10. Identificación del PS(edu.jccm.es).



Figura I.10. Identificación del PS.

1.2.3 Propiedades

Propiedades mecánicas

La resistencia al impacto y otras propiedades del poliestireno pueden variar dentro de amplios márgenes, por causa del tipo, cantidad, forma y distribución de la fase de caucho en la estructura del material soporte.

Tabla I.3. Comparativa propiedades mecánicas PS y HIPS.

Propiedad	PS	HIPS
Modulo elástico en tracción(GPa)	3,0 a 3,4	2,0 a 2,5
Alargamiento de rotura en tracción (%)	1 a 4	20 a 65
Carga de rotura en tracción(MPa)	40 a 60	20 a 35
Módulo de flexión(GPa)	3,0 a 3,4	1,6 a 2,9
Resistencia al impacto Charpy(kJ/m ²)	2	3 a 12
Dureza Shore D	85 a 90	60 a 75

Los HIPS tipos SB que tienen un 3 % de caucho, se consideran medianamente resistentes al impacto. Los que tienen entre un 3 y un 10 %, se consideran de alto impacto y los que tienen del 10 al 15 % se consideran superresistentes. Para obtener un poliestireno resistente al impacto y completamente transparente se necesita copolimerizar en forma de láminas finas de aproximadamente 0,4 milímetros. En la Tabla I.4. Propiedades del Polystyrol 454C de BASF. se referencian las propiedades típicas del HIPS que se detallan a continuación.

Propiedades térmicas

El poliestireno presenta la conductividad térmica más baja de todos los termoplásticos. La conductividad térmica del HIPS está sobre 0,18 W/m·C. Para disminuir la conductividad térmica, se inyecta gas en su interior. Así, las espumas rígidas de poliestireno XPS presentan valores de conductividad, incluso menores de 0,03 W/m·C, por lo que se suele utilizar como aislante térmico. Sin embargo, tiene relativamente poca resistencia a la temperatura, ya que reblandece entre 85 y 105 °C (el valor exacto depende del contenido en aceite mineral).

Propiedades ópticas

Los materiales plásticos pueden ser opacos: (no dejan pasar la luz), transparentes (dejan pasar la luz) o traslúcidos (dejan pasar parte de la luz). El HIPS es completamente opaco aunque que algunos fabricantes venden grados especiales de poliestireno traslúcidos. Por el contrario el PS cristal es completamente transparente y tiene un índice de refracción en torno a 1,57, similar al del policarbonato y el PVC.

Las mezclas de HIPS o PS antichoque como también se le llama vulgarmente y PS cristal son más traslúcidas pero también más frágiles cuanto más PS cristal contienen. Es posible encontrar un equilibrio entre ambas propiedades de forma que los objetos fabricados, por ejemplo vasos desechables, sean transparentes a la vez que resistentes de manera aceptable.

Propiedades eléctricas

El poliestireno tiene una conductividad eléctrica muy baja (valores entre 10 y 16 S·m⁻¹), es decir, es un aislante. Por sus propiedades suele usarse en las instalaciones de alta frecuencia.

Tabla I.4. Propiedades del Polystyrol 454C de BASF.

REOLOGICAS	Método ISO	Unidades	Valor
Índice de fluidez (200 °C/5 Kg),	1133	cm ³ /10min	13,1
FISICAS			
Densidad	1183	g/cm ³	1,04
Adsorción de agua 23 °C	similar ISO 62	al %	<0,1
MECANICAS, 23 °C			
Tensión hasta la deformación	527	MPa	25
Tensión de rotura	527	MPa	20
Alargamiento a la tracción hasta la rotura (50 mm/min),	527	%	45
Tensión a la flexión	178	MPa	2200
IMPACTO			
Resistencia al impacto Izod con entalla	180/1A	kJ/m ²	9,5
DUREZA			
Dureza Rockwell	ISO 2039-2	-	R 78
TERMICAS			
HDT sin recocer (1.8 MPa)	75	° C	68
HDT recocido (1.8 MPa)	75	° C	80
Coefficiente de expansión térmica lineal, longitudinal	ISO 11359	mm/mm °C	0.91 x10 ⁻⁴
Temperatura de reblandecimiento Vicat VST/B/10	ISO 306	°C	92
Temperatura de reblandecimiento Vicat VST/B/50	ISO 306	°C	83
ELECTRICAS			
Resistividad volumétrico	IEC 60093	Ohm*m	>10E13
Resistencia eléctrica	IEC 60243-1	kV/mm	150
INFLAMABILIDAD			
Inflamabilidad, espesor de 1.5mm	UL94	categoría	HB
Máxima temperatura en servicio (ciclo corto de trabajo)		°C	80
PROCESABILIDAD			
Procesabilidad: moldeo por inyección (M), Extrusión (E), Soplado (B)			M
Temperatura de inyección		°C	180 - 260
Temperatura del molde		°C	20 - 60
Contracción en moldeo, longitudinal		%	0,21 - 0,65

1.2.4 Usos y aplicaciones

El poliestireno choque o HIPS se utiliza principalmente en la fabricación de objetos mediante moldeo por inyección. Algunos ejemplos son: carcasas de televisores y aparatos de radio, impresoras, carcasas de aspiradoras, piezas diversas de cámaras fotográficas, ventiladores, revestido de máquinas, secadores, partes interiores de frigoríficos, proyectores, maquinillas de afeitarse desechables, tablero de a bordo de automóviles, revestidos de volantes, guanteras, envases sin retorno para alimentos, productos farmacéuticos y cosméticos, y para artículos técnicos, cajas apilables, fregaderos, accesorios y armarios para baño, muebles de poco tamaño, cajones, apliques, maletas, vajilla desechable, cajas para cubertería y para pan, bolígrafos,



Figura I.11. Aplicaciones del HIPS.

archivadores, tacones de zapatos, cajones para almacenar diapositivas, juguetes, etc. Según las aplicaciones se le pueden añadir aditivos como por ejemplo sustancias ignífugas o colorantes. En la Figura I.11. Aplicaciones del HIPS(wikipedia.org., lexmark-emea.com, maxiproducts.es, senoplast.com) aparecen algunas imágenes de productos fabricados con HIPS.

1.3 Polietileno (PE)

El polietileno o polieteno (abreviado PE) es el plástico más común. La producción anual es de aproximadamente 110 millones de toneladas métricas (2013 www.diquima.upm.es). Su principal uso es el de embalajes (bolsas de plástico, películas y láminas de plástico, geomembranas, contenedores incluyendo botellas, etc.) Existen muchos tipos de polietileno, pero casi siempre presenta la fórmula química $(C_2H_4)_n$. El PE es generalmente una mezcla de compuestos orgánicos similares que difieren en el valor de n. Una molécula del polietileno no es nada más que una cadena larga de átomos de carbono, con dos átomos de hidrógeno unidos a cada átomo de carbono (Figura I.12. Estructura del Polietileno.) (www.textoscientificos.com/).

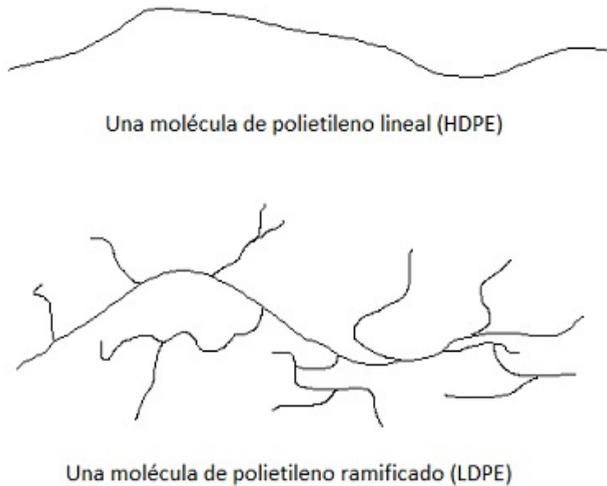


Figura I.12. Estructura del Polietileno.

A veces algunos de los carbonos, en lugar de tener hidrógenos unidos a ellos, tienen asociadas largas cadenas de polietileno. Esto se llama polietileno ramificado, o de baja densidad, o LDPE (del inglés low density polyethylene). Cuando no hay ramificación, se llama polietileno lineal, o HDPE. El polietileno lineal es mucho más fuerte que el

polietileno ramificado, pero el polietileno ramificado es más barato y más fácil de fabricar, (wikipedia.org).

El polietileno se clasifica en diversas categorías basadas en el tipo de ramificaciones y la densidad. Sus propiedades mecánicas dependen de tales variables y afectan al peso molecular, estructura cristalina y la extensión. Los polietilenos más característicos son el HDPE, LLDPE y el LDPE, aunque existen más variedades. A continuación se citarán los polietilenos más empleados:

- Polietileno de ultra alto peso molecular(UHMWPE)
- Polietileno de ultra bajo peso molecular (ULMWPE o PE-WAX)
- Polietileno de alto peso molecular (HMWPE)
- Polietileno de alta densidad (HDPE)
- Polietileno de alta densidad reticulado (HDXLPE)
- Polietileno reticulado (PEX o XLPE)
- Polietileno de media densidad (MDPE)
- Polietileno de baja densidad lineal (LLDPE)
- Polietileno de baja densidad (LDPE)
- Polietileno de muy baja densidad (VLDPE)
- Polietileno clorado (CPE)

1.3.1 Estructura del PE

El polietileno se obtiene a partir del monómero etileno (nombre IUPAC: eteno). El polietileno tiene la fórmula C_2H_4 , que consiste en un par de grupos metilenos (CH_2) conectadas por un enlace doble (Figura 1.13. Polietileno.).

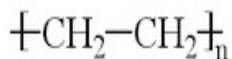


Figura 1.13. Polietileno.

El etileno debe ser de gran pureza debido a que los catalizadores son altamente reactivos. Las especificaciones típicas indican que debe tener menos de 5 ppm de contaminantes entre agua, oxígeno, nitrógeno, etano (precursor común para etileno), y el metano. Generalmente la producción de etileno es a partir de fuentes petroquímicas, pero también puede ser generada por la deshidratación de etanol.

1.3.2 Identificación del PE

Las piezas que están fabricadas con material LDPE deben estar marcadas de acuerdo con la norma ISO 11469 (DIN 58840), El número 4 y las siglas LDPE indican que se trata de polietileno de baja densidad. El triángulo con flechas indica que se trata de un plástico reciclable (en ningún caso significa que el objeto esté hecho con plástico reciclado), (Figura I.14. Identificación del LDPE.)(edu.jccm.es).



Figura I.14. Identificación del LDPE.

1.3.3 Propiedades

Propiedades físicas

El polietileno es un polímero termoplástico que consiste en largas cadenas de hidrocarburos. La temperatura de fusión y la de transición vítrea pueden o no ser observables (cambian para cada tipo de polietileno) y dependen de la cristalinidad y el peso molecular. Los rangos del punto de fusión de polietilenos comerciales comunes de media y alta densidad están de 120 °C a 130 °C. El punto de fusión promedio del polietileno de baja densidad comercial oscila entre 105 °C a 115°C. En la Tabla I.5. Propiedades del LDPE Asahi Kasei Chemicals Corporation (www.repsol.com) aparecen las propiedades del LDPE.

Propiedades químicas

La mayoría de los grados de polietilenos de baja, media y alta densidad tienen una excelente resistencia química, lo que significa que no es atacado por ácidos fuertes o bases fuertes. También es resistente a los oxidantes suaves y agentes reductores. La forma de quemarse del polietileno es de forma lenta, aparece una llama azul que tiene una punta de color amarillo y desprende un olor a parafina. El polietileno continúa

ardiendo con la eliminación de la fuente de llama y produce un goteo. El polietileno (aparte del polietileno reticulado) generalmente se puede disolver a temperaturas elevadas en hidrocarburos aromáticos, o en disolventes clorados.

Tabla I.5. Propiedades del LDPE Asahi Kasei Chemicals Corporation

Propiedades	Método	Unidad	Valor
Índice de fluidez (190 °C, 2.16kg)	ISO 1133	g/10 min	7,38
Densidad a 23°C	ISO 1183	g/cm ³	9,51
Resistencia al impacto (F50)	ISO 7765-1	g	70
Resistencia al rasgado (Elmendorf) (DM/DT)	ISO 6383-2	cN	150 / 60
Resistencia a la tracción en el punto de rotura (DM/DT)	ISO 527-3	MPa	23 / 20
Resistencia a la tracción en el punto de fluencia (DM/DT)	ISO 527-3	MPa	10 / 10
Alargamiento en el punto de rotura (DM/DT)	ISO 527-3	%	200 / 600
Tensión de flexión	ISO 527-3	MPa	690
Coefficiente de fricción (Dinámico)	ISO 8295	-	0.10
Brillo (45°)	ASTM 2457	D- -	60
Turbidez	ASTM 1003	D- %	8
Temperatura de reblandecimiento Vicat (carga 10 N)	ISO 306	°C	88
PROCESABILIDAD			
Procesabilidad: moldeo por inyección (M), Extrusión (E), Soplado (B)			M
Temperatura de inyección		°C	190 - 250
Temperatura del molde		°C	32 - 71
Contracción en moldeo, longitudinal		%	0,21 - 0,65

(*) Película de 30 µm de espesor, relación de soplado 2.25:1, altura de la línea de enfriamiento 40 cm

1.3.4 Usos y aplicaciones

El polietileno es uno de los productos de consumo masivo. Es muy utilizado en la industria del envasado de alimentos en forma de film, bolsas, botellas, vasos, botes, etc. El polietileno, particularmente el polietileno de alta densidad, a menudo se utiliza en sistemas de tuberías de la facilidad de montaje y a su resistencia al impacto. El Polietileno es procesado por todos los métodos de conformación de termoplásticos conocidos como son: inyección, extrusión, soplado, rotomoldeo, termoformado, etc.). Un caso particular es el del UHMWPE, que debido a su elevada dureza y difícil procesabilidad, tiene que ser extruido en planchas y barras, para finalmente ser procesado mediante algún proceso de mecanizado como el torneado y el fresado, aunque actualmente están apareciendo grados que son procesables por inyección.



Figura I.15. Aplicaciones del polietileno.

En la Figura I.15. Aplicaciones del polietileno(www.lookfordiagnosis.com, www.asfaltex.com, www.asfaltex.com, www.directindustry.es, <http://tecnihogar.es>) se muestran algunos ejemplos de productos fabricados con los distintos tipos de polietilenos.

1.4 Polipropileno (PP)

El polipropileno es el tercer plástico más comercializado del mundo, gracias a su bajo coste debido a que puede sintetizarse de materiales petroquímicos. Además, tiene un buen equilibrio de propiedades para producir muchos productos manufacturados, no se oxida, ni se deteriora, reduce la permeabilidad, es resistente a los ambientes alcalinos y ácidos, tiene buena tenacidad. El polipropileno se puede considerar uno de los termoplásticos más competitivos a día de hoy y no solo por sus buenas propiedades puede ser utilizado en diversos procesos de manufactura tales como la inyección, extrusión, moldeo por soplado y calandrado. También es apto para el termo conformado y conformado en frío.

1.4.1 Estructura del PP

El polipropileno es un polímero vinílico, parecido al polietileno, solo que uno de los carbonos de la unidad monomérica tiene unido un grupo metilo (Figura I.16. Monómero de polipropileno.)

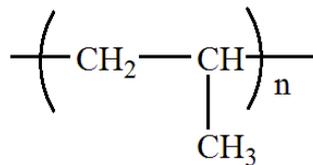


Figura I.16. Monómero de polipropileno.

El polipropileno fabricado de manera industrial es un polímero lineal, cuya espina dorsal es una cadena de hidrocarburos saturados. Cada dos átomos de carbono de esta cadena principal, se encuentra ramificado un grupo metilo (CH₃). Esto permite distinguir tres formas isómeras del polipropileno:

ningún caso significa que el objeto esté hecho con plástico reciclado) (Figura I.20. Identificación PP.) (edu.jccm.es).



Figura I.20. Identificación PP.

1.4.3 Propiedades del Polipropileno

Propiedades físicas

La densidad del polipropileno, está comprendida entre 0.90 y 0.93 gr/cm³. Por ser tan baja permite la fabricación de productos ligeros. Además debido a su densidad es capaz de flotar en el agua.

El PP tiene una excelente compatibilidad con el medio y es un material fácil de reciclar.

Propiedades mecánicas

El polipropileno tiene una buena resistencia superficial además de estabilidad dimensional, puede utilizarse en calidad de material para elementos deslizantes no lubricados.

El polipropileno es uno de los termoplásticos más rígidos que existen, es capaz de aguantar una carga de 25.5 kg/cm² durante 24 horas sin que se produzca una deformación apreciable. Posee una gran capacidad de recuperación elástica y una alta resistencia al impacto.

Propiedades eléctricas

La resistencia transversal es superior a 1016 Ω cm. Por presentar buena polaridad, su factor de pérdidas es bajo. Tiene muy buena rigidez dieléctrica.

Propiedades químicas

Debido a la naturaleza apolar del polipropileno, tiene una gran resistencia a agentes químicos y gran resistencia a soluciones de detergentes comerciales.

Además presenta poca absorción de agua, por lo tanto no presenta mucha humedad.

El polipropileno como los polietilenos tiene una buena resistencia química pero una resistencia débil a los rayos UV por tanto necesitan un agente estabilizante o protección previa.

Tabla I.6. Propiedades del PP Finalloy HXN-0340 de TOTAL PETROCHEMICALS.

Características principales			Trasparentes
REOLOGICAS			
Índice de fluidez (230 °C/2,16 Kg)	1133	cm ³ /10min	10,73
FISICAS			
Densidad	1183	g/cm ³	1,259
Adsorción de agua		%	
MECANICAS, 23 °C			
Tensión de rotura	527	MPa	
Alargamiento a la tracción hasta la rotura (50 mm/min),	527	%	
Tensión a la flexión	178	MPa	1918
IMPACTO			
Resistencia al impacto Izod con entalla	180/1A	kJ/m ²	-
DUREZA			
Dureza (Shore A)	D 2240	-	
PROCESABILIDAD			
Procesabilidad: moldeo por inyección (M), Extrusión (E), Soplado (B)			M
Temperatura de inyección		°C	200-270
Temperatura del molde		°C	15 - 75
Contracción en moldeo, longitudinal		%	-

1.4.4 Usos y aplicaciones

El polipropileno es uno de los termoplásticos con mayor ámbito de aplicación debido a su excelente procesabilidad y resistencia a la carga, buena estabilidad térmica. Las principales aplicaciones en las que se emplean el polipropileno son en el sector alimentario, en automoción, mobiliario en la medicina y en la industria farmacéutica.



Figura I.21. Aplicaciones del polipropileno.

1.5 Procedimientos y métodos a emplear

1.5.1 Secado previo de la granza

La operación de secado se realiza en un deshumidificador (MDEU1/10 de Industrial y Comercial Marse S.L.®, Barcelona España). Para el ABS se ha utilizado la temperatura de 80 °C y un tiempo de 4 horas. El LDPE, el HIPS y PP debido a su carácter no higroscópico no han necesitado secado.

1.5.2 Fundamentos de la técnica

Debido a que el ABS es un material higroscópico, o sea, absorbe agua cuando está en contacto con la humedad que existe el aire libre, es necesario usar el deshumidificador para eliminarla. Para una realización correcta tanto de los ensayos reológicos, térmicos y de transformación de los materiales por inyección, los niveles de humedad tienen que ser bajos, inferiores al 0,02%. El LDPE, el HIPS y el PP no son higroscópicos y por lo tanto no han necesitado secado. En la Figura I.22. Deshumidificador del laboratorio de materiales. En la Figura I.23 se observa la inyectora empleada del laboratorio de procesos de fabricación.



Figura I.22. Deshumidificador del laboratorio de materiales.

1.6 Procesado de las mezclas por inyección

1.6.1 Descripción del equipo de inyección.

Para la conformación de los polímeros estudiados se ha empleado el proceso de moldeo por inyección. La máquina de inyección utilizada es el modelo Mateu & Solé Meteor 270/75 (Barcelona, España), cuyas principales características se muestran en la Tabla I.7. Principales características de la máquina de inyección Mateu & Solé, modelo Meteor 270/75 y la fotografía se muestra en la Figura I.23. Inyectora del laboratorio de procesos de fabricación.

La máquina de inyección es la encargada de obtener piezas con la forma deseada a partir de material plástico granulado también llamado “granza”. Para ello la inyectora aporta calor al material de alimentación hasta transformarlo en un estado visco-elástico, con una fluidez que permite ser inyectado en un molde cerrado y así poder obtener la pieza deseada.

La granza de los materiales ensayados es colocada en la tolva de alimentación, que conecta con la cámara interior, de forma que el producto entra a la zona de plastificación por gravedad.

Una vez cargado el material, este es plastificado por el tornillo sin fin, que después actúa como un émbolo empujando el material fundido a la cámara de inyección desde donde llega al molde a través de una boquilla.



Figura I.23. Inyectora del laboratorio de procesos de fabricación.

Para graduar la cantidad de material que se desea inyectar, se utiliza la unidad de control. Esta unidad controla el recorrido del tornillo expresado en décimas de milímetros

La máquina dispone de un sistema de cierre hidráulico-mecánico mediante rodilleras que se encarga de realizar los movimientos de cierre y apertura. Este sistema es capaz de soportar los elevados esfuerzos aparecidos, debido a las altas presiones de trabajo que se generan durante el proceso de inyección.

Tabla I.7. Principales características de la máquina de inyección Mateu & Solé, modelo Meteor 270/75

Grupo de inyección	Diámetro del husillo [mm]:	35
	Presión máxima de Inyección [bar]:	1735
	Volumen teórico de Inyección [cm ³]:	155
	Velocidad regulable del husillo [min ⁻¹]:	252
	Par de giro del husillo [Nm]:	4+1
	Potencia de calefacción [kW]:	9,58
Grupo de cierre	Fuerza de cierre [kN (Tm)]:	750 (75)
	Carrera máxima de apertura mm:	320
	Espesor mínimo de molde [mm]:	150
	Paso entre columnas H x V [mm]:	380x300
	Fuerza máxima de expulsión [Kn]:	23
	Carrera máxima de expulsión [mm]:	100
Otros parámetros	Ciclos en vacío (Euromap 6a) [min ⁻¹]:	33
	Potencia total instalada [kW]:	24,58
	Peso neto de la máquina [kg]:	4200

1.6.2 Tipos de procesos de inyección aplicables

El moldeo por inyección es una de las técnicas de procesado de plásticos más comunes para la obtención de productos plásticos, permite obtener una amplia gama de objetos ya sea desde vasijas, carcasas de teléfonos, etc. hasta formas de gran complejidad como clavijas de telefonía.

Las piezas proporcionadas por el moldeo de inyección presentan superficies limpias y lisas, tienen un alto aprovechamiento del material de partida y pueden ser producidas a un ritmo muy elevado. Por el contrario algunas veces, las piezas deben ser acabadas o refinadas posteriormente.

El moldeo por inyección requiere temperaturas y presiones más elevadas que otras técnicas de transformación. La técnica del moldeo por inyección se basa en inyectar un polímero fundido en un molde cerrado y frío, donde se solidifica para obtener el producto. La pieza moldeada se recupera al abrir el molde para extraerla.

El moldeo por inyección es el proceso básico para trabajar con un solo material, a la hora de trabajar con varios termoplásticos se han desarrollado diferentes procesos basados en el proceso inyección.

Bi-inyección

Técnica en la que se llena simultáneamente, la cavidad, con dos componentes distintos que proceden de dos puntos distintos de inyección (Figura I.24. Proceso de bi-inyección.). El mayor inconveniente de la bi-inyección es el control de la línea de soldadura, que se produce al encuentro de los dos componentes.

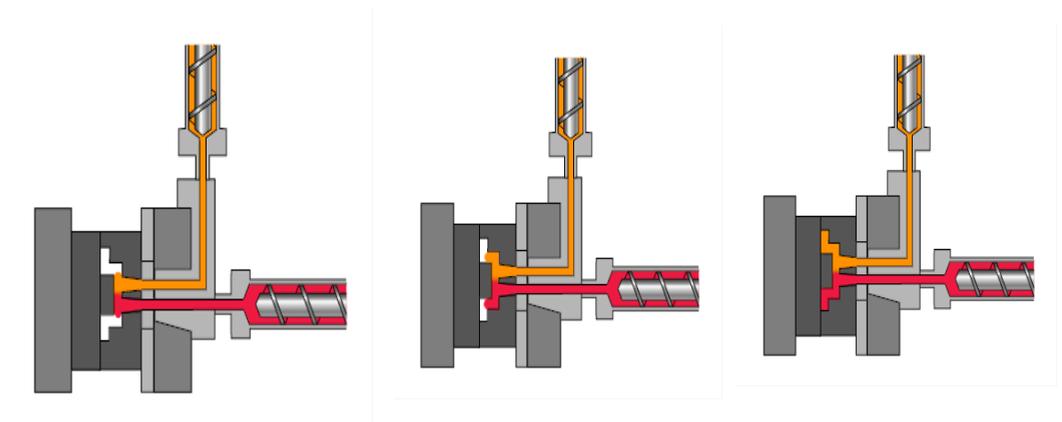


Figura I.24. Proceso de bi-inyección.

Sobremoldeo

Técnica utilizada para inyectar componentes de forma secuencial. La pieza inyectada se consigue en dos fases diferenciadas:

- La primera, se inyecta el primer componente
- La segunda, el molde o la pieza gira y se inyecta el segundo componente.

Co-inyección

Es una variante del proceso de moldeo por inyección multi-material de dos componentes, esta técnica permite encapsular completamente uno de los componentes inyectados, el proceso consiste en una serie de inyecciones secuenciales de dos componentes diferentes a través de la misma tobera, de manera que el segundo componente queda encapsulado por el primero. Es importante a la hora de aplicar esta técnica que los materiales sean compatibles entre sí, es decir que sus temperatura de fusión y viscosidades sean similares.

Existen tres modalidades de co-inyección:

Inyección secuencial

Se inyectan los componentes de manera alterna. Existen diversas técnicas para conseguirlo:

- **Técnica del canal único:** Primero se inyecta el material de la piel y después el material del núcleo. En el punto de cambio de un material a otro se produce una caída de presión en el molde, esto es una limitación de la técnica pudiendo producir defectos en la superficie de la pieza. Se utiliza para secciones gruesas, y los espesores de los materiales se controlan mediante parámetros de inyección y las viscosidades.
- **Técnica de la inyección de doble flujo:** o también denominado two-shot o multi-shot injection, permite la inyección de dos o más materiales en el mismo molde y en el mismo ciclo de inyección. Sus principales ventajas es que permite la reducción de los tiempos del ciclo de moldeo, consiguiendo una

mejor calidad de pieza y reduciendo los costes de mano de obra, por contra requiere de una máquina de inyección especial equipada con dos o más módulos de inyección.

- **Técnica del Monosándwich:** En esta técnica se introduce los componentes mediante una inyectora estándar. Se consigue mediante la fusión del material de la piel a través de una extrusora, este material fundido es conducido gracias a un sistema especial de cámara caliente a la parte delantera del husillo de la inyectora, dicho material fundido empuja el husillo hacia atrás. Cuando en el husillo de ha acumulado el suficiente material, el husillo empieza a girar para alimentar el material del núcleo, una vez plastificado el material del núcleo, la inyectora introduce los dos materiales en el molde de forma convencional.

Inyección simultánea:

Se inyectan los dos componentes de manera simultánea en un periodo corto de tiempo.

- **Técnica de dos canales:** Inicialmente en este proceso se inyectaría plástico fundido del material de la piel en la cavidad, después de 0.1-0.3 segundos, el núcleo es inyectado y durante un momento hay una inyección simultánea de ambos componentes. El material del núcleo es el que desplaza al material de la piel contra las paredes de la cavidad donde se enfría y se solidifica. En la etapa final, se inyecta material del núcleo aunque a veces se inyecta material de la piel para encapsular el núcleo y cerrar la pieza. Se usan dos unidades de inyección, las cuales se juntan a través de una boquilla especial. La fase de inyección simultánea de la piel y el núcleo evita problemas producidos por la técnica de canal único, ya que mantiene constante la velocidad del flujo.

Inyección combinada

Se puede considerar secuencial o simultánea dependiendo de la programación de la fase de inyección.

- **Sándwich:** Técnica que requiere dos unidades de plastificación y de un dispositivo que controle la conmutación de los dos flujos. Las dos unidades inyectoras están conectadas a una boquilla especial y desde allí se inyectan al molde. Está dividida en tres fases:

En la Figura I.25. Proceso de inyección sándwich se muestra como en la etapa (a) se llena la cavidad parcialmente de material de la piel, después en la etapa (b) se inyecta el componente del núcleo a través del alma plástica del material incorporado. Por

último, la etapa (c) con el primer componente se produce el cierre del bebedero. Dependiendo de la programación de la fase de la inyección de cada una de las inyectoras se puede tener inyección secuencial o simultánea.

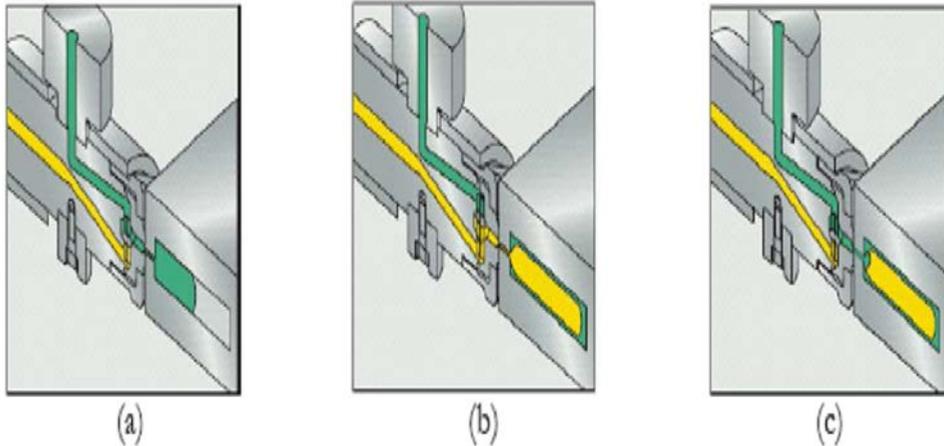


Figura I.25. Proceso de inyección sándwich

1.7 Aspecto básico para el diseño de piezas

A la hora del diseño de una pieza mediante un proceso de inyección de sobremoldeo hay que tener en cuenta una serie de consideraciones para conseguir un buen acabado de la pieza además de cumplir con las tolerancias dimensionales establecidas.

El espesor de pared del sustrato y de la pieza fabricada por sobremoldeo debe ser lo más uniforme posible para obtener el menos tiempo de ciclo de moldeo posible. Un espesor de pared de entre 1.5 mm a 3 mm asegurará una buena adhesión en la mayoría de las aplicaciones de sobremoldeo.

Las transiciones entre distintos espesores de pared deben ser lo más graduales posibles para evitar problemas de flujo como atrapamientos de aire. Además se evitará el uso de esquinas vivas y se sustituirán por radios para reducir tensiones.

También se evitará zonas profundas y costillas innecesarias y las partes ciegas sin posibilidad de venteo. Si el perfil es demasiado largo se le dotará de un ángulo de 3 a 5° para facilitar su eyección.

1.7.1 Longitud de Flujo y Espesor de Pared

Hay dos factores especialmente, que afectan a la longitud máxima de flujo alcanzable: las características de flujo del material y las condiciones usadas en el proceso de sobremoldeo. Las características del flujo de un termoplástico pueden cuantificarse mediante la realización de una prueba de flujo en espiral.

Para aplicaciones que precisen un alto nivel de adhesión entre materiales es recomendable utilizar longitudes de flujo cortas (menos de 20 cm.). En caso de tener que utilizar longitudes mayores con poca adhesión se puede optar por uniones mecánicas entre los dos materiales, modificando el diseño de ambas partes.

1.7.2 Contracción del material

La contracción de material al terminar el ciclo de moldeo puede variar de forma sustancial en función de un material a otro. Lo valores típicos en termoplásticos en su dirección de flujo se sitúa entre el 1 y el ,5% mientras que en dirección cruzada se sitúa del 0,5 al 1,5%.

Estos valores son orientativos, ya que el valor de contracción depende extremadamente del material escogido, el diseño de pieza, el diseño del molde y de las condiciones del proceso de inyección utilizadas para moldear la pieza. Es recomendable el prototipado y estudio de cualquier pieza de sobremoldeo para predecir con total seguridad los efectos de la contracción en la pieza.

1.7.3 Resolución de problemas con sobremoldeo

Problema: Marcas lineales en superficie y brillo desigual.

Possible Causa	Solución
Compuestos de alto peso molecular en moldes muy pulidos.	Ajustar la velocidad de flujo y la presión en la primera etapa de inyección. Cambiar a un componente de menor peso molecular. Texturizar la superficie del molde (Electroerosión, arena, etc.)

Problema: Burbujas internas en la pieza

Posible Causa	Solución
Temperatura de masa demasiado alta (velocidad de inyección demasiado rápida).	Temperatura de masa menor. Velocidad de Inyección menor.
Humedad en el material	Secado adecuado del material antes de su procesamiento. Verificar el equipo periférico de secado y transporte a la tolva de alimentación.
Plástico en el molde insuficiente para impedir una contracción producida por bordes o nervaduras.	Aumentar la alimentación Aumentar el tamaño de la entrada Aumentar presión de inyección.
Atrapamiento de Gas.	Incrementar tamaño de la puerta de inyección.

Problema: Bordes quemados

Posible Causa	Solución
Venteo inadecuado.	Velocidad de inyección demasiado baja. Añadir puntos de venteo en el diseño del molde (0.13mm – 0.20mm de profundidad). Limpiar los puntos de venteo si están obstruidos.

Problema: Marcas de los Expulsores.

Posible Causa	Solución
Presión de compresión demasiado alta.	Reducir la presión de compresión final.
La pieza no está solidificada en su eyección.	Aumentar el tiempo de enfriado. Incrementar el flujo de agua/agente refrigerante durante el tiempo de enfriado.
Fuerza de eyección demasiado elevada.	Reducir temperatura del molde. Texturizar los eyectores y la superficie del molde para una mejor expulsión. Incrementar tamaño de los expulsores.

Problema: Olor a quemado y piezas con superficie amarilla

Posible Causa	Solución
---------------	----------

Degradación del material.	Reducir la temperatura de la masa fundida, especialmente en la parte trasera del cilindro. Reducir el tiempo del material en el cilindro a 2 minutos máximo. Reducir la temperatura del material en los sistemas de alimentación. Minimizar puntos muertos en canales de alimentación múltiples.
---------------------------	---

Problema: Dimensiones incorrectas.

Posible Causa	Solución
Empacamiento y compresión del material inapropiado.	Revisar las presiones de compresión. Revisar que se mantiene el efecto “colchón”.
Pérdida del control sobre el encogimiento.	Incrementar tiempo de enfriado. Revisar las dimensiones del molde.

Problema: Rebabas

Posible Causa	Solución
Presión de inyección demasiado alta.	Reducir la presión de inyección.
Cantidad de material por inyección demasiado grande	Reducir la cantidad de material por inyección.
Viscosidad del material demasiado baja.	Reducir la velocidad de inyección Reducir la temperatura de masa del TPE en 10°
Insuficiente fuerza de cierre.	Aumentar la presión de cierre. Verificar si la máquina es la adecuada para la presión necesaria por la pieza a inyectar.
Molde desajustado	Verificar la calibración del molde para su cierre.
Material sobrecalentado	Verificar el perfil de temperaturas del material. Disminuir la temperatura del molde.

Problema: Color no Uniforme

Posible Causa	Solución
Escasa Dispersión.	Asegurarse de que el complemento colorante es correcto o es usado correctamente.
Contaminación.	Sanear el cilindro

Limpiar el material retriturado en caso de usarlo.

Problema: Marcas del flujo y pliegues.

Possible Causa	Solución
Temperatura de la masa fundida es demasiado baja.	Incrementar temperatura de masa fundida.
Llenar de las zonas con espesores más estrechos a las zonas con espesores más anchos.	Reposicionar el punto de inyección a una sección más estrecha.
Irregularidad en la Superficie.	Se puede añadir una textura a la superficie en el diseño de la pieza y las cavidades del molde.
Secciones con llenado desigual.	Reposicionar el punto de inyección para equilibrar el flujo o reducir el diámetro de los canales de alimentación.

Problema: Deformaciones

Possible Causa	Solución
Encogimiento del material.	Incrementar el tiempo de enfriado.
Temperatura de la masa fundida demasiado alta.	Reducir temperatura del material.
Algunas áreas de la pieza son demasiado espesas, donde los rechupes pueden ocurrir.	Reducir espesor de la pieza.

Problema: Pieza pegada en la expulsión

Possible Causa	Solución
Presión de empaclado demasiado alta.	Reducir presión de compresión.
La pieza está demasiado caliente.	Incrementar tiempo total del ciclo. Reducir temperatura del molde.
Insuficiente fuerza de expulsión.	Incrementar el número de expulsores y su diámetro. Reducir la presión de inyección al final del proceso.
Expulsor pulido	Texturizar por arena.

Problema: Pieza pegada en la parte fija del molde

Possible Causa	Solución
Insuficiente fuerza de extracción.	Texturizar la cavidad. Incrementar el ángulo de salida.

Problema: Llenado incompleto

Possible Causa	Solución
Insuficiente carga de material.	Incrementar el tamaño de inyección. Asegurarse de que el cilindro de la máquina inyectora tiene suficiente capacidad para llenar la cavidad con el TPE. Reducir presión en el final del proceso.
Viscosidad del TPE demasiado alta.	Incrementar la velocidad de inyección. Incrementar la temperatura de la masa fundida.
Temperaturas no uniformes en el molde	Verificar y limpiar el sistema de refrigeración del molde.
Sistema de venteo en el molde obstruido	Limpieza de los sistemas de venteo
Diseño deficiente del molde	Corrección de entradas y corredores. Cambio de molde.

Problema: Rechupes

Possible Causa	Solución
Insuficiente presión durante la solidificación del material	Incrementa la presión y la velocidad del material en el tramo final de la inyección. Incrementar la puerta de entrada hasta un 40% del espesor de pared de la pieza Reposicionar el punto de inyección en la sección con más espesor.

Problema: Pieza Alabeada/Combada

Possible Causa	Solución
Altas tensiones de Moldeo.	Incrementar el tiempo de enfriado.
Contracción Moldeado.	Incrementar temperatura del TPE. Reducir presión en la última fase de la inyección.

Incrementar temperatura del molde.	
El sustrato es demasiado fino en comparación con el grosor del TPE	Aumentar el grosor del sustrato.

Problema: Adhesión deficiente.

Possible Causa	Solución
Velocidad de inyección demasiado lenta y temperatura de masa fundida demasiado baja.	Incrementar velocidad y temperatura del material en la inyección.
Contaminación	Comprobar la compatibilidad con los elementos colorantes.
Materiales incompatibles.	No utilizar agente desmoldeante y plásticos lubricados.

Problema: Rotura del Sustrato.

Possible Causa	Solución
Presión de Inyección y temperatura altas.	Reducir presión y temperatura en la primera fase de la inyección.
Fundición del sustrato.	Reducir temperatura de la masa fundida (reduciendo también la velocidad)
Posición del punto de inyección erróneo.	Colocar el punto de inyección en una zona donde el grosor de pared del sustrato sea alto.

1.7.4 Selección de la máquina inyectora

Actualmente las máquinas de inyección de termoplásticos son controladas por ordenador, son capaces de ajustar los parámetros críticos de moldeo y son más utilizadas para molde multi-cavidad y altos volúmenes de inyección. Estas máquinas permiten ser programadas con los parámetros de inyección, independientemente de la etapa de inyección, producen acabados mejores y piezas de mejor calidad. Las máquinas más antiguas solo disponen de control de posición o control de presión y/o tiempo

La fuerza de cierre del molde necesaria para propósitos generales es de mínimo de 10 a 50MPa, multiplicada por el área total proyectada de las cavidades y del sistema de canales de alimentación, aunque este valor puede ser mayor. Es recomendable usar

máquinas que utilicen del 25% al 75% de la capacidad del cilindro de inyección. Esto favorece el control de temperatura del material y el mínimo tiempo estático del material a altas temperaturas dentro del cilindro. Éste tiempo estático no debe ser de más de 4 o 5 minutos máximo.

En muchas aplicaciones multi-inyección, el flujo de inyección del termoplástico es considerablemente más pequeño que el del sustrato plástico. Si es posible es recomendable adaptar las dimensiones del cilindro para minimizar el tiempo del material estático.

1.8 Estado del arte

1.8.1 Tendencias actuales

Paralelamente al desarrollo de nuevos materiales plásticos, se ha producido una evolución en los procesos y equipos utilizados. En la década de los 50 las máquinas de inyección fueron similares a las actuales y se desarrolló la técnica de la extrusión por soplado. El sistema tubular de fabricación de bolsas fue desarrollado en la década de los 60. Las invenciones se continúan en 1970 se desarrollan las técnicas de inyección de espumas; en los 80 las de inyección soplado, y en la última década van ganando terreno técnicas como la coextrusión y la coinyección, es decir el procesado de varios materiales de forma simultánea.

El principal factor que ha impulsado este crecimiento es sin duda la facilidad y economía de transformación de los plásticos, en especial la de los termoplásticos, que permite la fabricación de grandes series; es por ello que el crecimiento en el uso de los plásticos se ha producido sobre todo en los productos de consumo: automoción, deporte.

Si se analiza el consumo de los diferentes tipos de plásticos que se producen se observa como el consumo se centra en unos pocos tipos de materiales, como son el HDPE, LDPE, PP, PS y PVC. Estos plásticos suponen más del 70 % del total de polímeros que se consumen en España.

La incompatibilidad de los polímeros es el principal obstáculo para la recuperación de materiales plásticos o su posible utilización en sistemas bi-material, ya que solo citando termoplásticos se encuentran cerca de 40 tipos de materiales. Esta incompatibilidad es debida fundamentalmente a cuestiones de proceso e interacción entre los materiales.

Cuando el material termoplástico presenta unas propiedades finales aceptables, pero por el contrario sus propiedades de proceso son variables (fluidez), se pueden originar retrasos en la producción y la necesidad de reajustes en su transformación. Esto puede suponer un perjuicio cuando se utilizan técnicas de transformación cuyo beneficio es muy sensible a la relación materia transformada/tiempo.

Cualquier propiedad de un material polimérico puede intentar mejorarse a través de un proceso de mezclado con el material apropiado. Su complejidad radica en la preparación de mezclas por los fenómenos de miscibilidad y su procesado. Si existe una similitud en cuanto a fluidez de ambos componentes, el procesado será relativamente sencillo, pero en aquellos casos en que exista una gran diferencia entre la fluidez de los dos componentes el proceso será más complejo y requerirá de la adición de determinadas materias para disminuir esta diferencia de fluidez y facilitar el procesado (www-plasticos.com).

El siguiente estudio trata del análisis de las mezclas de PP/PE, y ABS/HIPS para el proceso de coinyección. Así como las propiedades que ofrecen dichas mezclas a tracción, flexión y el estudio mediante el análisis mediante elementos finitos de dichas mezclas.

1.8.2 Fuentes de información consultadas

El objetivo del presente estudio es, a través de la búsqueda de documentación existente referida al campo de la investigación, es conocer aspectos tales como la viabilidad o el interés científico y social a lo largo del tiempo, así como conocer procedimientos para alcanzar con éxito los objetivos que se planteen. En base a estos requerimientos se cuestiona la viabilidad de adentrarse en el campo de las piezas de bimaternal termoplástico de polipropileno (PP) con polietileno (PE), y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) con el poliestireno de alto impacto (HIPS).

La realización del presente estudio bibliográfico sobre las piezas de bimateriales termoplásticos seleccionados, como se ha expuesto, tendrá como fin determinar la

idoneidad de adentrarse en este campo, sirviendo asimismo, dado el caso hipotético, como plataforma de apoyo para posteriores estudios.

Fuentes de información consultadas

En la actualidad existen múltiples bases de datos que permiten la realización de búsquedas de forma sencilla y práctica. Las diversas plataformas utilizan para sus búsquedas redes internas de distintas instituciones además de internet. Este hecho posibilita el acceso a la información de manera muy rápida y sin ninguna dificultad.

A continuación se exponen brevemente algunas de las múltiples bases de datos que se utilizarán para una búsqueda técnica de las características que se requiere, como por ejemplo Web of Science, EndNote, RefWorks, o PoliBuscador.

Web of Science

Web of Science es un servicio en línea de información científica, suministrado por Thomson Reuters, integrado en ISI Web of Knowledge, WoK. Facilita el acceso a un conjunto de bases de datos en las que aparecen citas de artículos de revistas científicas, libros y otros tipos de material impreso que abarcan todos los campos del conocimiento académico.

Permite acceder a publicaciones previas de una determinada investigación publicada a través del acceso a sus referencias bibliográficas citadas, o también a publicaciones que citan un documento determinado para descubrir el impacto de un trabajo científico sobre la investigación actual.

Por último, permite conectarse al texto completo de publicaciones primarias y otros recursos y acceder a ellos mediante un sistema de búsqueda basado en palabras clave.

Web of Science incluye tres grandes bases de datos multidisciplinares que incluyen ciencia, humanidades y artes (Science Citation Index (SCI), Social Sciences Citation Index (SSCI), y Arts & Humanities Citation Index (A&HCI)). Dos bases de datos especializadas en química orgánica e inorgánica (Index Chemicus y Current Chemical Reactions), y dos bases de datos de presentaciones de congresos y conferencias

(Conference Proceedings Citation Index: Science y Conference Proceedings Citation Index: Social Science and Humanities).

Estas bases de datos indexan el contenido de casi 10.000 revistas de ciencia, tecnología, ciencias sociales, artes, y humanidades, y más de 100.000 actas de conferencias y congresos. Se actualiza semanalmente.

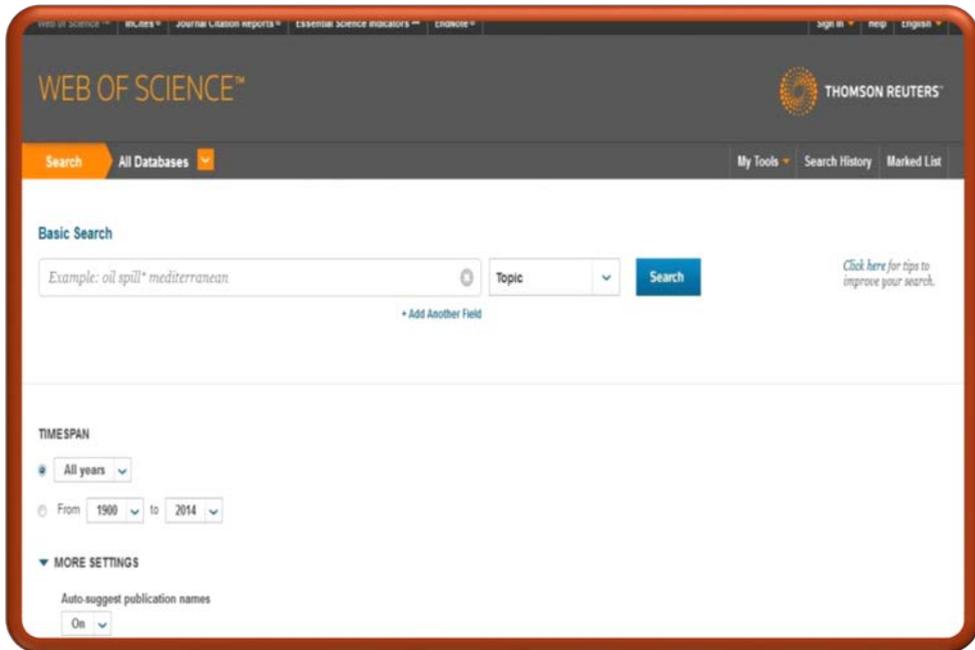


Figura I.26. Ejemplo interfaz Web of Science.

EndNote

EndNote Basic (anteriormente EndNote Web) es un programa de gestión de referencias bibliográficas en línea de Thomson Reuters.

El programa agrupa los datos bibliográficos en “librerías” con extensión de archivo “.enl” y una carpeta correspondiente de “.data”. Hay varias maneras de agregar una referencia a una biblioteca: manualmente, exportando, importando, etc.

El programa presenta al usuario una ventana que contiene un menú drop-down para seleccionar el tipo de referencia que se requiera (libro, artículo periodístico, película, etc.), y los campos asociados a este registro, tanto en general (autor, título, año, etc.)

como los relacionados con un tipo de referencia en particular (número de ISBN, publicaciones, duración, etc.).

Es posible exportar e importar referencias entre EndNote y otros programas. Esto permite al usuario manejar listados con múltiples referencias, ahorrando la tarea de la carga manual. En algunos servicios de indexación de bases de datos, como PubMed, o determinados buscadores, como Google Académico, es posible importar directamente las referencias de un artículo consultado.

Hay dos niveles de acceso diferentes a la cuenta de EndNote Basic: Acceso libre a través de Thomson Reuters, muy limitado, y acceso a través de la Web of Science, comentada anteriormente y restringida a usuarios registrados. En este último caso disponemos de todas las funcionalidades.

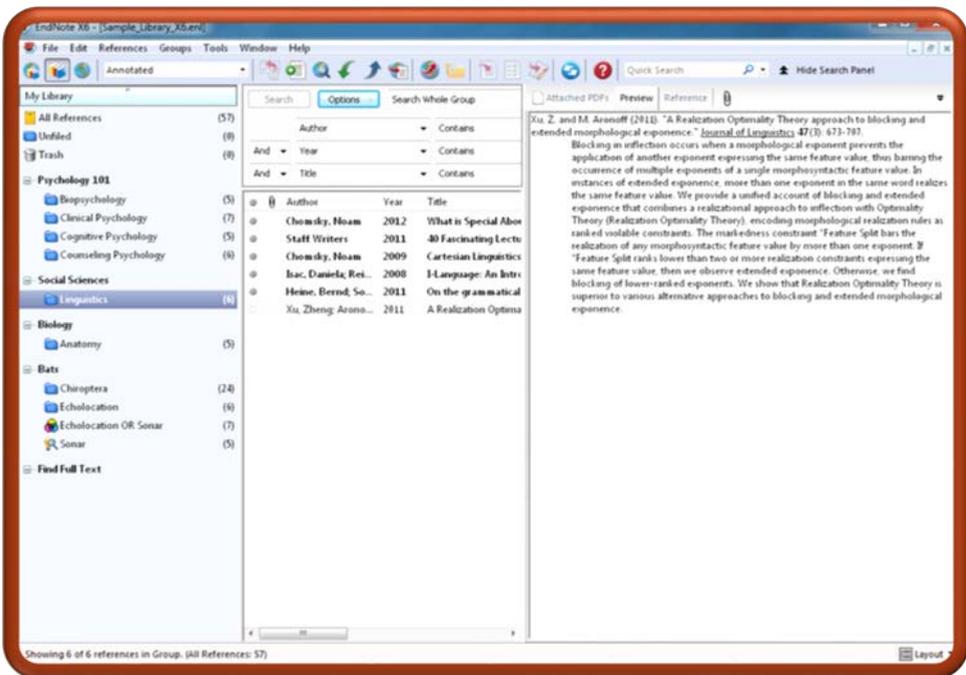


Figura I.27. Ejemplo interfaz EndNote.

RefWorks

RefWorks es una aplicación multilingüe en línea de gestión de datos bibliográficos.

Este buscador básicamente permite: Importar referencias desde múltiples fuentes de información, incluir citas a la hora de redactar un documento y crear una bibliografía en una amplia gama de formatos.

Dado que RefWorks es una aplicación web, al contrario que EndNote, no se requiere descargar ni actualizar ningún software, y se puede acceder a la cuenta personal desde cualquier PC conectado a internet.

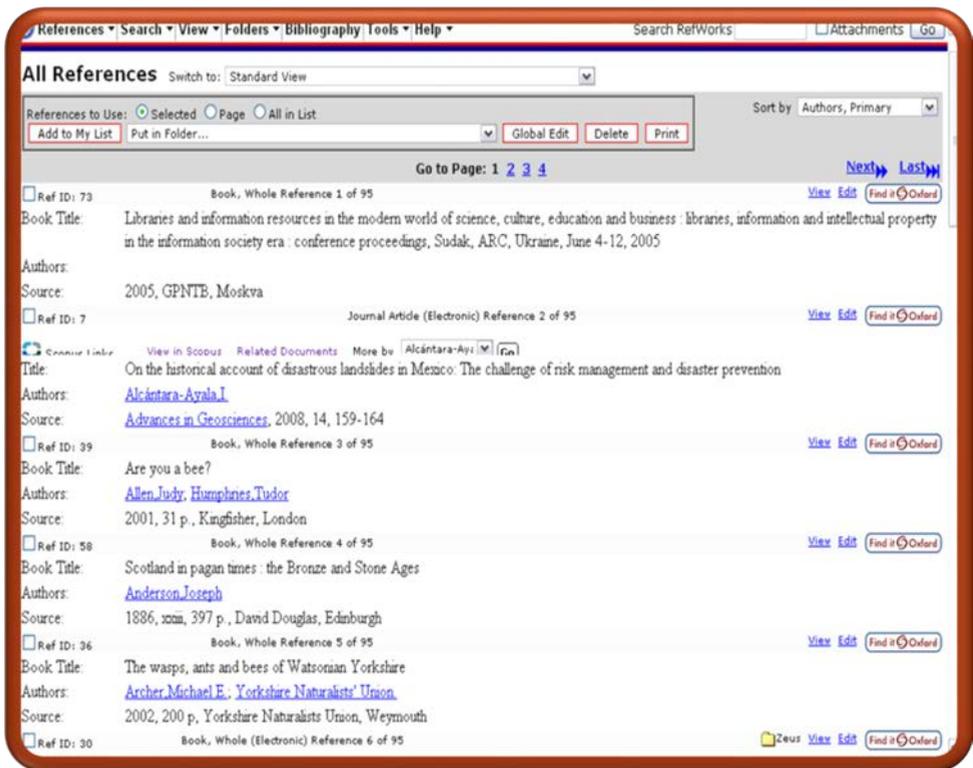


Figura I.28. Ejemplo de interfaz RefWorks.

PoliBuscador

Polibuscador es el buscador bibliográfico de la UPV. Se trata de un servicio en línea de información científica, con un método de búsqueda similar al de Google.

Desde una única caja de búsqueda, Polibuscador da acceso a múltiples recursos:

- Catálogo UPV: Libros impresos, materiales audiovisuales, material para préstamo (portátiles, espacios de trabajo, etc.).

- Riunet (Repositorio institucional de la UPV): Repositorio Institucional de la UPV que recoge la producción académica de la universidad. En él se pueden encontrar tesis, laboratorios virtuales, polimedias, PFC, etc.
- Primo Central: Base de datos comercial que contiene más de 400 millones de registros procedentes de decenas de miles de revistas, repositorios externos... Algunas de esas revistas están contratadas por la UPV, y, por tanto, permiten el acceso al texto completo.
- Libros-e: Libros electrónicos suscritos por la UPV.
- Revistas-e: Revistas electrónicas suscritas.

The screenshot shows the Polibuscador search interface. At the top, it features the logo of the Universitat Politècnica de València and the text 'Biblioteca y Documentación Científica'. The search bar contains 'Polypropylene' and 'Buscar'. Below the search bar, there are filters for 'Todos los registros', 'contiene las palabras', and 'Todos los campos'. The results section shows '108.262 Resultados para Todo' and a list of search results. The first result is 'Polypropylene' from 'Chemical Week, July 5, 2006, Vol. 168(23), p.25(1) [Revista Peer Reviewed]'. The second result is 'Polypropylene fibers, science and technology' by M. Ahmed, Amsterdam: Elsevier, 1982. The third result is 'POLYPROPYLENE' from 'Chemical Week, July 19, 2000, Vol. 162(27), p.42 [Revista Peer Reviewed]'. The fourth result is 'Fracture behaviour of polypropylene and polypropylene and polyamide montmorillonite nanocomposites'.

Figura I.29. Ejemplo de interfaz Polibuscador.

Proceso reglado utilizado

En el presente estudio, utilizando la gran cantidad de información que gestiona estas bases de datos para realizar las distintas búsquedas referentes a los estudios realizados sobre los bimatrimateriales que nos ocupan.

Los datos de partida para el estudio fueron los siguientes:

- Piezas de bimaterial termoplástico: PP-PE y ABS-HIPS.
- Método de procesado: Coinyección.
- Comportamiento a tracción.
- Validación: Método de elementos finitos (MEF).

Teniendo los datos de partida y una herramienta de gestión bibliográfica, se procede a la búsqueda de información. Para almacenar los datos de las búsquedas realizadas, se crea un documento en una hoja de cálculo de Microsoft Excel (documento adjunto). En ésta, almacenamos los enlaces a las búsquedas realizadas así como los datos más relevantes de éstas; el número de resultados. Dentro de cada una de las búsquedas, las bases de datos ofrecen diversos datos de interés para el estudio; tipo de recurso, año de publicación, idioma, materia, etc.

El proceso seguido para realizar la búsqueda de información respecto al tema planteado ha sido realizar búsquedas de forma progresiva, es decir, empezar buscando de forma generalista para poco a poco centrarse más específicamente en nuestro objetivo. Para ello resulta importante la selección de las palabras clave adecuadas para las distintas búsquedas.

Palabras clave de búsqueda

Las palabras clave seleccionadas para el estudio han sido las siguientes (obsérvese cómo a medida que se avanza se centra en el objetivo), duplicando cada búsqueda para realizarla en dos idiomas; español e inglés, el lenguaje científico por excelencia:

- Materiales: Búsqueda de información de cada uno de los cuatro materiales por separado.
- Procesos: Búsqueda de información de la coinyección. Además de una búsqueda sobre la inyección, proceso muy similar del que deriva la coinyección.
- Materiales + procesos: Combinación de cada uno de los materiales con los dos métodos de procesado.
- MEF: Búsqueda de información sobre este método de cálculo
- Materiales + MEF: Combinación de cada material con el método de cálculo.
- Procesos + MEF: Combinación de cada método de procesado con el método de cálculo.
- Ensayos: Búsqueda de información respecto a diversos ensayos que puedan ofrecer datos sobre el comportamiento a tracción y flexión de una pieza.
- Ensayos + materiales: Combinación de cada ensayo con cada uno de los materiales.
- Combinación materiales + proceso: Combinación del proceso de coinyección con los materiales que forman cada uno de los dos bimateriales.

Una vez se considere que se poseen suficientes datos, se puede dar la búsqueda por finalizada, y se procede al análisis de los resultados obtenidos.

Estudios estadísticos

Según lo observado en la “Web of Science”, el estudio de cada material por separado: PP y PE (figura I.30.), ABS y HIPS (figura I.31) presenta un continuo aumento con el transcurso de los años tal y como se corrobora en el informe de citas que proporciona la misma web. No obstante, al realizar un estudio bibliográfico de las mezclas bimateriales se ve que el interés decae con un índice de 2 artículos publicados al año para el ABS y HIPS (figura I.32), mientras que para el caso de PP y PE (figura I.33) el índice se encuentra alrededor de 12 artículos al año. Esto se debe, como se ha mencionado anteriormente, a la incompatibilidad de los materiales entre sí.

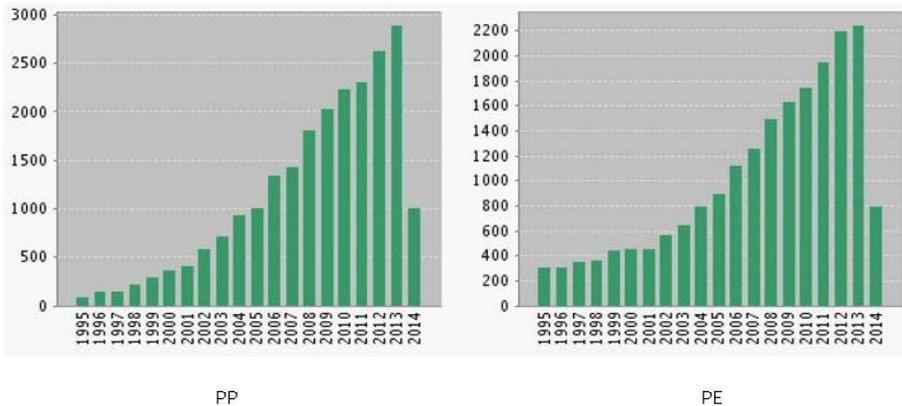


Figura I.30. Citas de artículos publicados en los últimos 20 años. Iz PP, Dcha PE.

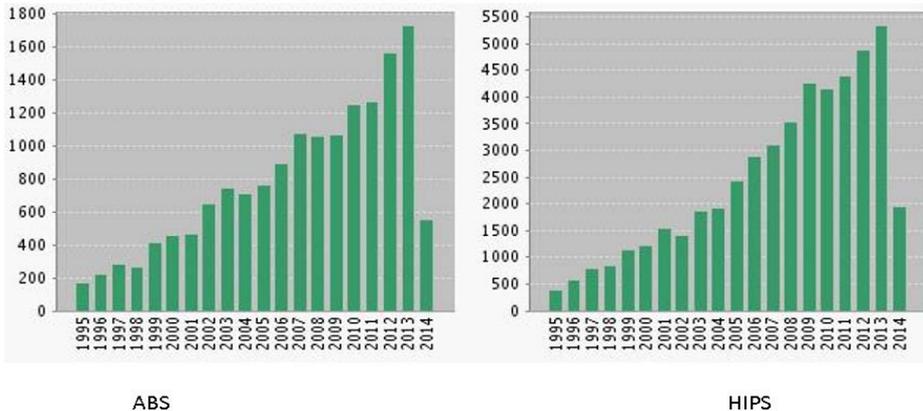


Figura I.31. Citas de artículos publicados en los últimos 20 años. Iz ABS, Dcha HIPS.

En cuanto a la coinyección, se trata de un proceso de ampliamente utilizado para la fabricación de piezas bimateriales, tal como los cepillos de dientes, mangos de sartenes, destornilladores, etc.

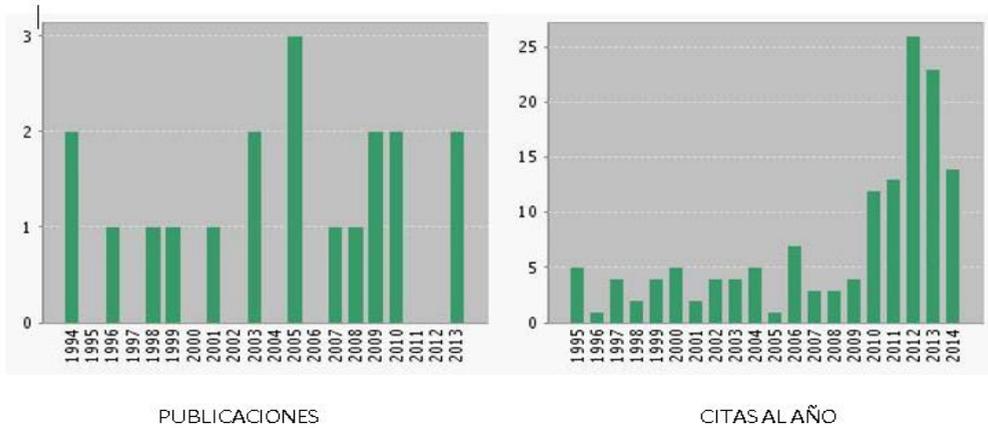


Figura I.32. Publicaciones de la mezcla de ABS + HIPS y citas al año.

Dado que la “Web of Science” es una herramienta de búsqueda y difusión de investigación, el número de artículos del proceso de coinyección es limitado. Por lo tanto no se puede determinar de forma cuantitativa su uso en la industria. El informe de citas proporcionado por la web muestra una tendencia irregular de la investigación relacionada con el proceso, como se puede observar en la figura I.34.

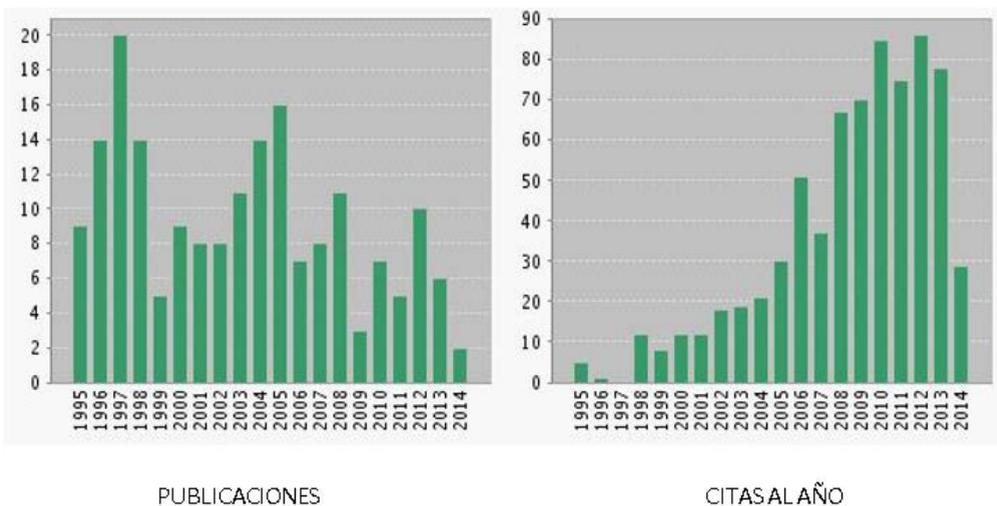


Figura I.33. Publicaciones de la mezcla de PP+PE y citas al año.

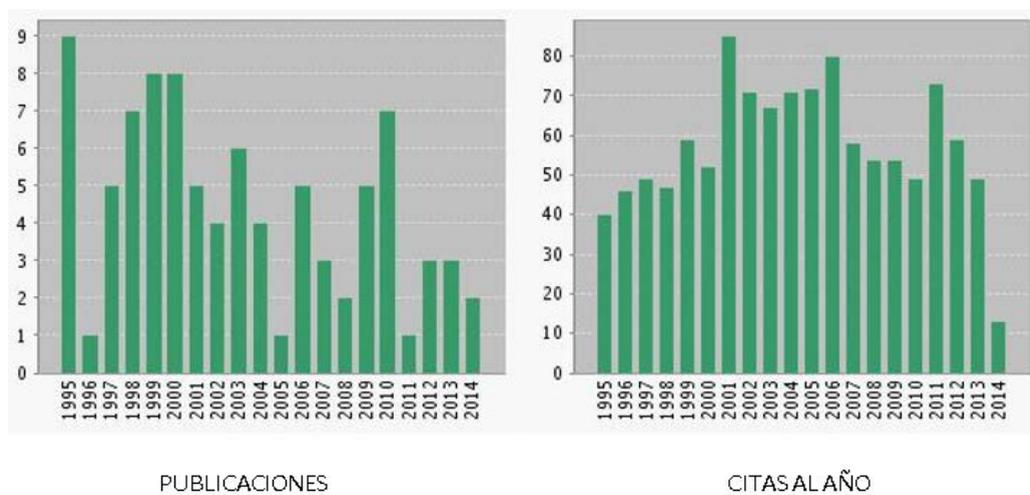


Figura I.34. Publicaciones de la mezcla del proceso de coinyección y citas al año

OBJETIVOS II

II. Objetivos

2.1 Objetivos

Actualmente dada la demanda de materiales termoplásticos en los diversos sectores industriales, empresas jugueteras, automoción, alimentación, sector farmacia, etc., existe la necesidad de plantear productos mediante fases bimateriales con el fin de aprovechar al máximo las ventajas de cada material y minimizar las contrapartidas de los mismos.

Bajo esta premisa, se establece la hipótesis de partida del estudiar el comportamiento de piezas normalizadas bimateriales con el fin de obtener la caracterización de dichas uniones y establecer una predicción de su comportamiento.

Con el fin de alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos parciales:

- a) Conocer los mecanismos de variación en el comportamiento de una pieza normalizada bimaterial termoplástico en la zona límite de interacción de materiales. Caracterización previa de materiales a emplear.
- b) Modelizar dichos mecanismos con el fin de encontrar una predicción de su comportamiento bajo distintos modelos/programas.
- c) Verificación experimental del modelado matemático
- d) Obtener limitaciones reales del modelo matemático utilizado y su relación con el binomio de material empleado.

2.2 Planificación de la investigación

Para alcanzar los objetivos planteados en el presente trabajo se han establecido una serie de etapas a desarrollar en el proceso de investigación:

Búsqueda de información previa

En esta fase se busca información referente al tema a estudio y se justifica la necesidad del mismo; también se obtienen información referente a los métodos de modelización, normativas aplicables y programas informáticos susceptibles de empleo. Esta fase se puede dar simultáneamente con otras fases del trabajo.

Definición de los elementos iniciales

Los materiales de partida son materiales vírgenes de características intermedias, fácilmente accesibles en el mercado, los cuales son:

- Finalloy HXN 0340 de Total Petrochemical (PP).
- Polystyrol 454C de BASF (HIPS).
- ABS 55 de TechnoPolymer (ABS).
- Asahi PE J320 Ashai Kashei Corporation (LDPE).

Se define los tipos de probetas que son necesarias para los ensayos, tanto en tipo como en tamaño, se hace una estimación de los recursos necesarios.

Simulación de la inyección

En las simulaciones de proceso se utiliza uno de los programas más empleados en el sector industrial (Moldflow®). Mediante el empleo del software Moldflow® permite la utilización de sus bibliotecas de materiales, donde se encuentra las características de los termoplásticos más usuales en el mercado.

Caracterización mecánica de los materiales

Debida a la carencia de datos del comportamiento mecánico de los materiales empleados, se realizará un ensayo de tracción con probetas normalizadas de tipo I con forma de alterio. De esta manera se puede establecer un modelo para cada material que será empleado en el posterior análisis por elementos finitos de las probetas bimaterial.

Determinación del modelo teórico

En la realización de las simulaciones de ensayo se ha empleado uno de los programas más usuales dentro del mundo industrial como académico (ANSYS). Mediante el empleo del software ANSYS se ha estudiado el comportamiento de las piezas normalizados bajo las cargas de ensayo que se establecen en la respectiva normativa de ensayos de materiales poliméricos.

Determinación del modelo real

Antes del procesado del material se procede al secado de la granza del ABS, dado que es un material higroscópico. Mediante este proceso se evite que las piezas inyectadas presenten burbujas producidas por la evaporación de la humedad y los resultados finales no se vean alterados.

Una vez realizado el secado de la granza se procede a la inyección de las probetas a una temperatura de 220°C y el molde a una temperatura de 35°C.

Se realiza la caracterización mecánica de las probetas bimateriales PP-PE y ABS-HIPS, se determina mediante la realización de los ensayos de tracción y flexión. De esta forma se evalúa su tensión de rotura, su módulo de elasticidad y su resistencia a flexión. Los ensayos se realizarán a las velocidades específicas de cada material para disponer de información suficiente para validar los modelos predictivos.

Estudio fractográfico microscópico de las probetas

Mediante el examen e interpretación de las superficies de rotura. Se determina las causas que han producido la rotura de la unión de los materiales, así como establecer los mecanismos de fractura de las uniones bimateriales.

Elaboración de conclusiones

Se procede a la evaluación de los resultados obtenidos.

EXPERIMENTAL III

III. Experimental

3.1 Materiales

Uno de los objetivos de este trabajo es el estudio de la composición de probetas bimateriales partiendo de materiales parcialmente compatibles de fácil obtención en el mercado con propiedades intermedias y de aplicación en el sector de la automatización y en el del material deportivo.

Para la realización de las probetas se han empleado los siguientes materiales:

- Caso 1: Asahi PE J320 de Asahi Kasei Chemical Corporation.
Finalloy HXN-0340 de Total Petrochemical
- Caso 2: ABS 55 de Technopolymer.
Polystyrol 454C de Basf.

3.1.1 Materiales empleados para las probetas

La elección de los materiales óptimos con los que serán fabricadas la probeta es crítica, para ello se ha establecido un criterio de selección:

- Material sea procesable mediante inyección.
- Se encuentren los datos en la base de datos de Autodesk Moldflow.
- Debe existir cierta afinidad entre los pares de materiales, es decir sus viscosidades deben ser parecidas, además se buscaran materiales con una viscosidad intermedia para que no existan problemas de llenado.
- Se buscarán los materiales comunes de propiedades intermedias que puedan ser suministrados por distribuidores nacionales.

Las propiedades aportadas por el fabricante del PP, PE, ABS y HIPS en la base de datos de Autodesk Moldflow se pueden observar en las tablas III.1, III.2, III.3 y III.4 respectivamente.

Tabla III.1. Características del Finalloy HXN-0340.

Material	PP
Fabricante	Total Petrochemicals
Designación	Finalloy HXN-0340

REOLOGICAS	Unidades	Valor
Índice de fluidez (230 °C/2,16 Kg)	cm ³ /10min	3,8
FISICAS		
Densidad	g/cm ³	1,26
MECANICAS, 23 °C		
Módulo de elasticidad	MPa	1918
Coefficiente de Poisson		0,37
Módulo de cizalladura	MPa	698,44
PROCESABILIDAD		
Procesabilidad: moldeo por inyección (M), Extrusión (E), Soplado (B)		M
Temperatura de inyección	°C	200 - 270
Temperatura del molde	°C	15 - 70

Tabla III.2. Características del Asahi-PE J320

Material	PE		
Fabricante	Asahi	Kasei	Chemical Corporation
Designación	Asahi-PE J320		
REOLOGICAS	Unidades	Valor	
Índice de fluidez (230 °C/2,16 Kg)	cm ³ /10min	-	
FISICAS			
Densidad	g/cm ³	0,95	
MECANICAS, 23 °C			
Módulo de elasticidad	MPa	690	
Coefficiente de Poisson		0,41	
Módulo de cizalladura	MPa	244,47	
PROCESABILIDAD			
Procesabilidad: moldeo por inyección (M), Extrusión (E), Soplado (B)		M	
Temperatura de inyección	°C	190-250	
Temperatura del molde	°C	32-71	

Tabla III.3. Características del ABS 55.

Material	ABS	
Fabricante	Technopolymer	
Designación	ABS 55	
REOLOGICAS	Unidades	Valor
Índice de fluidez (230 °C/2,16 Kg)	cm ³ /10min	26
FISICAS		
Densidad	g/cm ³	1,16
MECANICAS, 23 °C		
Módulo de elasticidad	MPa	2200
Coefficiente de Poisson		0,36
Módulo de cizalladura	MPa	808,8
PROCESABILIDAD		
Procesabilidad: moldeo por inyección (M), Extrusión (E), Soplado (B)		M
Temperatura de inyección	°C	180 - 260
Temperatura del molde	°C	30 - 70

Tabla III.4. Características del Polystyrol 454C.

Material	HIPS	
Fabricante	BASF	
Designación	Polystyrol 454C	
REOLOGICAS	Unidades	Valor
Índice de fluidez (230 °C/2,16 Kg)	cm ³ /10min	13,1
FISICAS		
Densidad	g/cm ³	1,05
MECANICAS, 23 °C		
Módulo de elasticidad	MPa	2200
Coefficiente de Poisson		0,35
Módulo de cizalladura	MPa	820
PROCESABILIDAD		
Procesabilidad: moldeo por inyección (M), Extrusión (E), Soplado (B)		M
Temperatura de inyección	°C	180-260
Temperatura del molde	°C	10-60

3.2 Procedimientos y métodos

En este apartado se describen los métodos empleados para la caracterización de los materiales en el trabajo experimental, además de los equipos utilizados.

3.2.1 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción es uno de los ensayos mecánicos más importantes para conocer el comportamiento mecánico de un material. Permite obtener el diagrama de tensiones-deformaciones unitarias, a partir del cual se puede extraer información sobre los tramos de deformación elástica y plástica así como algunos parámetros que definen el comportamiento a tracción tales como el módulo elástico, tensión de rotura y porcentaje de alargamiento a la rotura.

En el ensayo de tracción se somete una probeta de determinada geometría, a la acción de un esfuerzo axial, habitualmente hasta la fractura.

El ensayo de tracción aporta información muy completa ya que permite cuantificar la respuesta elástica y plástica del material a través de sus propiedades resistentes (módulo elástico o de Young y tensión de rotura) y dúctiles (porcentaje de alargamiento a la rotura). Las formas de trabajar en un ensayo de tracción son múltiples, permitiendo incluso trabajar en condiciones de fatiga. Lo habitual es realizar un control por carrera, es decir estableciendo una velocidad constante de separación de las mordazas, en esta tesis se ha utilizado este sistema. Algunos equipos también permiten trabajar con un control por fuerza, manteniendo una velocidad de incremento de fuerza constante a lo largo de todo el ensayo.

Para estimar la tenacidad de un material se utiliza el área encerrada bajo el ensayo de tracción. Esta área corresponde con el trabajo o energía que consume un material en el proceso de deformación y fractura.

Los ensayos de tracción se realizaron en la máquina universal de ensayos IBERTEST ELIB 30 (S.A.E. Ibertest, Madrid, España) que posee el departamento (Figura III.1. Máquina universal de ensayos del laboratorio de materiales.). La realización de las probetas y desarrollo del ensayo de tracción se llevaron a cabo de acuerdo a la norma, (UNE-EN-ISO-527, 1997). Todas las probetas, de dimensiones 150 mm de longitud y

10·4 mm² de sección, fueron ensayadas a 25 °C y 50 % de humedad relativa usando una velocidad de tracción de 50 mm·min⁻¹ con una célula de 5 KN. Se ensayaron un mínimo de diez probetas, para cada material y se calculó la media del alargamiento a la rotura y la resistencia mecánica.



Figura III.1. Máquina universal de ensayos del laboratorio de materiales.

3.2.2 Ensayo de Flexión

El ensayo de flexión se realiza en la máquina de ensayos universal, la misma en la que se efectúa el ensayo de tracción, con la salvedad, de que se debe de cambiar las mordazas de sujeción de la probeta. Este ensayo se puede realizar de diferentes formas en función del tipo de ensayo de flexión, siendo estos de un solo apoyo, de dos apoyos y de tres apoyos.

Es una prueba casi estática que determina el módulo de flexión, el estrés de flexión y la deformación por flexión. Este esfuerzo de flexión se obtiene cuando se aplican sobre un cuerpo pares de fuerza perpendiculares a su eje longitudinal, de modo que provoquen el giro de las secciones transversales con respecto a los inmediatos. La resistencia del material varía con la distancia entre apoyos, debido a que mientras los momentos flectores aumentan o disminuyen con ésta, los esfuerzos cortantes se mantienen constantes, por lo que será tanto menor su influencia cuanto mayor sea la luz entre apoyos. Es por esta razón que la distancia entre los soportes de la probeta, han de estar normalizadas, en función de la altura o diámetro de la misma, pudiendo aceptar entonces que la acción del esfuerzo de corte resulta prácticamente despreciable. Para ensayos más precisos la aplicación de la carga se hace por intermedio de dos fuerzas con lo que se logra flexión pura.

El rasgo más destacado es que un objeto sometido a flexión presenta una superficie de puntos llamada fibra neutra tal que la distancia a lo largo de cualquier curva contenida en ella no varía con respecto al valor antes de la deformación. Cualquier esfuerzo que provoca flexión se denomina momento flector.

Los resultados del ensayo de flexión muestran de forma especial el comportamiento del material cerca de la superficie de la probeta. En comparación con el ensayo de tracción, las flexiones medidas en el ensayo de flexión son aproximadamente cuatro veces mayores que los cambios de longitud en el ensayo de tracción.

3.2.3 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

La microscopia electrónica de barrido o SEM se basa en el principio de la microscopia óptica en la que se sustituye el haz por un haz de electrones. De esta forma se consigue una resolución muy superior a cualquier instrumento óptico.

El funcionamiento de la microscopia electrónica de barrido consiste en hacer incidir un barrido de haz sobre la muestra. La muestra (salvo que sea conductora) generalmente se recubre con una capa muy fina de oro o carbón, que le otorga propiedades conductoras.

Al alcanzar el haz la superficie de la muestra se generan las siguientes partículas:

- Electrones retrodispersados
- Electrones secundarios.

- Radiación electromagnética (rayos X)

El microscopio se encuentra internamente equipado con un conjunto de detectores que recogen la energía y la transforman en imágenes y datos:

- Detector de electrones secundarios, permite obtener imágenes de alta resolución.
- Detector de electrones retrodispersados, generan menor resolución de imagen pero ayudan a obtener la topografía de la superficie.
- Detector de energía dispersa, detecta los rayos X generados y permite realizar un análisis espectrográfico de la composición de la muestra.

El equipo que se ha empleado en la caracterización de la superficie de fractura de las muestras del sistema de mezclas de ABS-HIPS es el microscopio electrónico JEOL modelo JSM-6300 (Jeol USA Inc., Peabody, USA). Las principales características de este equipo se pueden observar en la Tabla III.5. Principales características del microscopio electrónico JEOL JSM-63000.

En la Figura III.2. Microscopio electrónico de barrido se puede observar una fotografía del equipo del laboratorio de materiales y el metalizador que prepara la superficie. Como paso previo a la observación de la muestra en el microscopio electrónico, al tratarse de un material no conductor, la superficie a observar es metalizada con oro en vacío, con una capa de oro de 5 a 7 nm aplicando un tiempo de 60 segundos en el proceso seguido por el metalizador del laboratorio de materiales(Figura III.3).

Tabla III.5. Principales características del microscopio electrónico JEOL JSM-63000

Modos de imagen	Electrones secundarios y retrodispersados
Voltaje de aceleración	0,5 hasta 30 KV
Aumentos	x5 hasta x300.000
Fuente	LaB ₆
Resolución	3nm
Vacío	10 ⁻⁵



Figura III.2. Microscopio electrónico de barrido.



Figura III.3. Metalizador del laboratorio de materiales

En el estudio de mezclas de materiales poliméricos, una de las tareas más importantes es desarrollar técnicas de contraste entre las diferentes fases para una correcta observación (Hobbs, 1990). Raramente el contraste se produce de forma natural debido a las diferencias en los índices de refracción de los materiales, composición química, etc.; pero lo normal es la necesidad de preparar las superficies a observar para que el proceso sea exitoso.

En la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) las muestras se preparan con mucha facilidad puesto que pueden emplearse las obtenidas en cualquier proceso de fractura, con lo cual la técnica, además de información morfológica, aporta información vital para el estudio fractográfico. Hay que destacar que la Microscopía Electrónica de Barrido tiene una gran profundidad de campo, así la convierte en una técnica especialmente adecuada para la observación de muestras con una topografía de superficie bastante variada, como las fracturas.

Cuando la adhesión entre las fases no es óptima y la matriz rompe de forma frágil es cuando se obtiene los mejores resultados. Aparece una superficie llena de partículas desprendidas y cavidades que permiten realizar estudios de distribución de tamaños de partícula y adhesividad. Pero, debido a los procesos asociados a la preparación de la muestra, esta técnica presenta limitaciones en cuanto a análisis cuantitativo. Sin embargo desde el punto de vista cualitativo se puede extraer mucha información que debe ser contrastada con otras técnicas. Algunas veces es conveniente examinar la superficie pulida y en otras es adecuado someter la superficie a la acción de un disolvente selectivo para provocar la extracción parcial de alguna de las fases y poder apreciarlo mejor.

3.3 Modelos matemáticos de comportamiento

3.3.1 Caracterización mecánica de tracción

El modelo matemático considerado en este trabajo se enmarca en el contexto de las ecuaciones de la mecánica de medios continuos. Según la normativa UNE –EN ISO 527-1:1:2012, los parámetros básicos para el estudio del comportamiento a tracción de materiales termoplásticos a partir de los esfuerzos y las deformaciones obtenidas en dicho ensayo son los siguientes:

- Tensión de rotura (σ_R): se define como el valor de la tensión en el punto de rotura de la probeta.

$$\sigma_R = \frac{F}{A} \quad 3.1$$

Siendo:

F = fuerza, en N

A = Área de la probeta, en mm²

- Deformación unitaria: es el cambio de deformación con respecto a la longitud inicial.

$$Def. unit. = \frac{\Delta L}{L_0} \quad 3.2$$

Siendo:

ΔL = incremento de longitud, en mm

L_0 = longitud inicial de la probeta, en mm

3.3.2 Caracterización mecánica a flexión

Según la normativa UNE-EN ISO 178:1993, los parámetros básicos para el estudio del comportamiento a tracción de materiales termoplásticos a partir de los esfuerzos y las deformaciones obtenidas en dicho ensayo son los siguientes:

- A partir del esfuerzo, se han determinado los siguientes parámetros:

$$\sigma_F = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Donde:

F es la fuerza aplicada, en Newtons.

L es la distancia entre los apoyos, en milímetros

b es la anchura, en milímetros, de la probeta

h es el espesor, en milímetros, de la probeta

Resultados y discusión IV

IV. Resultados y discusión

4.1 Evaluación del molde de las probetas

Antes de fabricar las probetas de un solo material para poder caracterizar mecánicamente los materiales, se realiza un estudio de la inyección de los materiales mediante el software Moldflow.

4.1.1 Simulación mediante el proceso e inyección

Se realiza la geometría mediante software SolidWorks y se introduce en el programa Moldflow en el formato STL. Se genera un mallado de tipo “Mi plane” y se coloca el punto de inyección en un lateral de la probeta y se realiza un ensayo por cada material.

4.1.2 Resultados

Moldflow dispone de una gran cantidad de resultados a mostrar, los más interesantes para nuestro estudio son los que permiten la configuración de la máquina inyectora como son:

- Fuerza de cierre
- Temperatura de la masa
- Presión en el punto de inyección
- Esfuerzo de cizalla en la pared
- Tiempo de llenado

La condición que debe cumplir la máquina de inyección a la hora de realizar las probetas para la caracterización mecánica de los materiales se establecen en las tablas IV.1 a IV.4:

Tabla IV.1. Resultados del Moldflow para la inyección de una probeta de PP.

Material	PP	
Temperatura de la masa	°C	240,8
Presión máx. En el punto d inyección	MPa	4,25
Fuerza de cierre	T	0,42
Presión máxima	MPa	26.54
Esfuerzo de cizalla de la pared	MPa	0,1971

Temperatura máx. al final del llenado	°C	240.7
Presión al final de llenado	MPa	8.318
Tiempo de llenado	s	0,6415
Tiempo para alcanzar la temperatura de s expulsión		16,89

Tabla IV.2. . Resultados del Moldflow para la inyección de una probeta de PE.

Material	PE	
Temperatura de la masa	°C	221.1
Presión máx. En el punto d inyección	MPa	3,8
Fuerza de cierre	T	3,8
Presión máxima	MPa	5,536
Esfuerzo de cizalla de la pared	MPa	0,0584
Temperatura máx. al final del llenado	°C	220,9
Presión al final de llenado	MPa	6,09
Tiempo de llenado	s	0,907
Tiempo para alcanzar la temperatura de s expulsión		23.66

Tabla IV.3. Resultados del Moldflow para la inyección de una probeta de ABS.

Material	ABS 55	
Temperatura de la masa	°C	223,4
Presión máx. En el punto d inyección	MPa	14,8
Fuerza de cierre	T	14,8
Presión máxima	MPa	19,9
Esfuerzo de cizalla de la pared	MPa	0,293
Temperatura máx. al final del llenado	°C	223,1
Presión al final de llenado	MPa	21,23
Tiempo de llenado	s	2,326
Tiempo para alcanzar la temperatura de s expulsión		36.58

Tabla IV.4. . Resultados del Moldflow para la inyección de una probeta de HIPS.

Material	HIPS	
Temperatura de la masa	°C	221,2
Presión máx. En el punto d inyección	MPa	4,2
Fuerza de cierre	T	4,2
Presión máxima	MPa	5,33
Esfuerzo de cizalla de la pared	MPa	0,124
Temperatura máx. al final del llenado	°C	221
Presión al final de llenado	MPa	220
Tiempo de llenado	s	1,277
Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión		34,28

4.2 Caracterización mecánica de los materiales

El estudio de la caracterización de los materiales se hace especialmente necesario ya que la información disponible, ya sea suministrada por el fabricante o localizada en las bases de datos del simulador Moldflow®, no es completa para todos los parámetros necesarios en la investigación.

La información necesaria para la investigación se centra en parámetros relacionados con el comportamiento mecánico del material. Por un lado se necesita información del límite elástico y módulo de poisson suministrados por el fabricante, sino los parámetros de un modelo matemático que nos permita conocer el comportamiento mecánico del material.

Para los casos de estudio se ha optado por un ensayo de tracción.

4.2.1 Evaluación del comportamiento mecánico

La caracterización mecánica de cada uno de los materiales permitirá comprender mejor el comportamiento y será de gran importancia a la hora de realizar las diversas simulaciones.

De la figura IV.1 a IV.4 se pueden ver las gráficas de tensión deformación obtenidas en el ensayo de tracción para cada uno de los materiales ensayados.

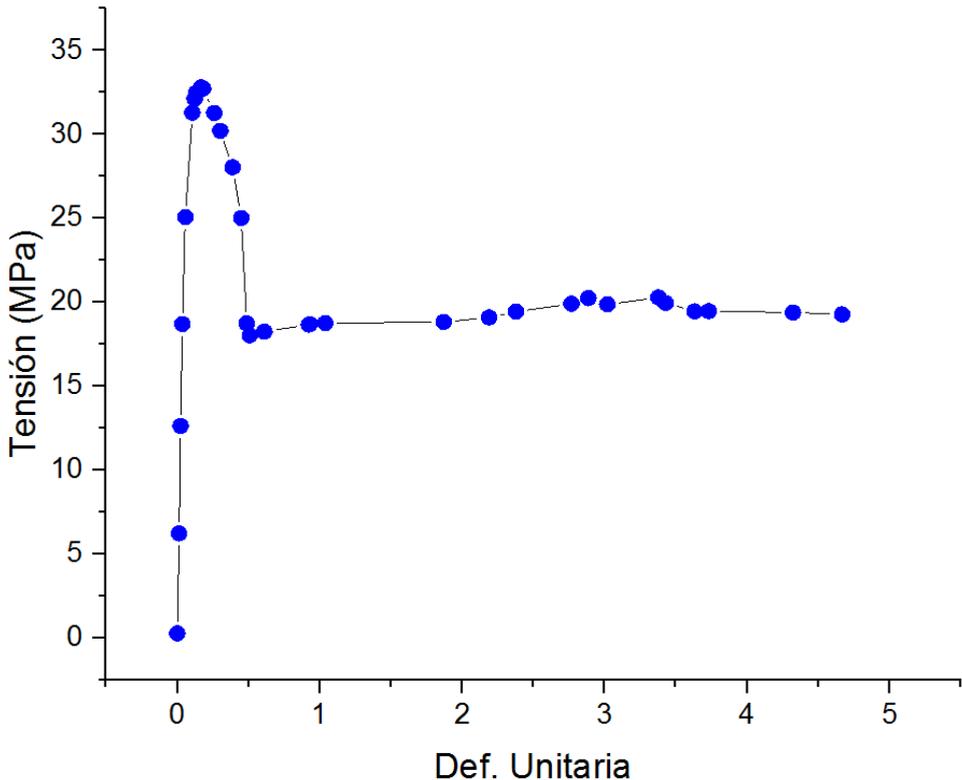


Figura IV.1. Gráfica tensión deformación del PP.

En la Figura IV.1. Gráfica tensión deformación del PP. se muestra la gráfica de tracción obtenida de la caracterización mecánica del Polipropileno Finalloy HXN-0340 de Total Petrochemical, se observa la primera parte de la gráfica una fuerte pendiente, que confirma las buenas propiedades mecánicas del PP, una vez superado el punto de fluencia en los 33MPa, parte curva de la gráfica, que es dónde el material dejaría de comportarse de forma elástica, se inicia en la zona viscoelástica a los 19MPa que es característica a los polímeros, presentando el comportamiento de fluidos y sólidos es decir la zona viscoelástica, exhibiendo propiedades características de ambos.

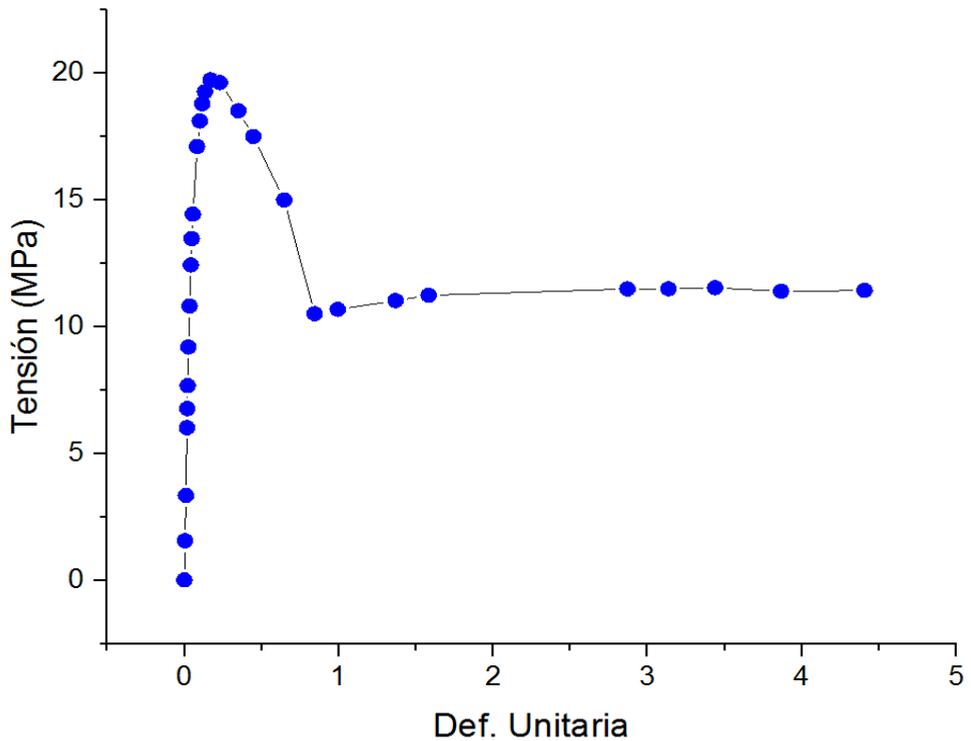


Figura IV.2. Gráfica tensión deformación del LPDE

En la Figura IV.2. Gráfica tensión deformación del LPDE de Asahi PE J320 Asahi Kasei Corporation se observa la primera parte la zona elástica, alcanzando el punto de fluencia a los 20MPa, después se encontraría la zona viscoelástica entorno a los 11MPa.

En la Figura IV.3. Gráfica tensión deformación del HIPS de Polystyrol 454C de Basf se observa la zona de elasticidad hasta el límite de 13MPa, a continuación se pasaría a la zona viscoelástica hasta alcanzar la rotura total de la probeta a los 15MPa.

Por último en la Figura IV.4. Gráfica tensión deformación del ABS del ABS 55 de TechnoPolymer se observar la progresividad de la zona elástica hasta alcanzar el límite elástico a los 37MPa una vez superado dicho límite el material entraría en la zona plástica y se produciría la rotura del material.

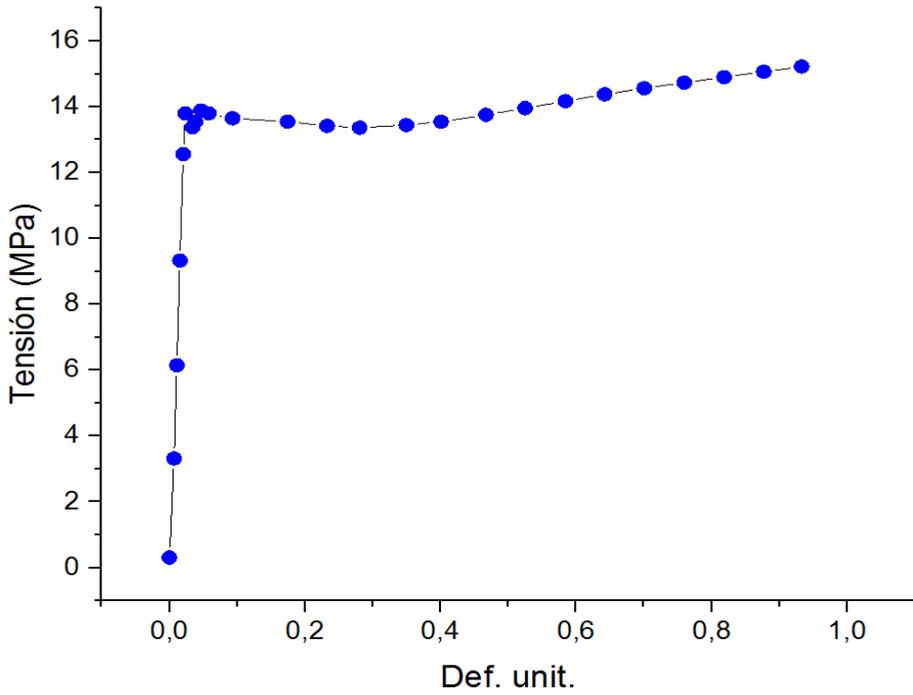


Figura IV.3. Gráfica tensión deformación del HIPS

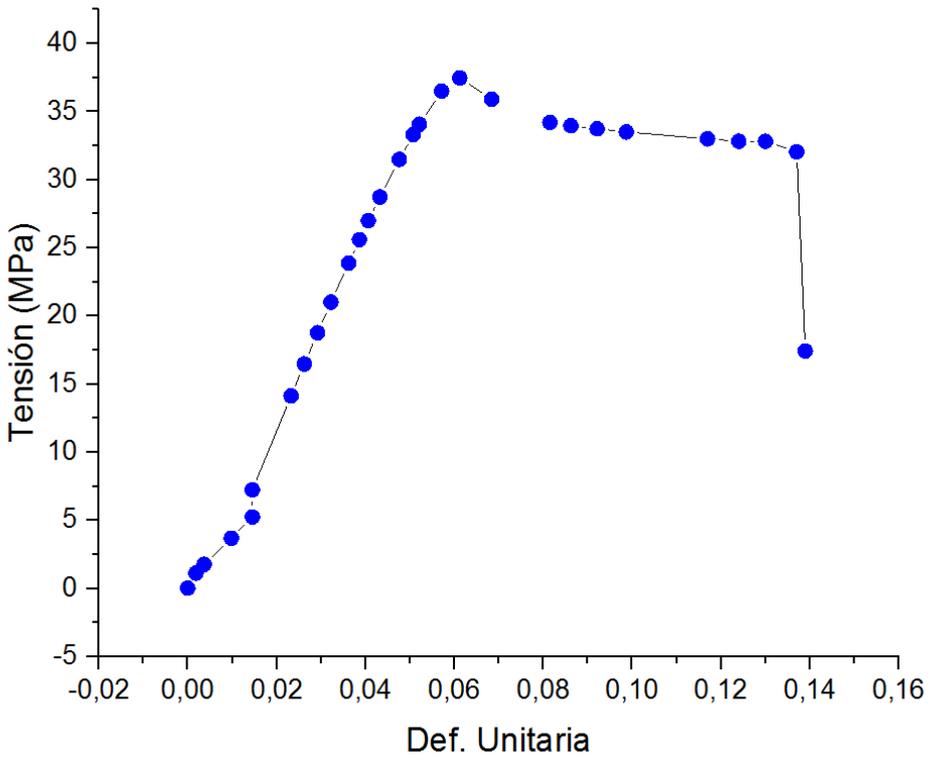


Figura IV.4. Gráfica tensión deformación del ABS

4.3 Estudio mediante programa Moldflow de las probetas objeto de estudio

4.3.1 Consideraciones iniciales

Autodesk Moldflow es una herramienta de análisis de moldeo por inyección de termoplásticos que ayuda a la optimización de los prototipos digitales, permitiendo estudiar los procesos de moldeo por inyección en uso hoy en día y proporciona una profunda precisión de la simulación de piezas de plástico y moldes de sus asociados.

Mediante Autodesk Moldflow se estudiará la configuración de la máquina de inyección para un correcto llenado del molde, además permitirá estudiar si el molde empleado es adecuado para la obtención de la geometría.

Se empleará como geometría de análisis la probeta bimaternal realizada mediante el software SolidWorks y se exportará en formato STL dado que en otro tipo de formatos se ha obtenido problemas de compatibilidad.

4.3.2 Simulación mediante Moldflow proceso sobremoldeo

Se carga la geometría de la probeta en formato STL en Moldflow Insight, en la barra de herramientas se selecciona “thermoplastics overmolding” y se establece como secuencia de análisis de tipo: “fill+pack+ fill”. Este tipo de secuencia permitirá establecer dos materiales en el proceso de sobremoldeo y permite ubicar un punto de inyección por material. Además se añade el mallado de tipo “Dual Domain”.

Simulación Moldflow por el proceso de sobremoldeo. Resumen de resultados PP-PE

Estudio de la presión en el punto de inyección

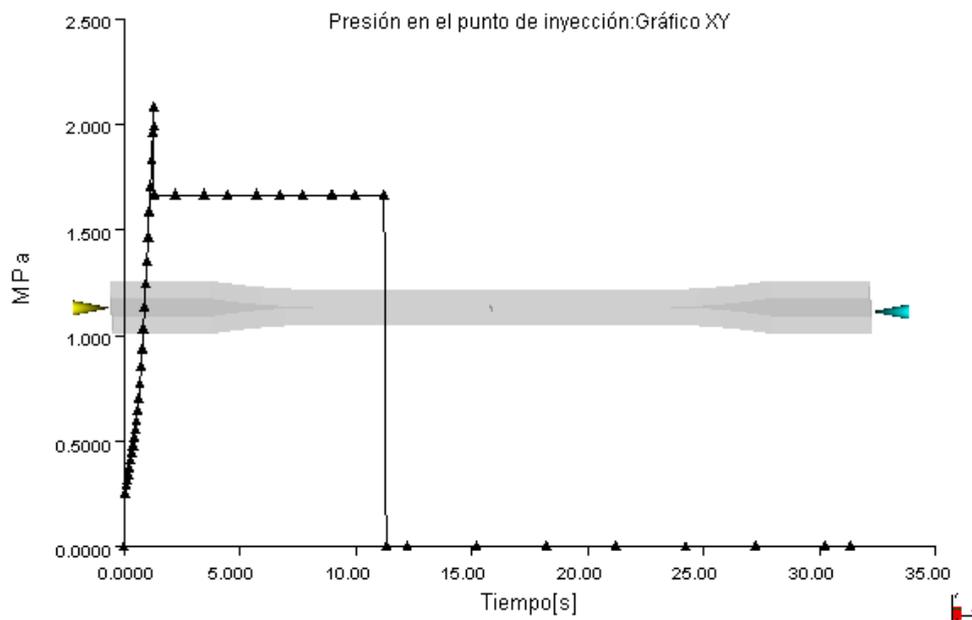


Figura IV.5. Presión en el punto de inyección del PP.

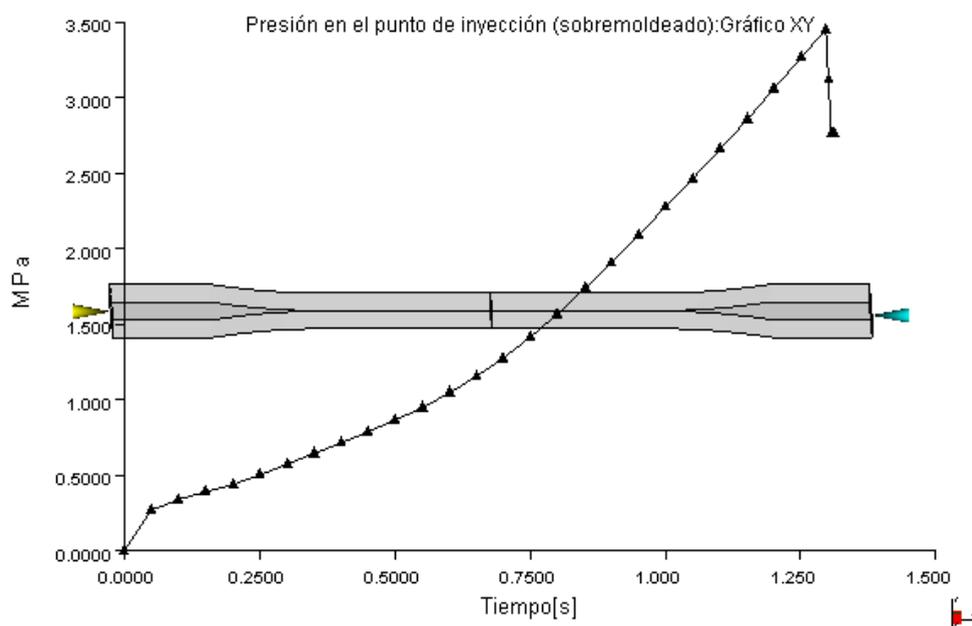


Figura IV.6. Presión en el punto de inyección del PE.

Fuerza de cierre

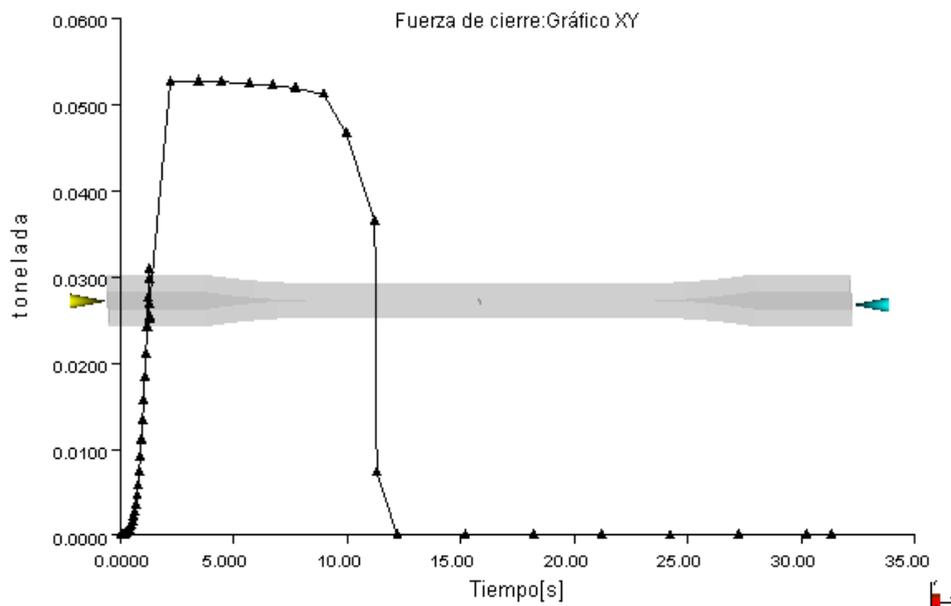


Figura IV.7. Presión de cierre en la cavidad del PP.

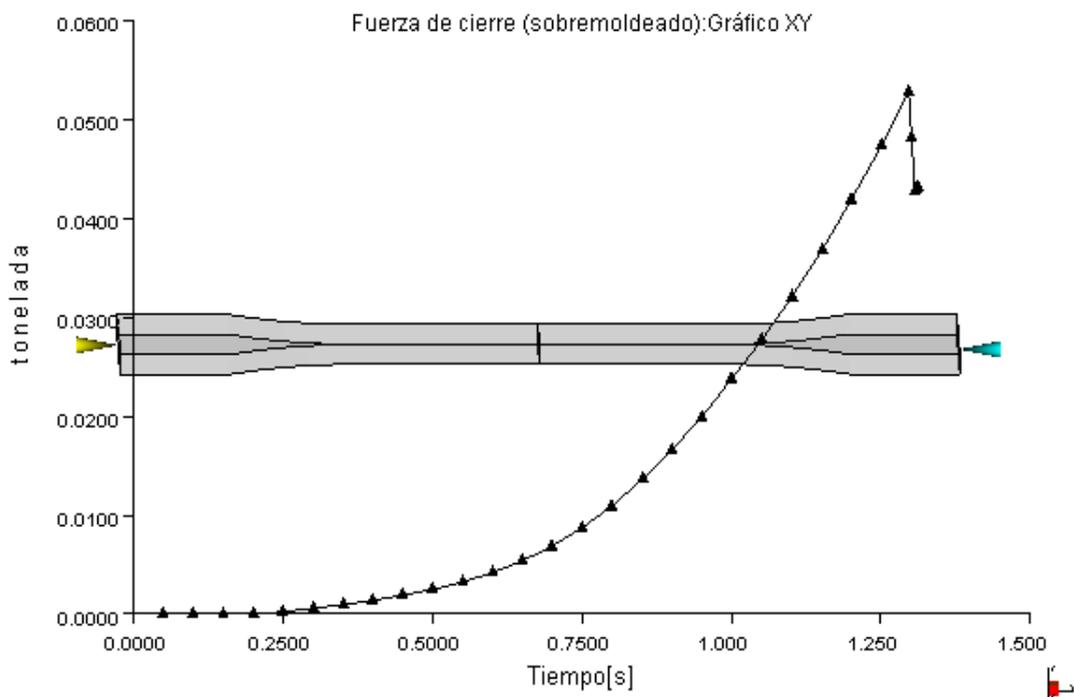


Figura IV.8. Presión de cierre en la cavidad del PE.

Tiempo de llenado

Tiempo de llenado

= 1.310[s]

[s]

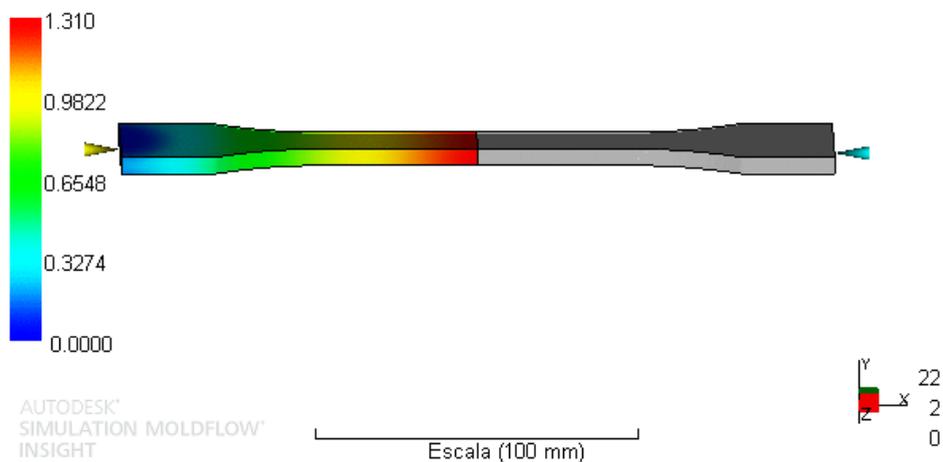


Figura IV.9. Tiempo de llenado en la cavidad del PP.

Tiempo del llenado (sobremoldeado)

= 1.312[s]

[s]

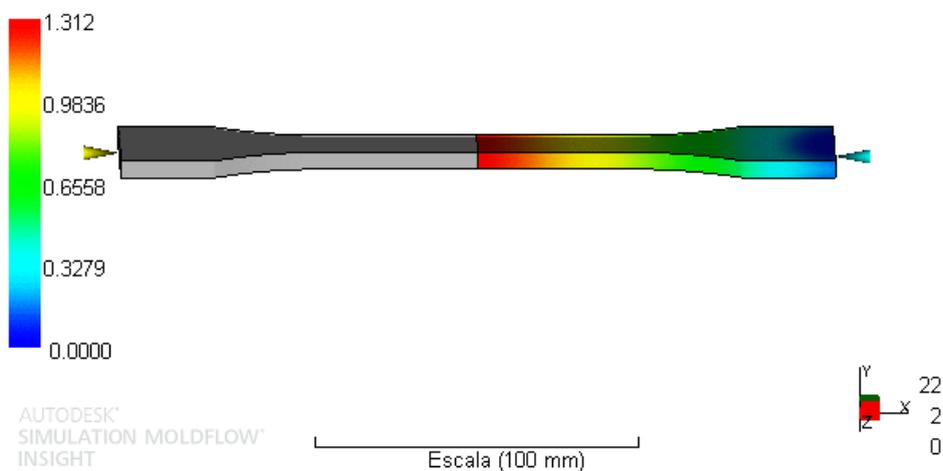


Figura IV.10. Tiempo de llenado de la cavidad del PE.

Presión al final del llenado

Presión al final del llenado

= 1.662[MPa]

[MPa]

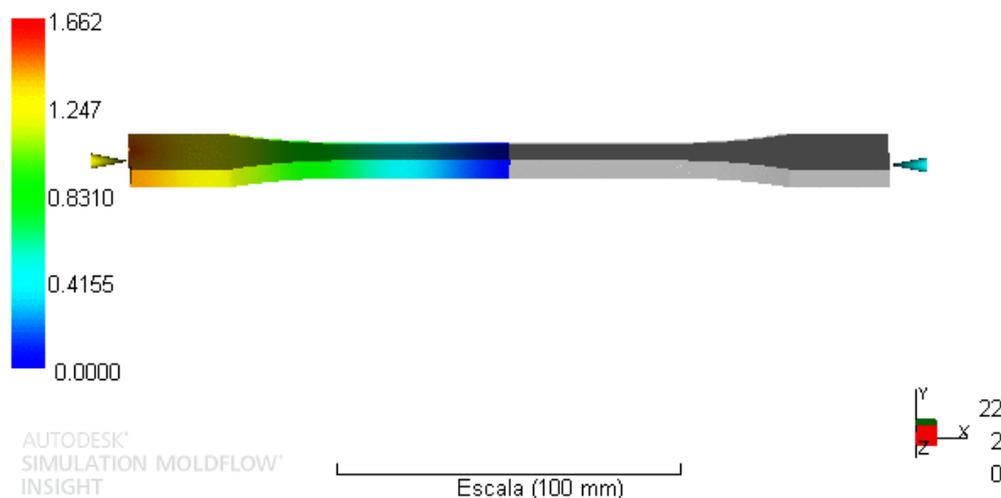


Figura IV.11. Presión al final del llenado en el PP.

Presión al final del llenado (sobremoldeado)

= 2.760[MPa]

[MPa]

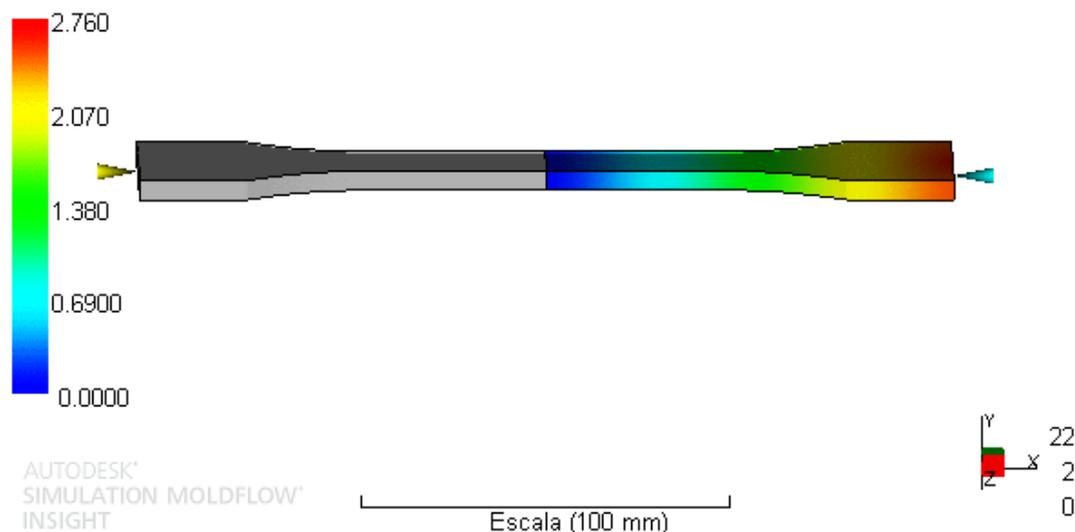


Figura IV.12. Presión al final del llenado en el PE.

Simulación Moldflow por el proceso de sobremoldeo. Resumen de resultados ABS-HIPS

Estudio de la presión en el punto de inyección

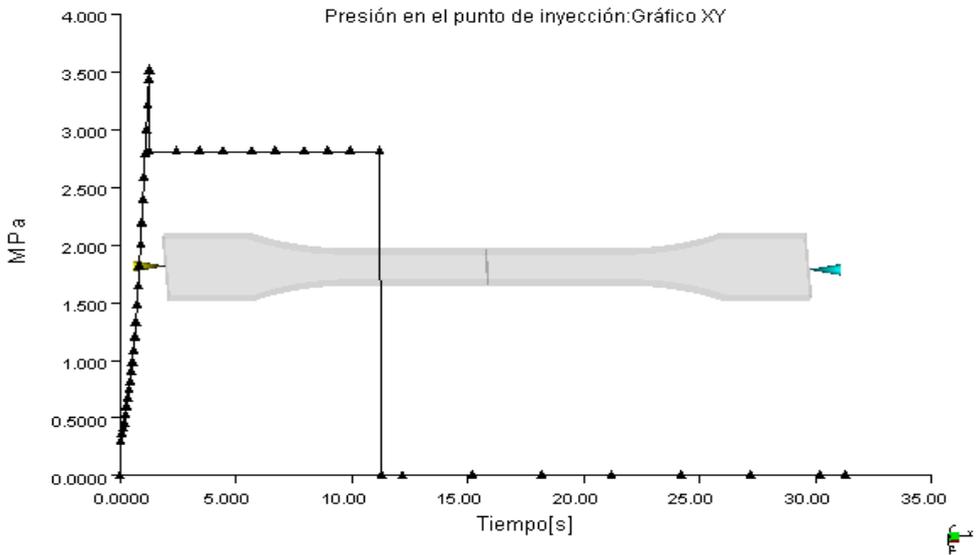


Figura IV.13. Presión de inyección en la cavidad del ABS.

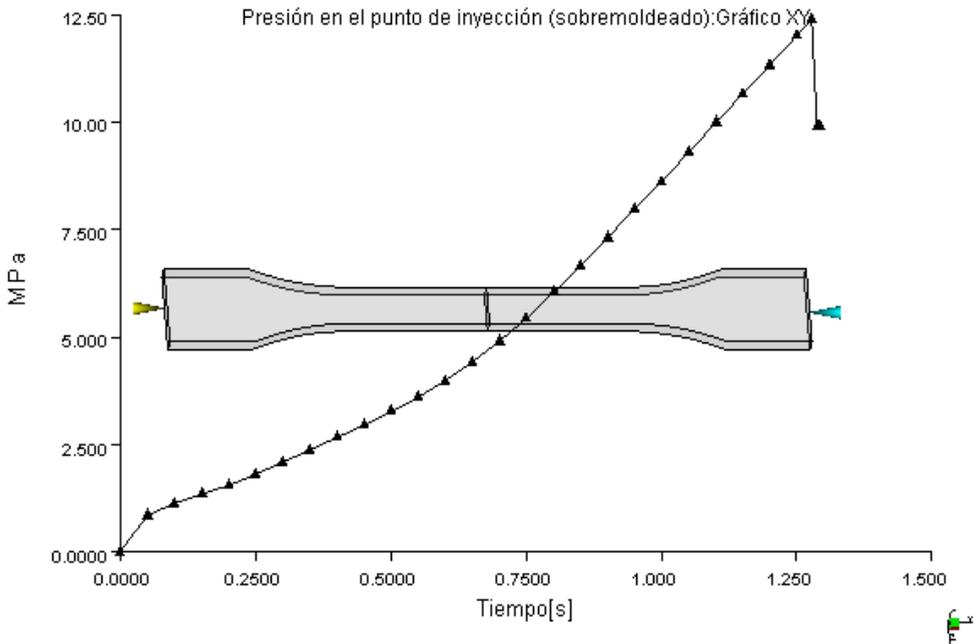


Figura IV.14. Presión de inyección en la cavidad del HIPS.

Fuerza de cierre

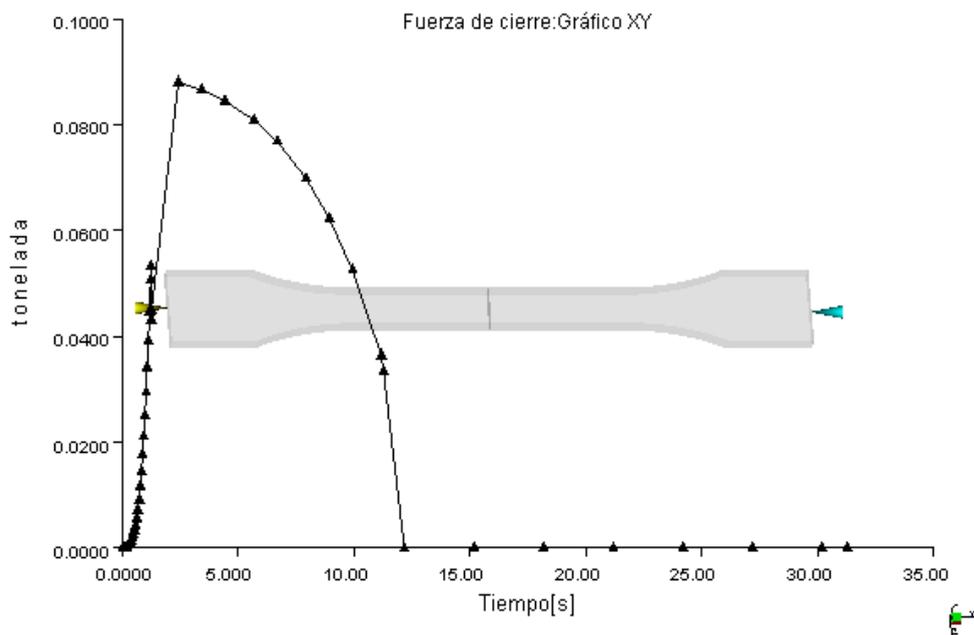


Figura IV.15. Fuerza de cierre en la cavidad del ABS.

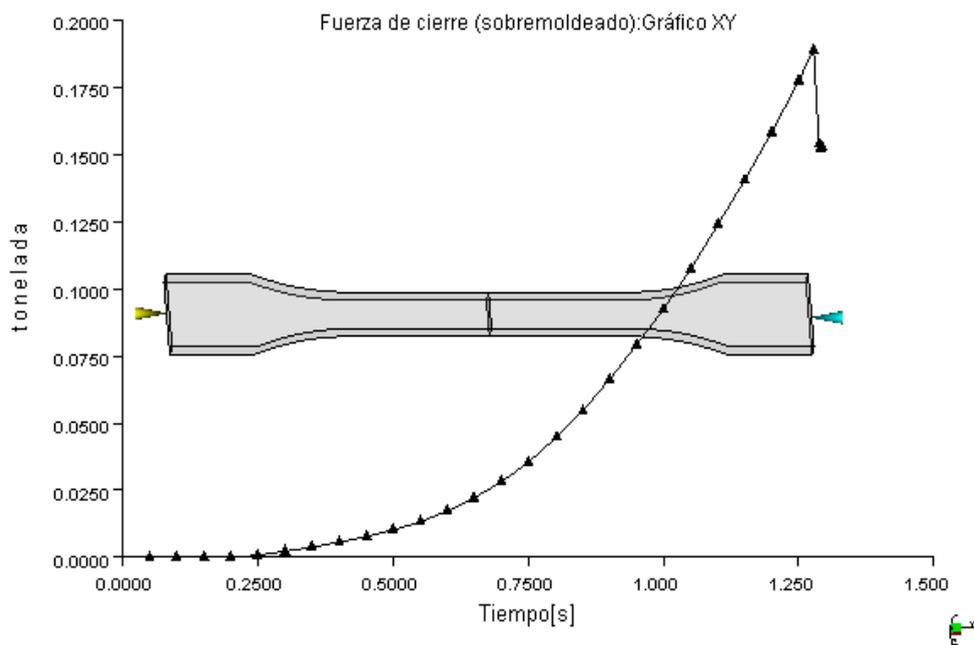


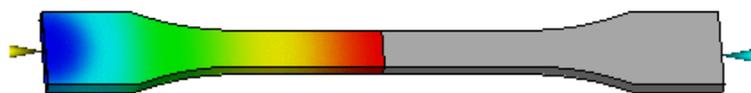
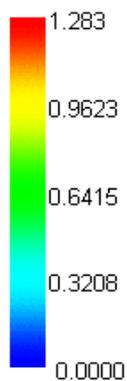
Figura IV.16. Fuerza de cierre en la cavidad del HIPS.

Tiempo de llenado

Tiempo de llenado

= 1.283[s]

[s]



AUTODESK
SIMULATION MOLDFLOW
INSIGHT

Escala (100 mm)

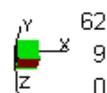


Figura IV.17. Tiempo de llenado de la cavidad del ABS.

Tiempo del llenado (sobremoldeado)

= 1.293[s]

[s]



AUTODESK
SIMULATION MOLDFLOW
INSIGHT

Escala (100 mm)

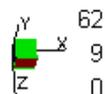


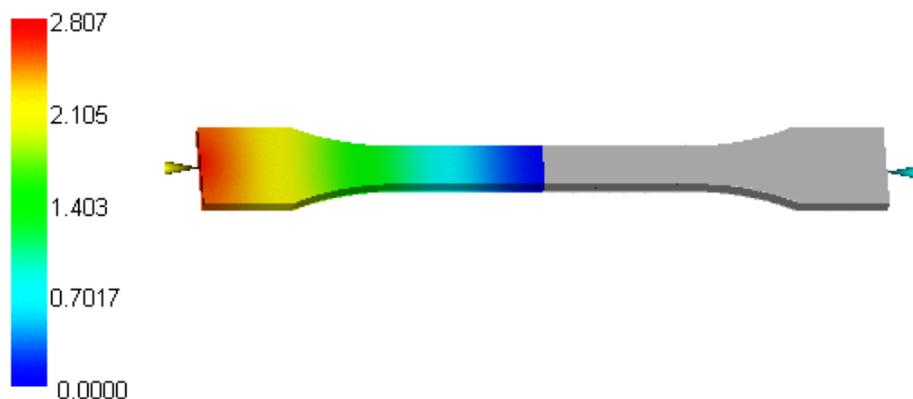
Figura IV.18. Tiempo de llenado de la cavidad del HIPS.

Presión al final del llenado

Presión al final del llenado

= 2.807[MPa]

[MPa]



AUTODESK
SIMULATION MOLDFLOW
INSIGHT

Escala (100 mm)

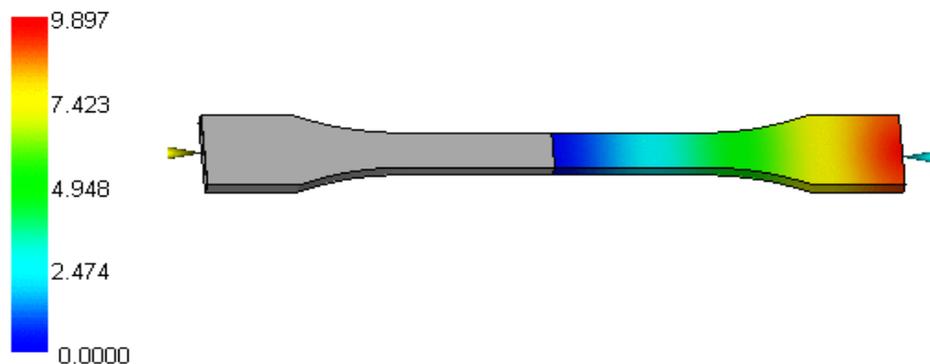
y 62
x 9
z 0

Figura IV.19. Presión final de llenado de la cavidad del ABS.

Presión al final del llenado (sobremoldeado)

= 9.897[MPa]

[MPa]



AUTODESK
SIMULATION MOLDFLOW
INSIGHT

Escala (100 mm)

y 62
x 9
z 0

Figura IV.20. Presión final de llenado de la cavidad del HIPS.

4.3.3 Simulación mediante Moldflow proceso co-inyección

Se empleará como geometría de análisis la probeta bimaterial realizada mediante el software SolidWorks y se exportará en formato STL dado que en otro tipo de formatos se ha obtenido problemas de compatibilidad.

Una vez cargada la pieza en Moldflow se procede a la configuración del análisis antes de proceder a la simulación. Debido a que en el tipo de análisis de sobremoldeo el programa no realiza un estudio de interacción entre las fronteras de ambos materiales, se configurará el análisis de tipo coinyección. Conocer las diferencias entre los diferentes tipos de análisis en Moldflow es de vital importancia debido a que cada uno requiere de una configuración distinta para poder realizarlo.

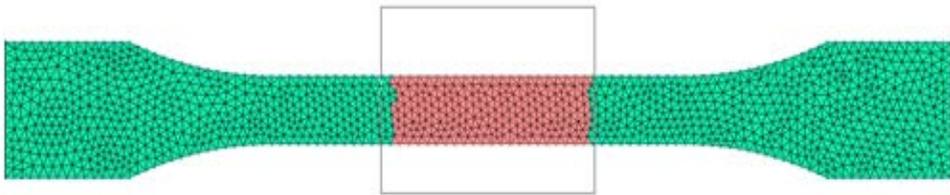


Figura IV.21. Zona rosada será donde se aumenta la densidad de malla.

A la hora de configurar un análisis de co-inyección se debe tener en cuenta que solo reconoce las mallas de tipo Mid-plane, para realizar este tipo de mallado primero se debe crear una malla de tipo Dual Domain y luego re-mallar el modelo con una configuración de malla tipo Mid-plane. Una vez conseguido este tipo de malla se procede a aumentar la calidad en la parte media el modelo para poder estudiar con mayor exactitud la línea de soldadura de ambos materiales.

Una vez acabado el problema del mallado ya se puede seleccionar el proceso de co-inyección en la barra de herramientas.

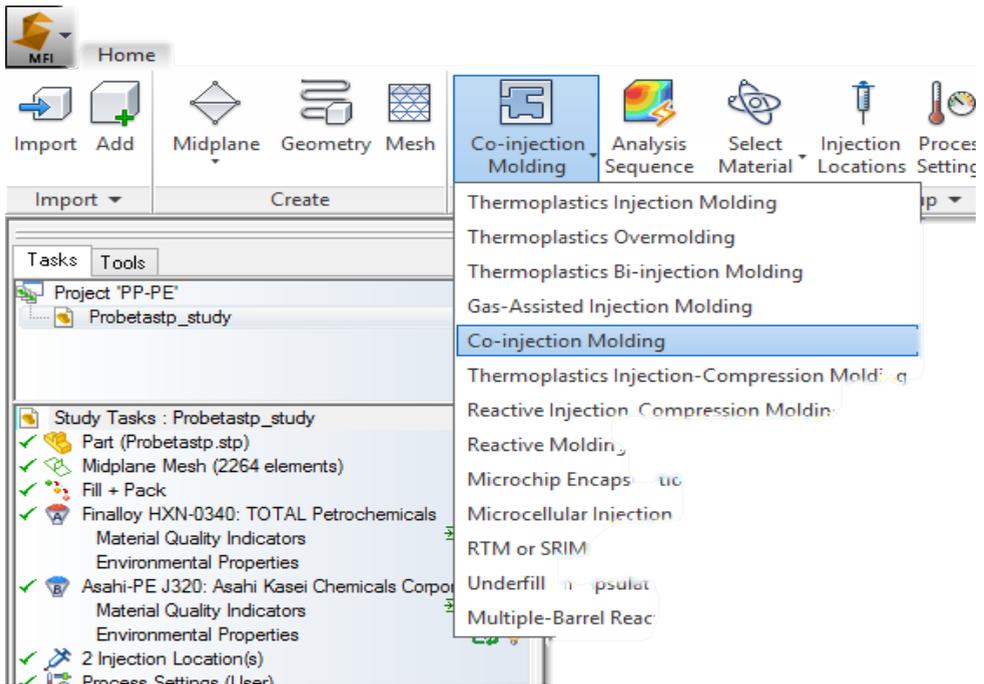


Figura IV.22. Captura de pantalla del Moldflow.

Después se procede a la configuración del material, para ello simplemente se selecciona el material en el cuadro lateral derecho y se abre una ventana de trabajo, donde se puede seleccionar el material de una larga lista. Para simplificar el trabajo de búsqueda se pueden aplicar diversos filtros como pueden ser: fabricante, tipo de material, código de identificación, etc.

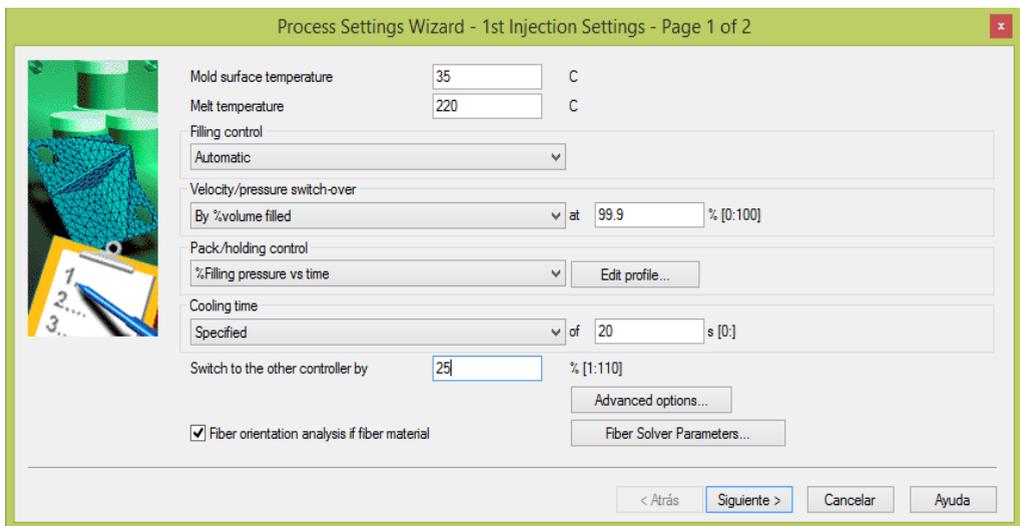


Figura IV.23. Colocación de los puntos de inyección.

El siguiente paso para configurar el análisis es insertar el punto de inyección, es posible insertar más de uno como es el caso de este estudio. Para ello se selecciona localización de inyección y se colocan los puntos a los extremos de la probeta modelo como en la Figura IV.23.

En el caso de la combinación ABS-HIPS se ha decidido seleccionar las temperaturas recomendadas de fusión tanto para el ABS como para el HIPS de 220°C, para el molde se ha optado por dejar una temperatura de 35°C.

Para que exista un llenado equitativo de ambos materiales el “Switch to the other controller by” se ajusta a 25.



Process Settings Wizard - 1st Injection Settings - Page 1 of 2

Mold surface temperature: 35 C

Melt temperature: 220 C

Filling control: Automatic

Velocity/pressure switch-over: By %volume filled at 99.9% [0:100]

Pack/holding control: %Filling pressure vs time Edit profile...

Cooling time: Specified of 20 s [0:]

Switch to the other controller by: 25% [1:110]

Fiber orientation analysis if fiber material

Advanced options... Fiber Solver Parameters...

< Atrás Siguiente > Cancelar Ayuda

Figura IV.24. Configuración de la inyección.

Simulación Moldflow por el proceso de coinyección. Resumen de resultados PP-PE

Presión

La presión de llenado máxima es de 4.5MPa. Este dato tendrá que ser considerado a la hora de seleccionar una máquina de inyección, tiene que ser capaz de dicha capacidad de inyección.

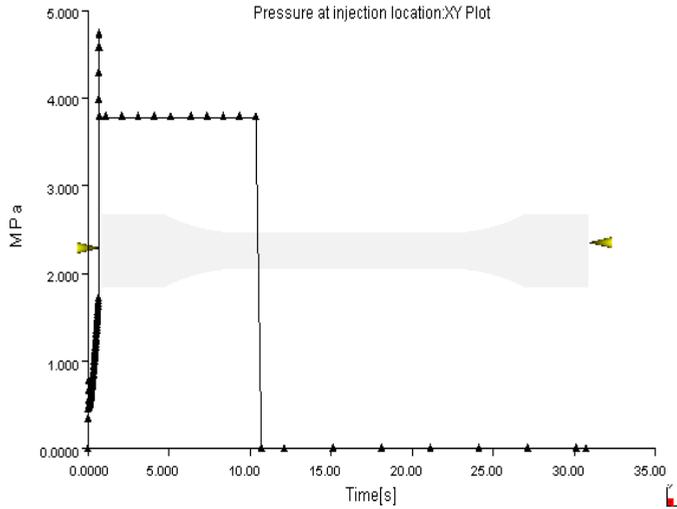


Figura IV.25. Presión de llenado de la coinyección del PP-PE.

Tiempo de llenado

El tiempo de llenado será de 0,69s.

Fill time
= 0.6951[s]

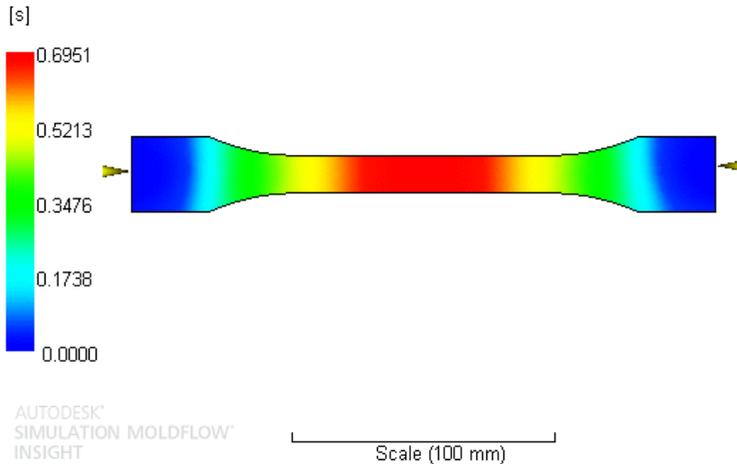


Figura IV.26. Tiempo de llenado del molde del PPE-PE.

Crecimiento

El crecimiento de material será:

Grow from
= 2.000

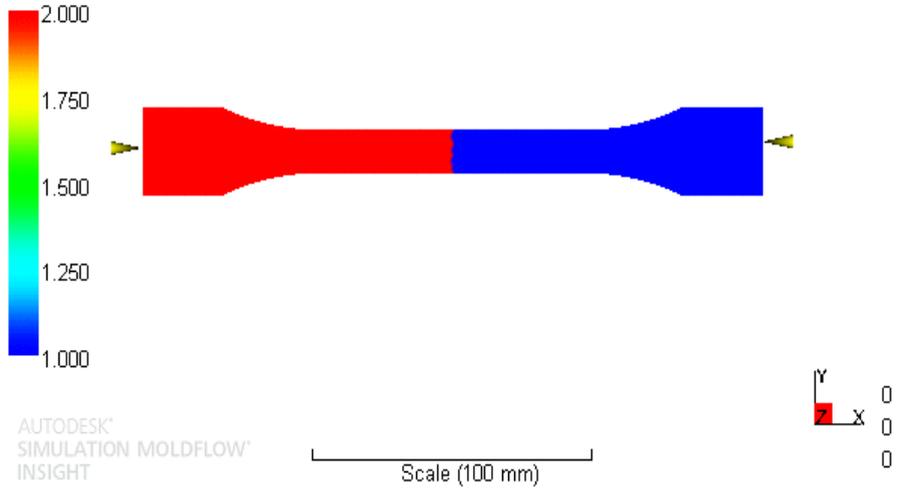


Figura IV.27. Crecimiento del frente de grano.

Línea de Soldadura

La línea de soldadura resultante será:

Weld lines
= 35.66[deg]

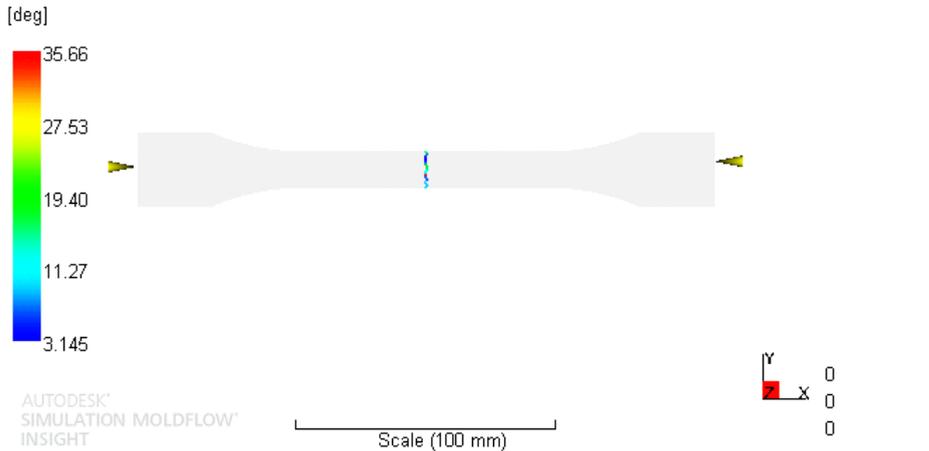


Figura IV.28. Líneas de soldadura.

Simulación Moldflow. Resumen de resultados ABS-HIPS

Presión

La presión de llenado máxima es de 5,6MPa. Este dato tendrá que ser considerado a la hora de seleccionar una máquina de inyección, tiene que ser capaz de dicha capacidad de inyección

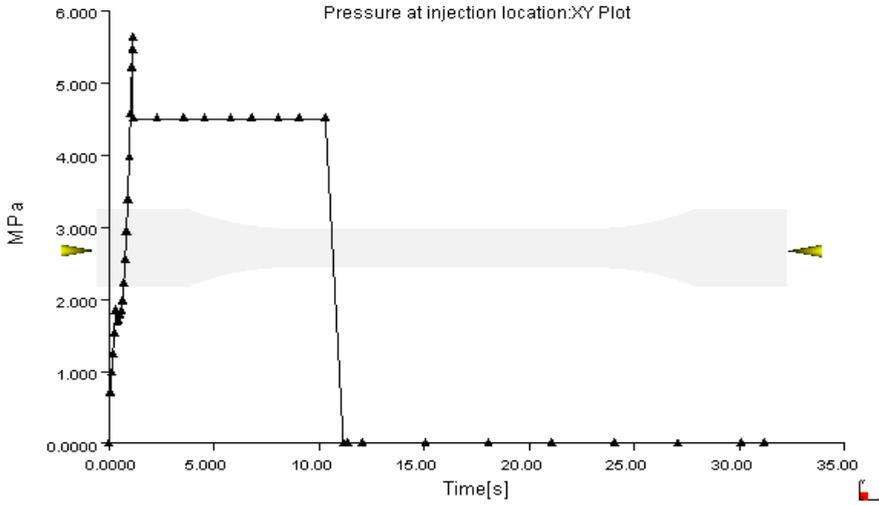


Figura IV.29. Presión de llenado del ABS-HIPS.

Tiempo de llenado

Fill time
= 1.145[s]

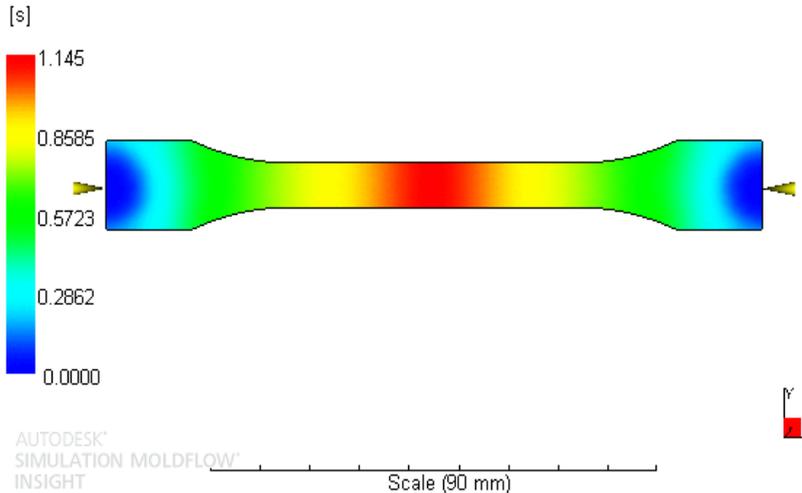


Figura IV.30. Tiempo de llenado del molde de ABS-HIPS.

El tiempo de llenado es de 1.145s.

Crecimiento

Las fronteras de crecimiento de material serán:

Grow from

= 2.000

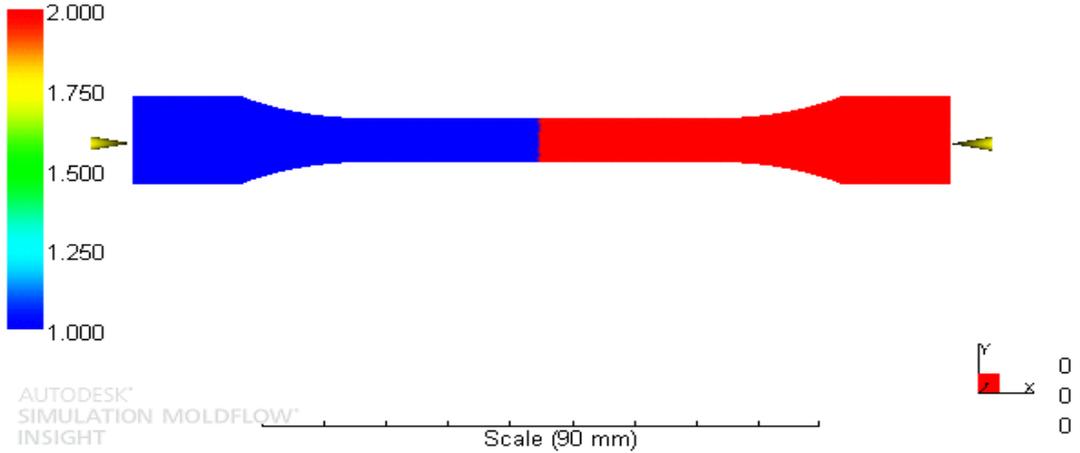


Figura IV.31. Crecimiento de grano.

Línea de soldadura

La línea de soldadura resultante será:

Weld lines
= 44.73[deg]

[deg]

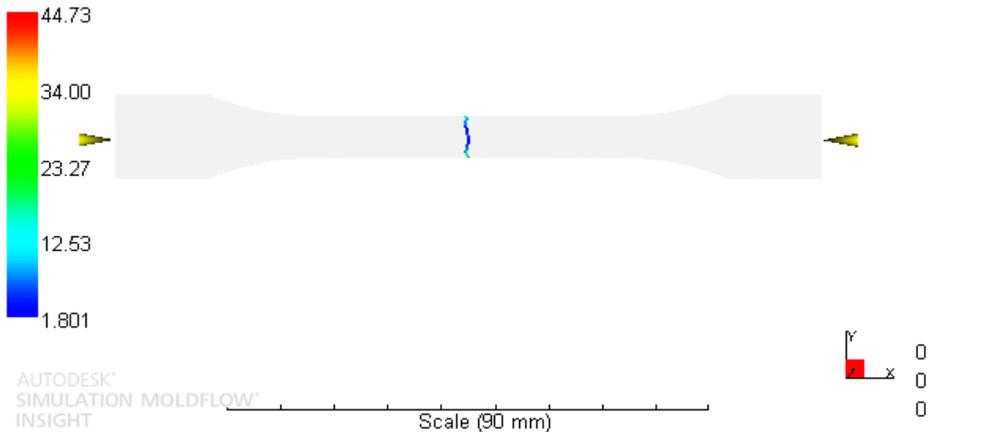


Figura IV.32. Líneas de soldadura del ABS-HIPS.

4.3.4 Conclusiones parciales

Según lo analizado en Moldflow los problemas que se plantean en el proceso de sobremoldeo se basan en la inexistencia del estudio entre la zona de interacción de ambos materiales. Debido a que el programa realiza el estudio de cada zona de manera independiente y considera que no existe interacción del material líquido al material solidificado.

También se debe destacar que el tiempo empleado en la operación de desmoldeo del proceso de sobremoldeo es mucha mayor debido a que se debe esperar a que se enfríe la primera semiprobeta para poder girar el molde y realizar la segunda inyección.

El problema planteado en el proceso de coinyección en este tipo de geometría es la posición de los puntos de inyección, que debido a la forma alargada de la probeta, se deben disponer a cada uno de los laterales de la geometría generando en medio la zona de soldadura, el inconveniente encontrado en este proceso es que al encontrarse el flujo de material fundido de forma frontal genera una línea de soldadura de mala calidad pudiendo contener atrapamientos de aire o zonas con baja interacción entre los dos sistemas de material.

Analizando el proceso de soldadura en el caso del PP-PE se observa que el ángulo formado por la unión varía entre $3,15^\circ$ al 36° pero existe una clara predominancia por los ángulos cercanos al 3° . En el caso del ABS-HIPS encontramos que el ángulo de soldadura formado es del $1,8^\circ$ a 44° , de forma análoga el ángulo de soldadura formado tienda al valor más bajo, que es cerca del $1,8^\circ$ grados. Este tipo de valores, tanto para el PP-PE como para el ABS-HIPS, pueden generar fragilidad en la unión de ambos materiales.

Finalmente y debido a los recursos disponibles, el proceso que se emplea en el diseño de las probetas bimaternal será el proceso de inyección mediante sobremoldeo.

4.4 Estudio mediante el programa Ansys Workbench del comportamiento a tracción de las probetas objeto de estudio

4.4.1 Consideraciones iniciales

Ansys Workbench es uno de los programas más utilizados para el análisis por elementos finitos, dispone de diferentes módulos para poder realizar distintos tipos de análisis con gran precisión. Los módulos que permiten realizar análisis dinámicos de sólidos son el “transient structural” y el “explicit dynamics”.

Teniendo en cuenta las condiciones del ensayo de tracción y que el módulo de “transient structural” no detecta rotura de cuerpos se ha optado por el uso del módulo de “Explicit dynamics” para poder evaluar la rotura de la probeta.

La gran desventaja surgida en este módulo de Ansys se ha encontrado en el tiempo de simulación que debe de ser inferior a un segundo lo que conlleva una gran problemática si se quiere realizar un ensayo de tracción normalizado y puede que requiera del aumento de las velocidades de ensayo.

4.4.2 Configuración de los materiales

Uno de los puntos más importante a la hora de configurar un análisis por elementos finitos es la introducción de los datos de los materiales, como paso previo y con el objetivo de obtener los ensayos más fiables posibles se ha realizado varias probetas con los materiales escogidos y se han caracterizado mediante ensayos de tracción, con el fin de obtener la tensión a tracción y su deformación unitaria correspondiente. También se ha empleado las características técnicas mostradas de los materiales en el Moldflow y en sus hojas de características facilitadas por su fabricante.

La configuración los materiales se realiza a través de “Engineering data” que es el módulo de materiales de ANSYS. Una vez dentro se crea una nueva biblioteca de materiales y se generan cuatro nuevos materiales que son los empleados para las simulaciones, ABS, HIPS, PP y PE.

Las propiedades que se añaden a los materiales gracias al proceso de caracterización mecánica realizado en las probetas de prueba serán: densidad, axial test data, coeficiente de Poisson y módulo de Young. Adicionalmente Ansys calcula el módulo de compresibilidad y módulo a cortadura a través del módulo de Young y el coeficiente de Poisson. Los datos de entrada serán los reflejados de las tablas IV.1. a IV.4:

Properties of Outline Row 5: Finalloy hxn 0340 (PP)				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	1259,6	kg m ⁻³	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Modulus and Po...		
5	Young's Modulus	1918,1	MPa	
6	Poisson's Ratio	0,3731		
7	Bulk Modulus	2,5191E+09	Pa	
8	Shear Modulus	6,9845E+08	Pa	
9	Uniaxial Test Data	Tabular		
10	Scale	1		
11	Offset	0	Pa	

Figura IV.33. Captura de pantalla de Ansys de los datos del Finalloy HXN 0340 (PP)

Properties of Outline Row 3: Abs 55				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	1160	kg m ⁻³	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Modulus and Po...		
5	Young's Modulus	2200	MPa	
6	Poisson's Ratio	0,36		
7	Bulk Modulus	2,619E+09	Pa	
8	Shear Modulus	8,0882E+08	Pa	
9	Uniaxial Test Data	Tabular		
10	Scale	1		
11	Offset	0	Pa	

Figura IV.34. Captura de pantalla de Ansys de los datos del ABS 55 (ABS)

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	951,63	kg m ⁻³		
3	Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young's Modulus and Po...			
5	Young's Modulus	690	MPa		
6	Poisson's Ratio	0,41			
7	Bulk Modulus	1,2778E+09	Pa		
8	Shear Modulus	2,4468E+08	Pa		
9	Uniaxial Test Data	Tabular			
10	Scale	1			
11	Offset	0	Pa		

Figura IV.35. Captura de pantalla de Ansys de los datos del Asahi PE J320 (PE)

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	1046,1	kg m ⁻³		
3	Isotropic Elasticity				
4	Derive from	Young's Modulus and Po...			
5	Young's Modulus	2200	MPa		
6	Poisson's Ratio	0,35			
7	Bulk Modulus	2,4444E+09	Pa		
8	Shear Modulus	8,1481E+08	Pa		
9	Uniaxial Test Data	Tabular			
10	Scale	1			
11	Offset	0	Pa		

Figura IV.36. Captura de pantalla de Ansys de los datos del Polystyrol 454C (HIPS)

Un vez importado los materiales a través de la “Engineering data “se deben asignar al modelo en módulo Mechanical de Explicit Dynamics, está operación se realizará después de importar la geometría en Ansys y mediante el árbol de proyecto llamado modelo. Se debe tener en cuenta que para el caso 1 se utilizará el PP-PE y que para el caso 2 se empleará el ABS-HIPS.

4.4.3 Configuración de la geometría

Una vez configurado los materiales, se continua con la inserción del modelo para ello desde la opción “geometry” se inserta el modelo 3D. Ansys Workbench permite el

trabajo con diferentes formatos, en este caso el modelo importado se ha realizado con un formato neutro como es el formato STEP.

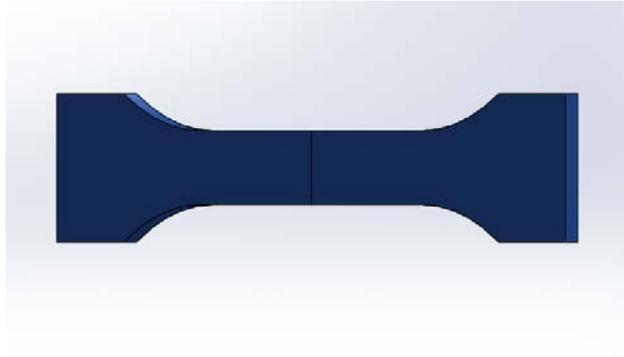


Figura IV.37. Probeta creada en Solidworks.

Una vez se haya importado la geometría se ha de realizar una modificación en la geometría con el editor de geometría de ANSYS Workbench y crear dos divisiones en la cara frontal y posterior de la probeta para que se pueda aplicar las condiciones de entorno tal y como las haría las mismas garras de la máquina de ensayo.

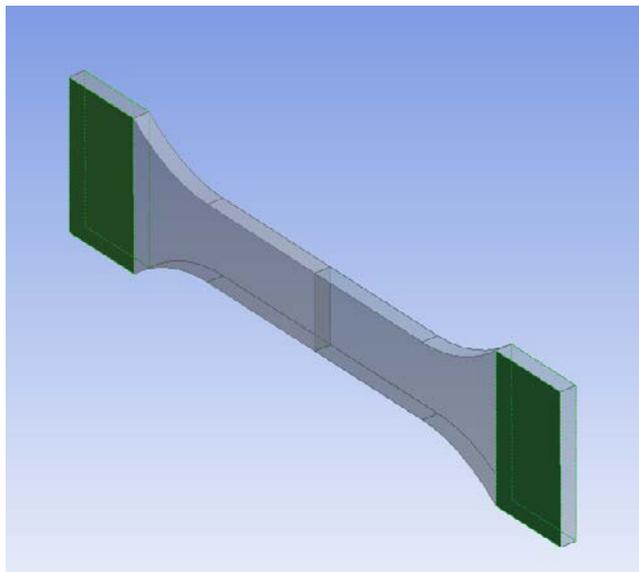


Figura IV.38. Probeta modificada en ANSYS.

4.4.4 Configuración de la malla

Tras la configuración de los materiales es necesario configurar el mallado del modelo sin esta operación no es posible aplicar el método de resolución por elementos finitos. Debido a la sencillez de la pieza simplemente se generará la malla, se ajustará la relevancia a un valor de 20, el centro de relevancia en medio y el “smoothth” se ajustará en alto. Por último, se comprobará en estadísticas mediante el método “skewness” el valor máximo se deberá encontrar por debajo de 0,95 para ambos casos se puede ver que el valor se sitúa en torno al 0,26 por tanto no se requiere de ningún tratamiento especial de la malla.

Model (A4) > Mesh	
Object Name	Mesh
State	Solved
Defaults	
Physics Preference	Explicit
Relevance	20
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Medium
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	4,0 mm

Figura IV.39. Captura de pantalla resumen de las configuración de malla.

4.4.5 Configuración de los contactos

Debido a que la probeta bimaternal se compone de dos semiprobetas el programa detecta la existencia de dos piezas de dos materiales distintos y por tanto existe una zona de contacto entre ambas regiones. La configuración de la región de contacto es uno de los puntos más críticos a la hora de realizar una simulación del ensayo de tracción de probetas bimaternal. Es necesario explicar las diferencias entre las diferencias entre las diversas configuraciones que permite optar el programa:

- “Bonded”: Las superficies se encuentran unidas como si se encontraran soldadas o pegadas, no permite la separación entre ambas partes y no es posible el deslizamiento de las caras. Es posible la configuración de esta unión para detectar su posible falla mediante el stress critérium.

- “No separation”: similar al criterio Bonded dado que no permite la separación de caras sin embargo el deslizamiento entre ellas, sí que está permitido.
- “Rough”: Las caras permiten ser separadas dependiendo de la carga pero no se permite el deslizamiento. No es posible acotar el valor de separación y no es posible el estudio de la rotura del cuerpo.
- “Frictionless”: las superficies de contacto pueden deslizarse libremente entre sí y dependiendo del tipo de carga pueden cerrarse o abrirse entre sí.
- “Frictional”: Las superficies pueden deslizarse entre sí, el usuario debe definir el coeficiente de fricción que actuara como una resistencia. Las superficies podrán cerrarse o abrirse en función de las cargas establecidas.

Una vez explicados los diversos criterios que existen para la configuración de región de contacto y entendida la problemática que plantea cada una de las diversas opciones y estudiadas empíricamente mediante las diversas simulaciones realizadas, se ha decidido optar por una configuración de tipo “Bonded” añadiendo la opción de rotura por criterio de tensión. Para la configuración de este valor hay que remitirse a los valores obtenidos de forma experimental. Los valores para los que ha sido configurado el ensayo de para el PP-PE ha sido de 4,2 MPa para el “normal stress limit”, en el “normal stress exponent” se ha dado un valor de 0,4, en el campo de shear stress limit también se ha configurado un valor de 4,2 y en el “shear stress exponent” de 0,4. En el caso número dos para el ABS-HIPS se han configurado a un valor de 1,3 para los campos normal stress y “shear stress limit” y un valor de 0,402 para los campos “normal stress exponent” y “shear stress exponent”.

Dentro del árbol “connections” se encuentra la rama “body interaction” debido a que los dos cuerpos no interactúan entre sí, es decir que no existe ninguna fuerza que genere ningún tipo de penetración de uno en el otro o vaya a existir un deslizamiento entre ambos cuerpos no se efectuará ningún cambio en este apartado

4.4.6 Configuración de las condiciones de contorno

Teniendo en cuenta las condiciones del ensayo de tracción, en las que la probeta se encuentra sujeta por cuatro puntos, dos en su parte inferior, que es donde se sujeta la garra fija y dos en su parte superior que es donde se sujeta la garra móvil. La configuración de las condiciones del entorno resultan bastantes sencillas de aplicar y se realizarán mediante dos apoyos fijos en su parte inferior que simularan el carácter de la garra inferior, la que se halla fija y se aplicara una condición de velocidad en las caras superiores simulando el efecto que produce la garra móvil.

Hay que decir que la condición de apoyo fijo se aplicara en la parte de la probeta donde se encuentre el PE para el caso 1 y para el caso 2 se encontrará en el lado del ABS, en

caso contrario el desplazamiento relativo en la garra y el material podría generar problemas de distorsión.

A la hora de configurar la velocidad de ensayo como ya se ha explicado en el apartado 4.1 las velocidades ensayo deben de ser de 50mm/min. En el caso número uno, el del PP-PE se ha tenido que aumentar la velocidad de ensayo debido a un error por exceso de energía de deformación para poder subsanar ese error se ha aumentado la velocidad de ensayo a 1,5 mm/s. En el caso número dos, se introducirá en el campo de velocidad en el eje X un valor de 0,834mm/s debido al sistema de unidades empleado.

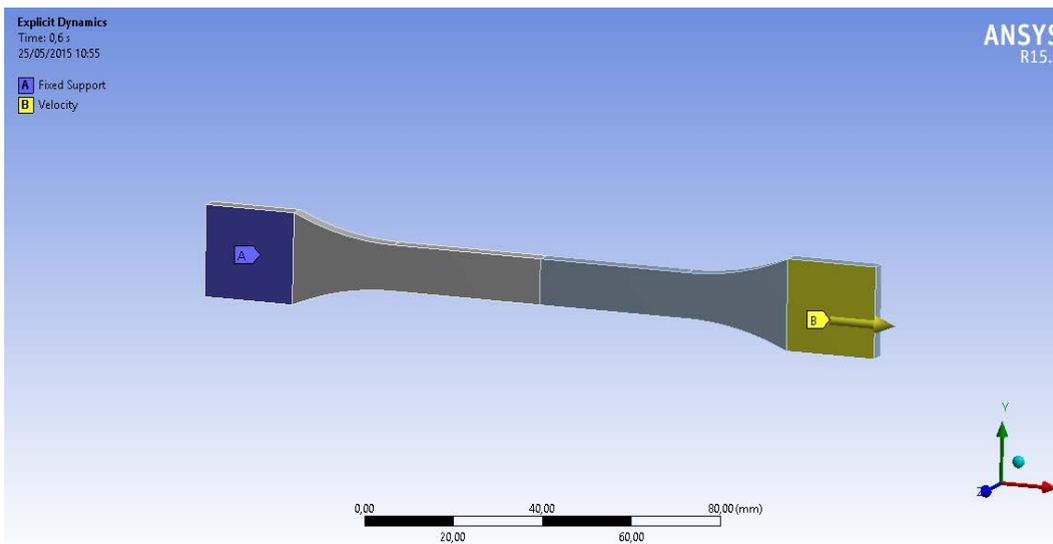


Figura IV.40. Configuración de la condiciones de entorno.

Una vez configuradas las condiciones del entorno físico del ensayo se procede a configurar las condiciones de análisis desde la rama del árbol de proyecto llamada “analysis settings”. Teniendo en cuenta las diversas simulaciones realizadas se ha llegado a un tiempo óptimo de trabajo de 0,25s para el PP-PE y de 0,1s para el ABS-HIPS. En este tiempo es posible comprobar el comportamiento de la probeta y además el programa no genera ningún tipo de error, pudiendo asumir el resultado como aceptable. En este apartado se debe activar la opción “On material failure” esto permitirá la detección de la rotura del material. Una vez realizadas estas dos acciones se habrá concluido la configuración del análisis.

4.4.7 Preparación de los resultados

Al programa se le demandará los siguientes resultados:

- Tensión normal (Normal Stress)
- Deformación unitaria (Equivalent Elastic Strain)
- Deformación en el eje x (Directional deformation)

4.4.8 Resultados obtenidos

Caso 1: PP-PE

Resumen

Tabla IV.5. Tabla resumen de resultados del PP-PE.

Model (D4) > Explicit Dynamics (D5) > Solution (D6) > Results				
Object Name	Equivalent Elastic Strain	Equivalent Stress	Directional Deformation	Normal Stress 2
State	Solved			
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	All Bodies			
Definition				
Type	Equivalent Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress	Directional Deformation	Normal Stress
By	Time			
Display Time	0,2 s		Last	0,2 s
Calculate Time History	Yes			
Identifier				
Suppressed	No			
Orientation	X Axis			
Coordinate System	Global Coordinate System			
Integration Point Results				
Display Option	Averaged			
Average Across Bodies	No			
Results				
Minimum	6,1498e-009 mm/mm	2,7136e-006 MPa	-6,3289e-002 mm	-1,0161e-003 MPa
Maximum	5,8021e-003 mm/mm	4,5663 MPa	0,43072 mm	4,4861 MPa
Minimum Occurs On	Solid			
Maximum Occurs On	Solid			
Minimum Value Over Time				
Minimum	0, mm/mm	0, MPa	-8,672e-002 mm	-1,9917 MPa
Maximum	3,3982e-008 mm/mm	2,112e-005 MPa	0, mm	0, MPa
Maximum Value Over Time				
Minimum	0, mm/mm	0, MPa	0, mm	0, MPa
Maximum	5,8021e-003 mm/mm	4,5663 MPa	0,43072 mm	4,4861 MPa
Information				
Time	0,2 s		0,25 s	0,2 s
Set	17		21	17

Deformación unitaria

Tabla IV.6 . Resumen de la deformación unitaria.

Model (D4) > Explicit Dynamics (D5) > Solution (D6) > Equivalent Elastic Strain

Time [s]	Minimum [mm/mm]	Maximum [mm/mm]
1,1755e-038	0,	0,
1,2501e-002	7,9286e-010	2,5517e-004
2,5e-002	7,8833e-010	5,1033e-004
3,75e-002	7,9286e-010	7,6542e-004
5,e-002	7,8836e-010	1,0205e-003
6,25e-002	7,8833e-010	1,2756e-003
7,5e-002	7,8834e-010	1,5306e-003
8,75e-002	7,8836e-010	1,7856e-003
0,1		2,0406e-003
0,1125	7,9286e-010	2,2955e-003
0,125	7,8834e-010	2,5504e-003
0,1375	7,9286e-010	2,8053e-003
0,15	7,8832e-010	3,0602e-003
0,1625	7,9286e-010	3,315e-003
0,175	5,7768e-009	5,0785e-003
0,1875	6,2523e-009	5,4674e-003
0,2	6,1498e-009	5,8021e-003
0,2125	2,5707e-008	1,0524e-003
0,225	1,1095e-008	9,875e-004
0,2375	3,3724e-008	6,8106e-004
0,25	3,3982e-008	5,3696e-004

Model (D4) > Explicit Dynamics (D5) > Solution (D6) > Equivalent Elastic Strain

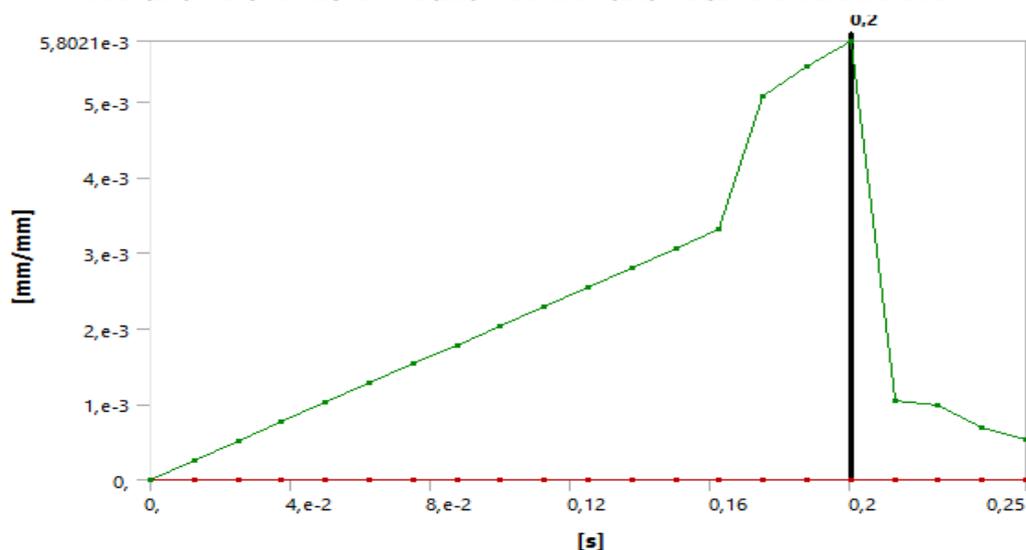


Figura IV.41. Deformación unitaria del PP-PE.

Deformación en el eje X

Tabla IV.7. Deformación en el eje X

Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Directional Deformation

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
1,1755e-038	0,	0,
5,0004e-003	-1,1253e-005	4,1838e-003
1,e-002	-4,0585e-005	8,3843e-003
1,5e-002	-7,7724e-005	1,2593e-002
2,e-002	-1,205e-004	1,6808e-002
2,5e-002	-1,6874e-004	2,1027e-002
3,e-002	-2,2189e-004	2,5252e-002
3,5e-002	-2,7959e-004	2,9482e-002
4,0001e-002	-3,4167e-004	3,3717e-002
4,5e-002	-4,0805e-004	3,7956e-002
5,e-002	-4,7854e-004	4,2199e-002
5,5e-002	-5,5304e-004	4,6447e-002
6,e-002	-6,3149e-004	5,0699e-002
6,5001e-002	-7,1376e-004	5,4955e-002
7,e-002	-9,997e-003	6,5023e-002
7,5e-002	-1,1056e-002	6,6163e-002
8,0001e-002	-1,1196e-003	7,0703e-002
8,5e-002	-9,5013e-003	7,4868e-002
9,e-002	-4,9074e-003	7,9458e-002
9,5001e-002	-5,1577e-003	8,4462e-002
0,1	-5,7577e-003	8,7755e-002

Model (D4) > Explicit Dynamics (D5) > Solution (D6) > Directional Deformation

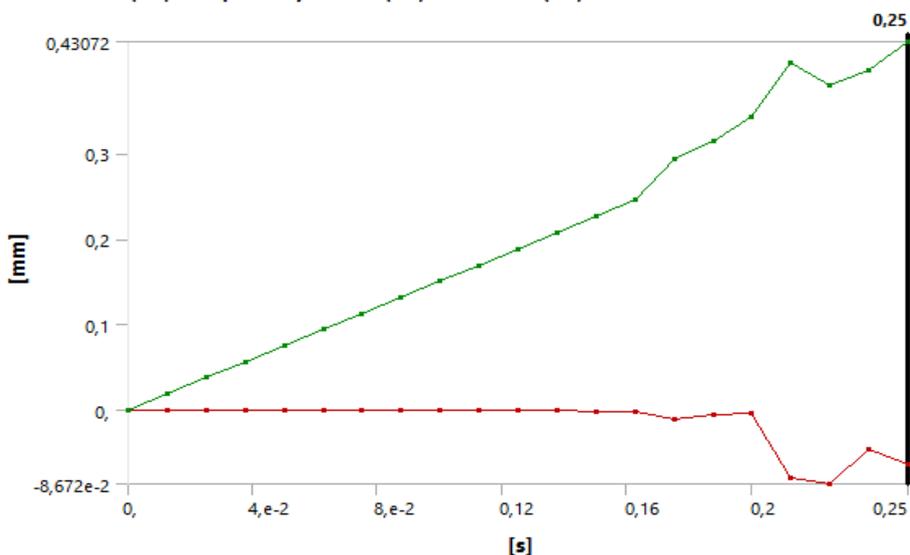


Figura IV.42. Gráfica del avance de la deformación máxima y mínima en el eje x

Tensión equivalente

Tabla IV.8. Resumen del avance de la tensión equivalente en el PP-PE.

Model (D4) > Explicit Dynamics (D5) > Solution (D6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
1,1755e-038	0,	0,
1,2501e-002		0,19442
2,5e-002		0,38807
3,75e-002		0,58147
5,e-002		0,77474
6,25e-002		0,96798
7,5e-002		1,1612
8,75e-002	6,9832e-007	1,3544
0,1		1,5476
0,1125		1,7408
0,125		1,9341
0,1375		2,1274
0,15		2,3207
0,1625		2,514
0,175	2,6378e-006	3,9879
0,1875	2,6767e-006	4,3067
0,2	2,7136e-006	4,5663
0,2125	1,5569e-005	1,9932
0,225	2,112e-005	0,7045
0,2375	1,7286e-005	0,75723
0,25	1,7619e-005	1,0295

FIGURE 3
Model (D4) > Explicit Dynamics (D5) > Solution (D6) > Equivalent Stress

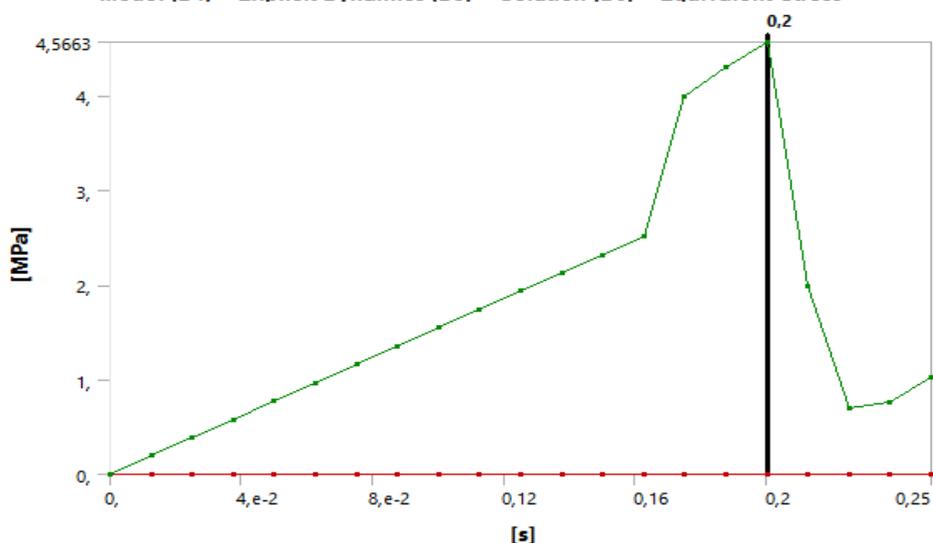


Figura IV.43. Gráfica del avance de la tensión equivalente máxima y mínima en el PP-PE

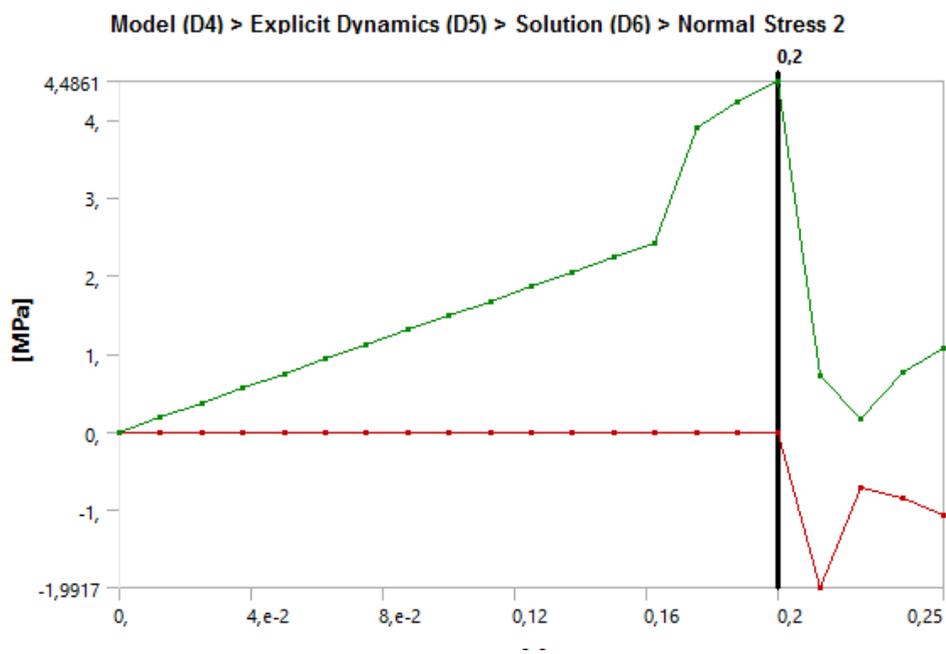


Figura IV.44. Gráfica del avance de la tensión normal en el PP-PE.

Caso 2: ABS-HIPS

Tabla IV.9. Resumen de los resultados del ABS-HIPS.

Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Results

Object Name	Directional Deformation	Equivalent Stress	Normal Stress	Equivalent Elastic Strain
State	Solved			
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection			
Geometry	All Bodies			
Definition				
Type	Directional Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress	Normal Stress	Equivalent Elastic Strain
Orientation	X Axis		X Axis	
By	Time			
Display Time	Last	6,5001e-002 s		
Coordinate System	Global Coordinate System		Global Coordinate System	
Calculate Time History	Yes			
Identifier				
Suppressed	No			
Results				
Minimum	-5,7577e-003 mm	5,1561e-007 MPa	-1,7018e-006 MPa	1,68e-008 mm/mm
Maximum	8,7755e-002 mm	1,0824 MPa	1,0853 MPa	4,9208e-004 mm/mm
Minimum Occurs On	Solid			
Maximum Occurs On	Solid			
Minimum Value Over Time				
Minimum	-1,1056e-002 mm	0, MPa	-0,53051 MPa	0, mm/mm
Maximum	0, mm	2,2068e-005 MPa	0, MPa	3,7133e-008 mm/mm
Maximum Value Over Time				
Minimum	0, mm	0, MPa		0, mm/mm
Maximum	8,7755e-002 mm	1,0824 MPa	1,0853 MPa	4,9208e-004 mm/mm
Information				
Time	0,1 s	6,5001e-002 s		
Set	21	14		
Integration Point Results				
Display Option	Averaged			
Average Across Bodies	No			

Deformación unitaria

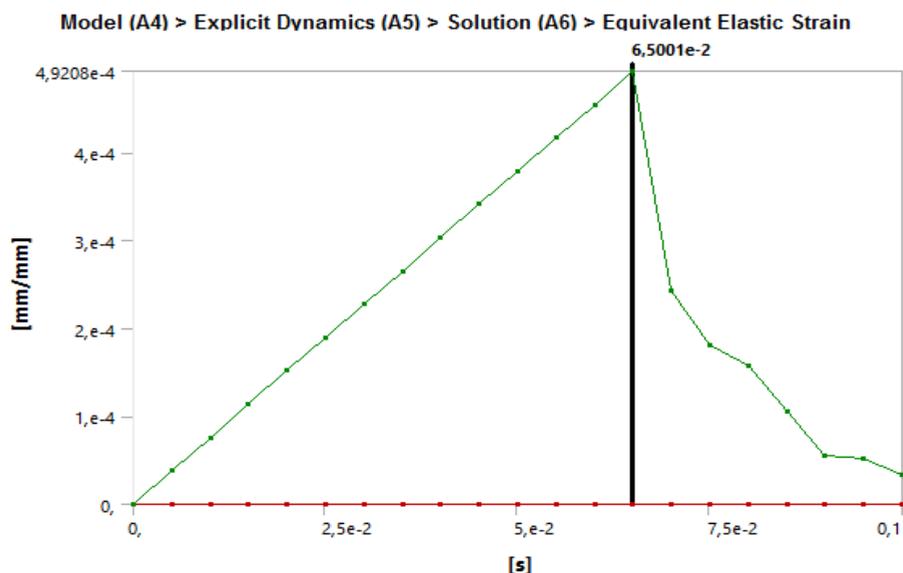


Figura IV.45. Gráfica de la deformación unitaria del ABS-HIPS.

Tabla IV.10. Resumen de la deformación unitaria.

Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Equivalent Elastic Strain

Time [s]	Minimum [mm/mm]	Maximum [mm/mm]
1,1755e-038	0,	0,
5,0004e-003	0,	3,8061e-005
1,e-002	1,3337e-010	7,5881e-005
1,5e-002	1,994e-010	1,1366e-004
2,e-002	3,8917e-010	1,5151e-004
2,5e-002	8,3488e-010	1,8936e-004
3,e-002	1,4119e-009	2,2721e-004
3,5e-002	1,8829e-009	2,6505e-004
4,0001e-002	3,632e-009	3,029e-004
4,5e-002	6,0186e-009	3,4074e-004
5,e-002	8,6513e-009	3,7857e-004
5,5e-002	1,1374e-008	4,1641e-004
6,e-002	1,3895e-008	4,5424e-004
6,5001e-002	1,68e-008	4,9208e-004
7,e-002	3,7133e-008	2,4216e-004
7,5e-002	3,2252e-008	1,8048e-004
8,0001e-002	1,7113e-008	1,5668e-004
8,5e-002	1,6609e-008	1,0547e-004
9,e-002	1,8908e-008	5,4892e-005
9,5001e-002	1,9608e-008	5,1675e-005
0,1	1,8974e-008	3,2917e-005

Deformación en el eje X

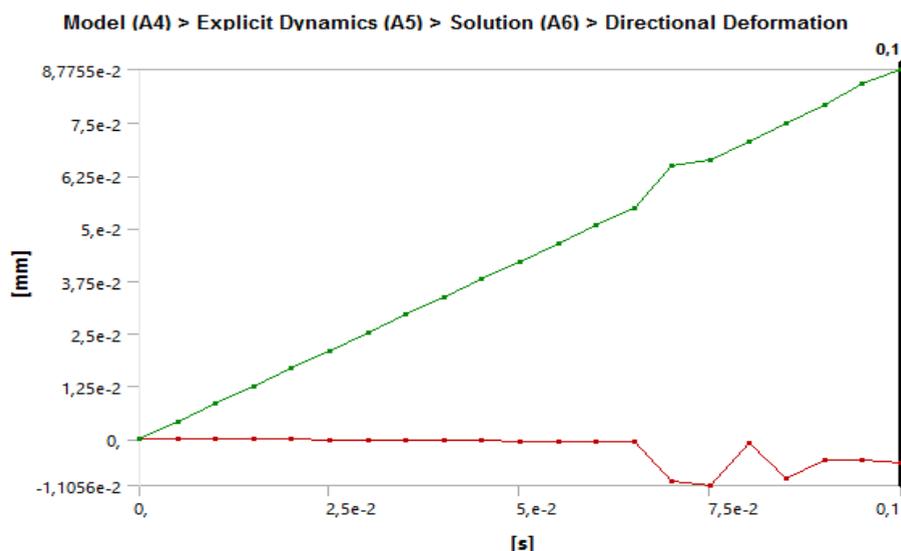


Figura IV.46. Gráfica de la deformación del eje X del ABS-HIPS.

Tabla IV.11. Resumen de la deformación en el eje X del ABS-HIPS.

Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Directional Deformation

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
1,1755e-038	0,	0,
5,0004e-003	-1,1253e-005	4,1838e-003
1,e-002	-4,0585e-005	8,3843e-003
1,5e-002	-7,7724e-005	1,2593e-002
2,e-002	-1,205e-004	1,6808e-002
2,5e-002	-1,6874e-004	2,1027e-002
3,e-002	-2,2189e-004	2,5252e-002
3,5e-002	-2,7959e-004	2,9482e-002
4,0001e-002	-3,4167e-004	3,3717e-002
4,5e-002	-4,0805e-004	3,7956e-002
5,e-002	-4,7854e-004	4,2199e-002
5,5e-002	-5,5304e-004	4,6447e-002
6,e-002	-6,3149e-004	5,0699e-002
6,5001e-002	-7,1376e-004	5,4955e-002
7,e-002	-9,997e-003	6,5023e-002
7,5e-002	-1,1056e-002	6,6163e-002
8,0001e-002	-1,1196e-003	7,0703e-002
8,5e-002	-9,5013e-003	7,4868e-002
9,e-002	-4,9074e-003	7,9458e-002
9,5001e-002	-5,1577e-003	8,4462e-002
0,1	-5,7577e-003	8,7755e-002

Tensión normal

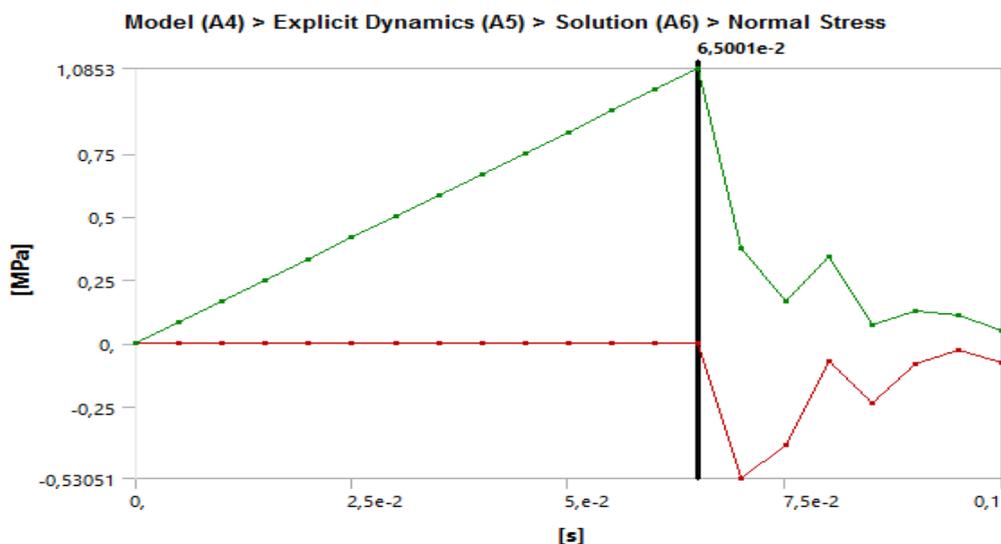


Figura IV.47. Gráfica del avance de la tensión normal en el ABS-HIPS.

Tabla IV.12. Resumen del avance de la tensión normal en el ABS-HIPS.

Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Normal Stress

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
1,1755e-038	0,	0,
5,0004e-003		8,3939e-002
1,e-002	-4,943e-007	0,16734
1,5e-002		0,25067
2,e-002		0,33412
2,5e-002		0,41762
3,e-002	-5,8952e-007	0,5011
3,5e-002	-9,4503e-007	0,58457
4,0001e-002	-1,125e-006	0,66804
4,5e-002	-1,3031e-006	0,75149
5,e-002	-1,2997e-006	0,83495
5,5e-002	-1,3e-006	0,9184
6,e-002	-1,5237e-006	1,0019
6,5001e-002	-1,7018e-006	1,0853
7,e-002	-0,53051	0,37487
7,5e-002	-0,39818	0,16926
8,0001e-002	-7,0639e-002	0,34576
8,5e-002	-0,23183	7,6095e-002
9,e-002	-8,2232e-002	0,12901
9,5001e-002	-2,6119e-002	0,11297
0,1	-7,233e-002	5,4676e-002

4.4.9 Conclusiones parciales

Respecto al modelado mediante elementos finitos de uniones en piezas bimaternal se encuentra la problemática de la simulación de la interfaz de ambos materiales, este problema es comparable a la simulación de elementos soldados o piezas unidas mediante adhesivos, dichos tipos de uniones son de difícil solución debido a que los programas de elementos finitos adoptan los volúmenes de materia con propiedades constantes, es decir cada volumen tiene asignado las propiedades de un material. La relación entre dos volúmenes en los programas FEA (finite element analysis) se establece mediante propiedades físicas, sin embargo, en la realidad las uniones de las soldaduras como de las interfaces en probetas bimaternal intervienen procesos fisicoquímicos que son difícilmente simulables sin datos experimentales.

Observando los resultados obtenidos en ambos casos, tanto del conjunto PP-PE como del ABS-HIPS, la fractura de la probeta se produce de forma súbita comenzando en la cara exterior y avanzando de forma veloz a lo largo de toda la unión generando la rotura de la probeta sistemáticamente.

4.5 Estudio mediante el programa Ansys Workbench del comportamiento a flexión de las probetas objeto de estudio

4.5.1 Consideraciones iniciales

Al igual que el ensayo de tracción para poder detectar en el ensayo de tracción la rotura del material se ha empleado el módulo de ANSYS de explicit dynamics.

Del mismo modo y tras la realización de múltiples pruebas se ha detectado que el programa no puede realizar un tiempo de ciclo de más de un segundo, por tanto se ha tenido que adaptar la velocidad de ensayo para poder realizar el estudio en dicho programa sin este tipo de cambio sería matemáticamente imposible la realización de un estudio de rotura mediante elementos finitos.

4.5.2 Configuración de los materiales

La configuración inicial de los materiales es la misma que la adoptada en el apartado de tracción, solo habrá que configurar los materiales en el módulo Mechanical para ello se seleccionaran las semiprobetas con los termoplásticos usados para cada caso y los

apoyos y el empujador se seleccionará el acero estructural predefinido en el módulo, además las partes de acero se establecerá una configuración de rígido, esto establecerá en el programa que no existe deformaciones ni tensiones en los apoyos dado que en comparación con las sufridas en la probeta las podemos considerar como despreciables.

4.5.3 Configuración de la geometría

La geometría se puede generar mediante cualquier software CAD disponible siguiendo las directrices de la normativa UNE-EN ISO 178:1993. La probeta a realizar se realizará en dos semiprobetas. En este caso se ha realizado un montaje de todo el conjunto en el software SolidWorks luego se importará a ANSYS en cualquiera de los formatos compatibles en dicho programa.

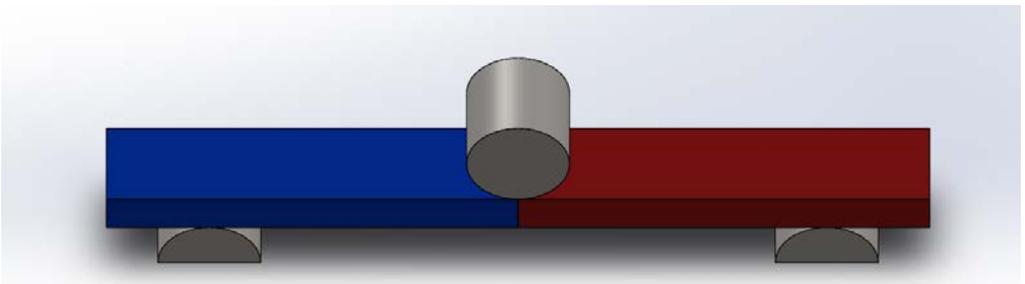


Figura IV.48. Montaje del ensayo mediante el software SolidWorks

4.5.4 Configuración de la malla

Como se ha explicado en el apartado 4.1.5 se generará la malla básica y se comprobará por el método “skewness “que el valor máximo es inferior a 0,95, en este caso ronda entorno al 0,67, hay que llevar precaución en este aspecto debido a que el mallado puede variar considerablemente de un ordenador a otro.

4.5.5 Configuración de los contactos

Una vez configurada la malla y los materiales se configurará los distintos contactos entre las diferentes partes.

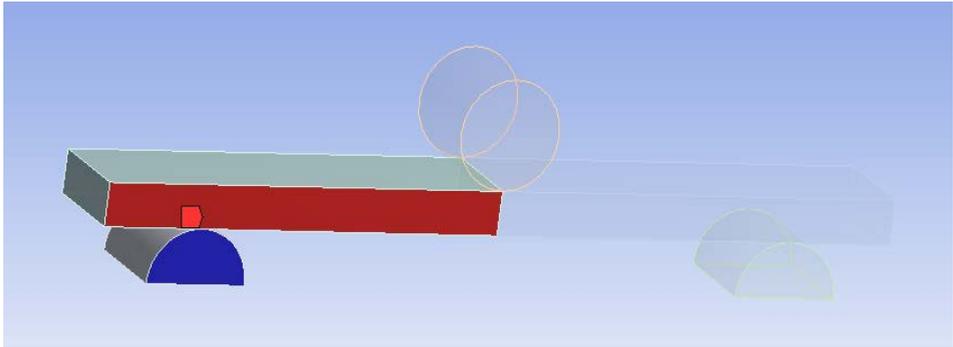


Figura IV.49. Caras a seleccionar en la configuración del primer y segundo contacto.

Primer contacto entre semiprobeta 1 y apoyo 2, establece un contacto de tipo “Bonded”, se seleccionara las caras mostradas en la figura.

Segundo contacto entre la semiprobeta 2 y el apoyo 1 se establece un contacto de tipo “Bonded”, las caras seleccionadas serán las mostradas en la figura.

Se establecerán dos contactos de tipo “Frictionless” entre la cara del empujador y la cara superior de cada semiprobeta. También se generará otro contacto de tipo “Bonded” entre la cara lateral del empujador y uno de los apoyos.

La región de contactos de las semiprobetas se realizará mediante un contacto de tipo bonded añadiendo, como en el caso de tracción, una condición de criterio rotura por tensión. Los parámetros para este tipo de criterio han sido de 3,126MPa en el PP-PE y de 2,464 en el ABS-HIPS para el “Normal stress limit” y “shear stress limit” y de 0,5 en PP-PE y de 0,45 en el ABS-HIPS para “Normal stress exponent” y “shear stress Exponent”.

4.5.6 Configuración de las condiciones de contorno

Una vez configuradas las regiones de contacto, se añadirán los apoyos, para ello seleccionarán en el modelo los apoyos y se introducirá la condición de apoyo fijo.

Finalmente se introducirá la velocidad de bajada del empujador, en este apartado se ha optado por una velocidad de ensayo recomendada debido a que las velocidades de ensayos que se encuentran normalizadas para dichos para materiales son muy lentas y no permite detectar la rotura antes de que aparezca un error de energía demasiado alta en ANSYS. Por tanto se empleará una velocidad de 2mm/s para ambos ensayos.

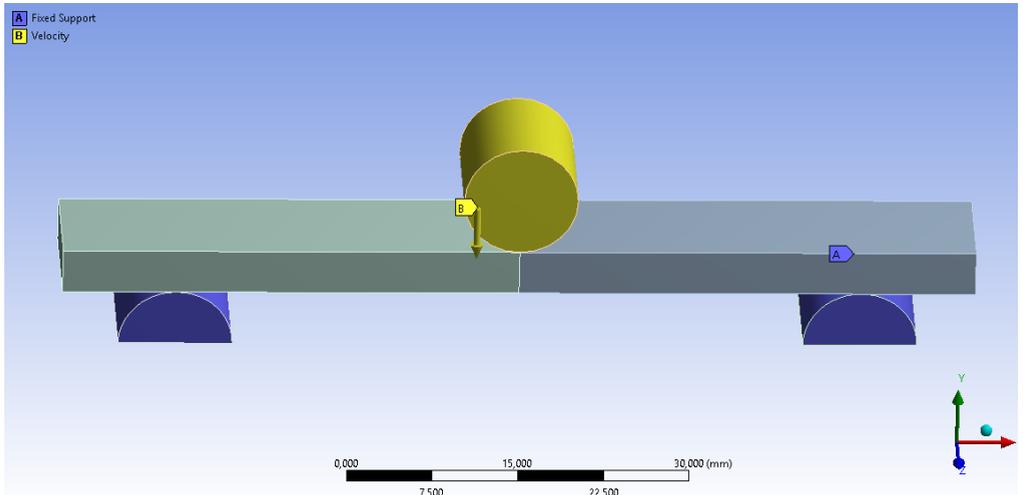


Figura IV.50. Condiciones de entorno del ensayo.

4.5.7 Preparación de los resultados

Los resultados necesarios serán:

- Tensión equivalente
- Deformación direccional en el eje Y.

4.5.8 Resultados obtenidos

Caso 1: PP-PE

Tabla IV.13. Resumen de resultados del ensayo de flexión.

Model (D4) > Explicit Dynamics (D5) > Solution (D6) > Results		
Object Name	<i>Directional Deformation</i>	<i>Equivalent Stress</i>
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Directional Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
Orientation	Y Axis	
By	Time	
Display Time	Last	0,3 s
Coordinate System	Global Coordinate System	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Suppressed	No	
Results		
Minimum	-0,77646 mm	0, MPa
Maximum	0,95226 mm	4,6312e-002 MPa
Minimum Occurs On	semiprobeta-2	apoyo-2
Maximum Occurs On	semiprobeta-1	
Minimum Value Over Time		
Minimum	-0,95575 mm	0, MPa
Maximum	0, mm	0, MPa
Maximum Value Over Time		
Minimum	0, mm	0, MPa
Maximum	1,3866 mm	3,041 MPa
Information		
Time	0,3 s	
Set	21	
Integration Point Results		
Display Option	Averaged	
Average Across Bodies	No	

Deformación direccional

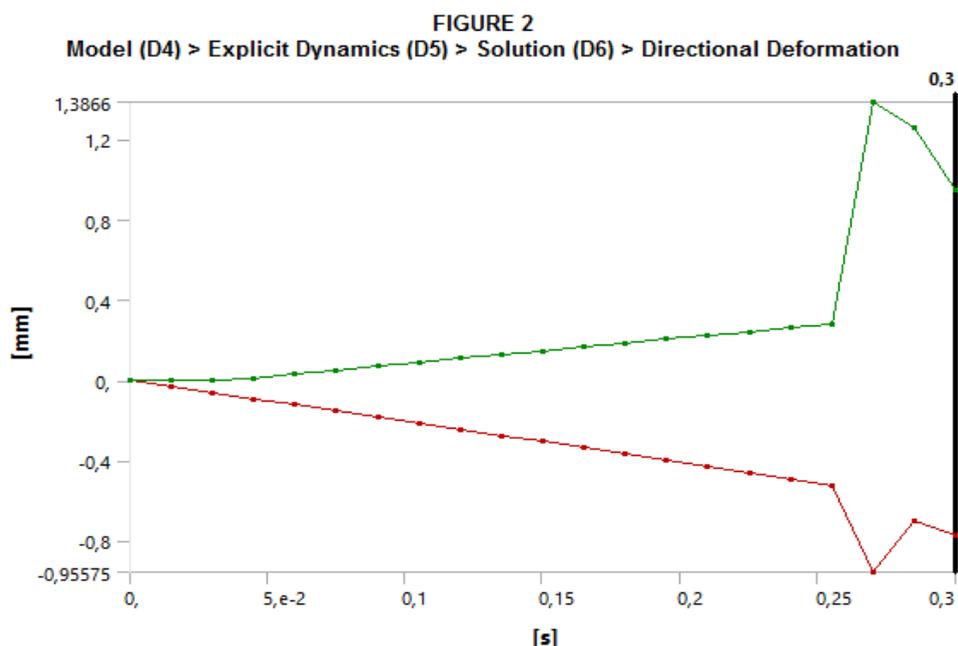


Tabla IV.14. Resumen de la deformación el eje Y.

Model (D4) > Explicit Dynamics (D5) > Solution (D6) > Directional Deformation

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
1,1755e-038	0,	0,
1,5e-002	-3,0144e-002	4,4409e-016
3,e-002	-6,0729e-002	
4,5e-002	-9,136e-002	1,074e-002
6,e-002	-0,12202	2,994e-002
7,5e-002	-0,1526	4,9404e-002
9,e-002	-0,18314	6,8958e-002
0,105	-0,2137	8,8537e-002
0,12	-0,24425	0,10809
0,135	-0,2748	0,12759
0,15	-0,30532	0,14709
0,165	-0,33583	0,16669
0,18	-0,36629	0,18634
0,195	-0,39698	0,20603
0,21	-0,4271	0,22029
0,225	-0,4601	0,24161
0,24	-0,49406	0,26019
0,255	-0,5281	0,27868
0,27	-0,95575	1,3866
0,285	-0,70427	1,2594
0,3	-0,77646	0,95226

Tensión equivalente

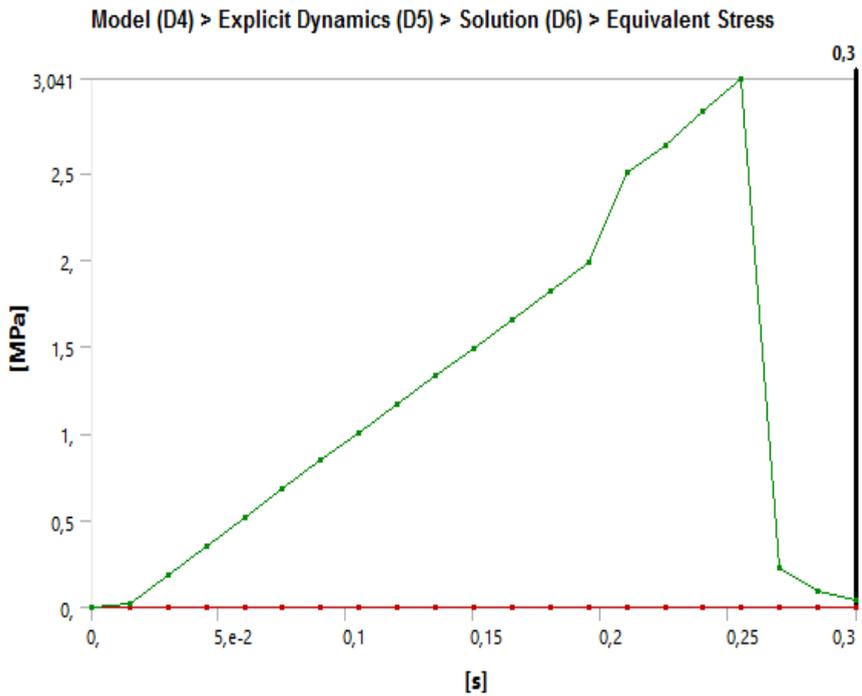


Figura IV.52. Gráfica del avance de la tensión equivalente en el PP-PE.

Tabla IV.15. Resumen del avance de la tensión equivalente del PP-PE.

Model (D4) > Explicit Dynamics (D5) > Solution (D6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
1,1755e-038		0,
1,5e-002		1,9922e-002
3,e-002		0,18422
4,5e-002		0,35107
6,e-002		0,51633
7,5e-002		0,68142
9,e-002		0,8453
0,105		1,0077
0,12		1,1694
0,135		1,3308
0,15	0,	1,4929
0,165		1,6554
0,18		1,8181
0,195		1,9811
0,21		2,4983
0,225		2,6544
0,24		2,852
0,255		3,041
0,27		0,22399
0,285		9,7313e-002
0,3		4,6312e-002

Caso 2: ABS-HIPS

Tabla IV.16. Resumen de resultados del ensayo a flexión del ABS-HIPS.

Model (B4) > Explicit Dynamics (B5) > Solution (B6) > Results		
Object Name	<i>Directional Deformation</i>	<i>Equivalent Stress</i>
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	All Bodies	
Definition		
Type	Directional Deformation	Equivalent (von-Mises) Stress
Orientation	Y Axis	
By	Time	
Display Time	Last	4,95e-002 s
Coordinate System	Global Coordinate System	
Calculate Time History	Yes	
Identifier		
Suppressed	No	
Results		
Minimum	-0,45465 mm	0, MPa
Maximum	0,13546 mm	2,5604 MPa
Minimum Occurs On	semiprobeta-1	apoyo-2
Maximum Occurs On	semiprobeta-2	
Minimum Value Over Time		
Minimum	-0,45465 mm	0, MPa
Maximum	0, mm	0, MPa
Maximum Value Over Time		
Minimum	0, mm	0, MPa
Maximum	0,13546 mm	2,5604 MPa
Information		
Time	9,e-002 s	4,95e-002 s
Set	21	12
Integration Point Results		
Display Option		Averaged
Average Across Bodies		No

Deformación direccional

Tabla IV.17. Resumen de la deformación el eje Y

Model (B4) > Explicit Dynamics (B5) > Solution (B6) > Directional Deformation

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
1,1755e-038	0,	0,
4,5e-003	-2,805e-002	4,4409e-016
9,0002e-003	-4,5001e-002	
1,35e-002	-6,7501e-002	
1,8e-002	-9,0001e-002	5,0609e-003
2,25e-002	-0,1125	1,7065e-002
2,7e-002	-0,135	2,9454e-002
3,15e-002	-0,1575	4,0379e-002
3,6e-002	-0,18	5,231e-002
4,05e-002	-0,2025	6,503e-002
4,5e-002	-0,225	7,726e-002
4,95e-002	-0,2475	8,904e-002
5,4e-002	-0,27386	7,32e-002
5,85e-002	-0,29692	7,9165e-002
6,3e-002	-0,31862	8,5839e-002
6,75e-002	-0,34124	9,4108e-002
7,2e-002	-0,36412	0,1017
7,65e-002	-0,38682	0,11044
8,1e-002	-0,40948	0,1189
8,55e-002	-0,4321	0,12715
9,e-002	-0,45465	0,13546

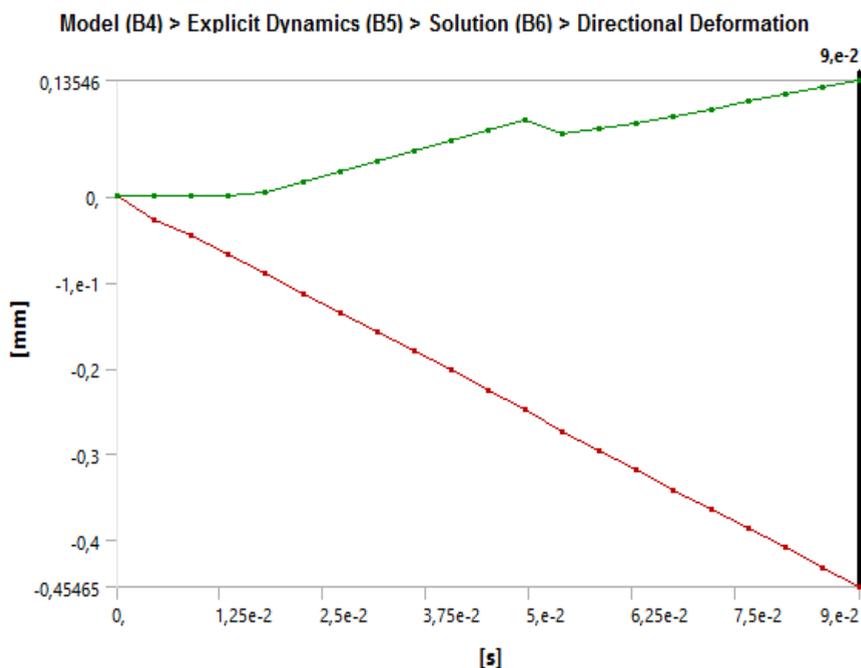


Figura IV.53. Gráfica de la deformación en el eje Y del ABS-HIPS.

Tensión equivalente

Tabla IV.18. Resumen del avance de la tensión equivalente.

Model (B4) > Explicit Dynamics (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
1,1755e-038		0,
4,5e-003		2,2092e-002
9,0002e-003		0,17083
1,35e-002		0,4111
1,8e-002		0,64913
2,25e-002		0,88128
2,7e-002		1,1095
3,15e-002		1,559
3,6e-002		1,837
4,05e-002		2,1039
4,5e-002	0,	2,2675
4,95e-002		2,5604
5,4e-002		0,20314
5,85e-002		0,22494
6,3e-002		0,17401
6,75e-002		0,16363
7,2e-002		0,15018
7,65e-002		0,14185
8,1e-002		0,1387
8,55e-002		0,13534
9,e-002		0,13319

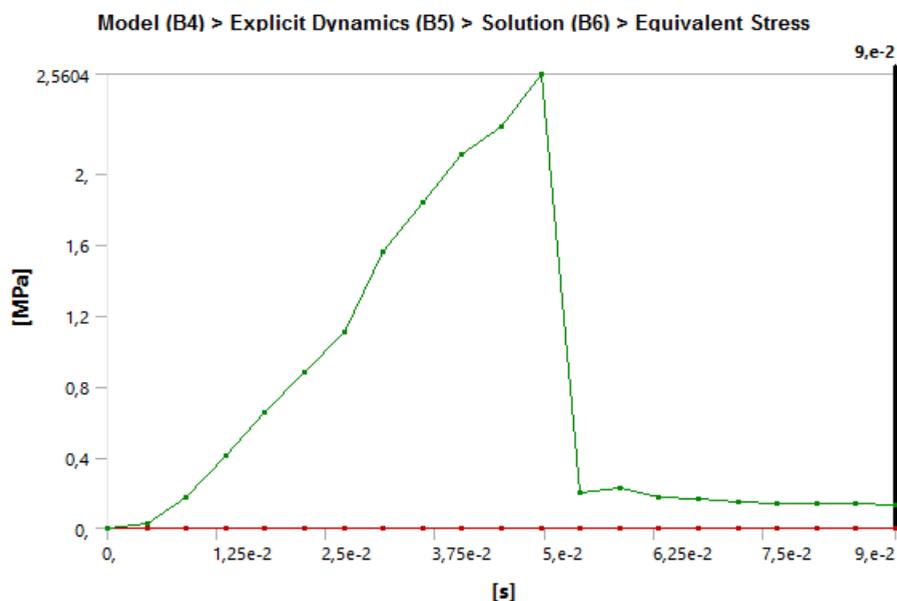


Figura IV.54. Gráfica del avance de la tensión equivalente en el ABS-HIPS.

4.5.9 Conclusiones parciales

Tal y como se ha explicado para el ensayo de tracción en el apartado 3.6.8 existe una gran dificultad a la hora de evaluar las propiedades de la unión entre las de las dos fases de material.

De la misma forma que ha pasado con el ensayo de tracción al aplicar un esfuerzo cortante sobre la unión, se ha generado una grieta desde la superficie inferior que ha causado el colapso de la probeta bimaterial.

4.6 Caracterización mecánica de los materiales

4.6.1 Ensayo de tracción

Las propiedades mecánicas de las probetas bimateriales han sido obtenidas con un equipo de tracción ELIB 30 (S.A.E. Ibertest, Madrid, Spain) descrito en el apartado siguiendo las directrices de la norma ISO 527 [UNE-EN-ISO-527-3, 1996]. Todas las muestras fueron ensayadas a 22 °C y una humedad relativa del 50%, empleando una velocidad de avance de 50 mm/min con una célula de carga de 5 kN. El número mínimo de probetas ensayadas ha sido de 10 y se han calculado la media de los valores de alargamiento a la rotura (propiedad mecánica a ductilidad) y tensión de rotura (propiedad mecánica a resistencia).



Figura IV.55. Probetas bimaterial empleadas en los ensayos de laboratorio.

Caso 1:PP-PE

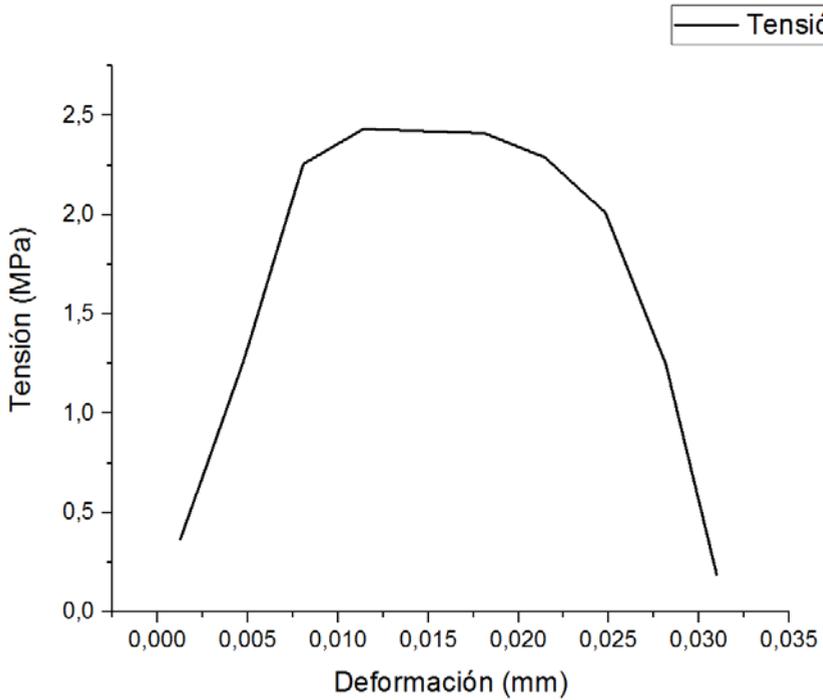


Figura IV.56. Gráfica tensión deformación del PP-PE.

Caso 2: ABS-HIPS

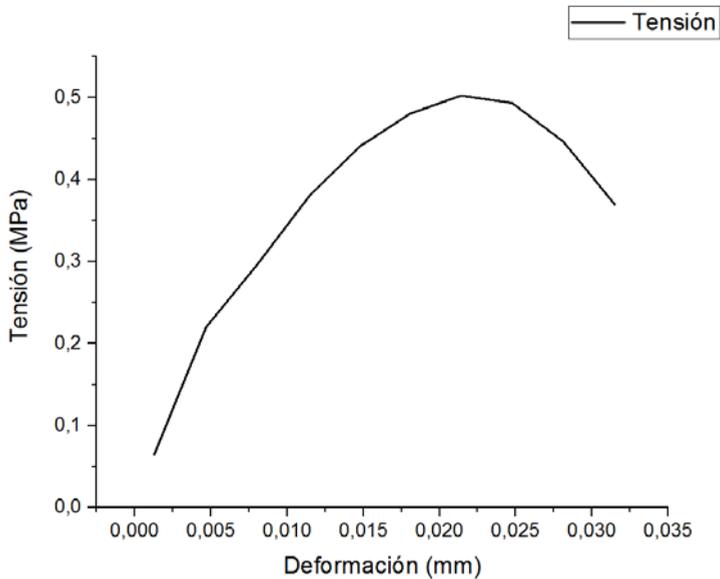


Figura IV.57. Gráfica tensión deformación del ABS-HIPS.

4.6.2 Conclusiones parciales

En las gráficas de la figura IV.31 y IV.21 se muestran los ensayos de las probetas de PP-PE y ABS-HIPS respectivamente. Se muestra, claramente un comportamiento extremadamente frágil en la aplicación de un esfuerzo de tracción.

Para solventar dicho problema de fragilidad en la zona de unión de ambos materiales se va a aplicar un tratamiento de calentamiento que permitirá mayor interacción entre los diferentes materiales y reforzará la zona de unión.

4.6.3 Ensayo de tracción de las probetas reforzadas por recalentamiento

Caso 1: PP-PE

Realizadas todas las mediciones se realiza una tabla con los diferentes resultados para poder valorar el comportamiento de la unión. Como se puede observar en la Figura IV.58, Gráfica de tensión deformación del PP-PE, el carácter de la unión de dichos materiales es frágil.

Efectuadas las mediciones se procede a la comparativa con ANSYS, a simple vista se puede observar existe cierta equivalencia entre ambas gráficas, tal y como se predijo en ANSYS el comportamiento de la probeta PP-PE ha sido de una rotura frágil. Realizando un análisis del error efectuado entre el punto de rotura de la probeta real en comparativa con el punto de rotura de la probeta simulada existe un error del 3,9% tomando la tensión de rotura promedio y un error máximo del 11,7%.

Tabla IV.19. Errores relativos de los ensayos de tracción del PP-PE

	Tensión de rotura (MPa)	Error (%)
Ensayo 1	4,9	8,44
Ensayo 2	4,2	6,69
Ensayo 3	4,26	5,26
Ensayo 4	4,9	8,44
Ensayo 5	5,08	11,76
Tensión promedio	4,67	3,94

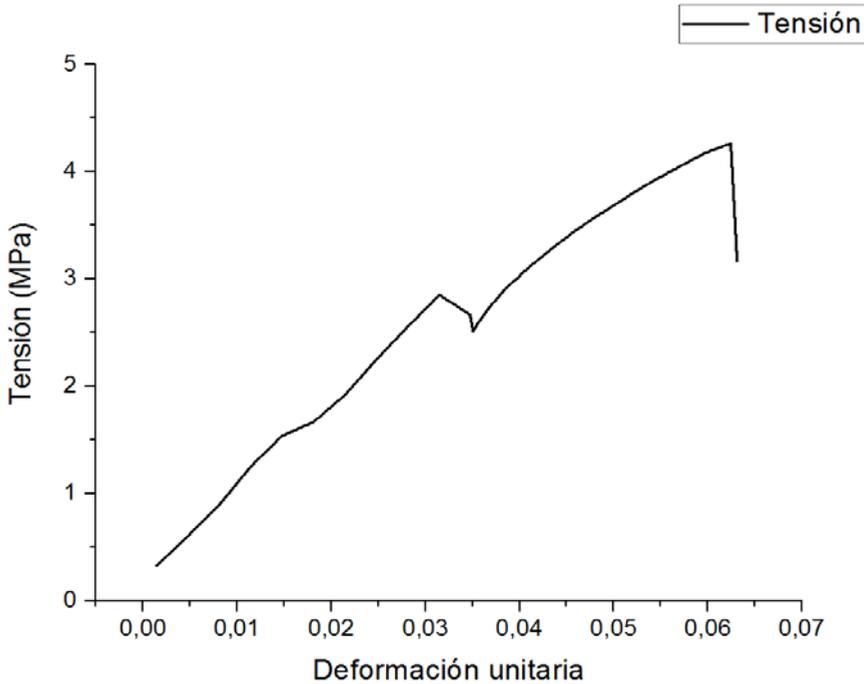


Figura IV.58. Gráfica de tensión deformación del PP-PE.

Caso 2: ABS-HIPS

Realizando una gráfica con los resultados obtenidos en el laboratorio y tras haber analizado el caso del PP-PE, teniendo en cuenta que el ABS es un material rígido la unión del ABS-HIPS, reviste de un carácter aún más frágil que el del caso del PP-PE pese a la compatibilidad parcial que existen entre dichos materiales.

Tabla IV.20. Errores relativos de los ensayos de tracción del ABS-HIPS

	Tensión de rotura (MPa)	Error (%)
Ensayo 1	1,17	7,23
Ensayo 2	1,20	9,55
Ensayo 3	1,34	19,01
Ensayo 4	1,36	20,19
Ensayo 5	1,25	13,17
Tensión promedio	1,29	16,08

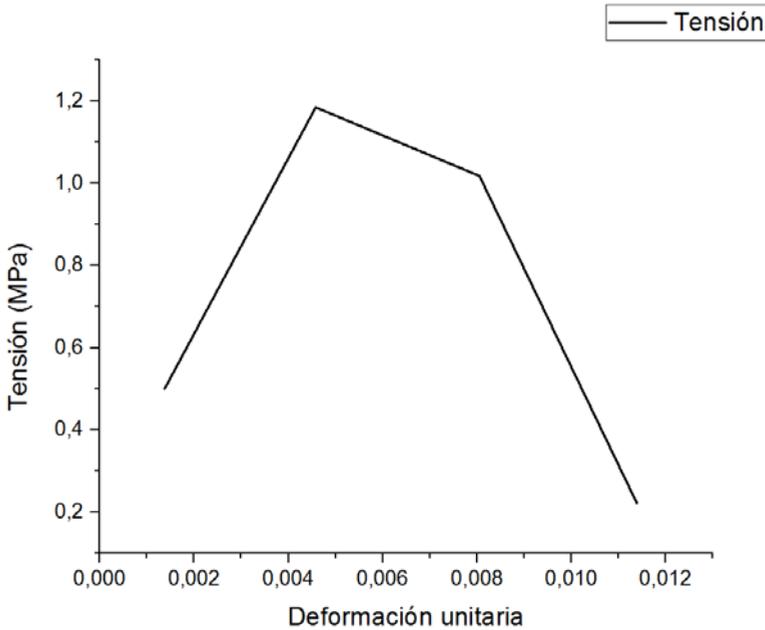


Figura IV.59. Grafica tensión deformación del ABS-HIPS.

Realizando un análisis del error efectuado entre el punto de rotura de la probeta real en comparativa con el punto de rotura de la probeta simulada existe un error del 16% tomando la tensión de rotura promedio y un error máximo del 20%. Este margen de error es debido a la gran fragilidad de la unión entre el ABS-HIPS, con solo un margen de 0,3Mpa es capaz de provocar un error del 20%.

Caso 1: PP-PE

Comparando las gráficas obtenidas mediante el análisis por elementos finitos en ANSYS, a los obtenidos mediante proceso experimental de laboratorio se puede afirmar que la rotura de la unión PP-PE es de tipo frágil. El principal problema mostrado en la simulación es que la deformación experimentada en el material es menor a la realizada por la máquina de ensayos.

Tabla IV.21. Errores relativos de los ensayos de flexión del PP-PE

	Tensión de rotura (MPa)	Error (%)
Ensayo 1	3,39	10,29
Ensayo 2	2,42	25,66
Ensayo 3	2,67	13,89
Ensayo 4	4,16	26,89
Ensayo 5	2,99	1,71
Tensión promedio	3,126	2,72

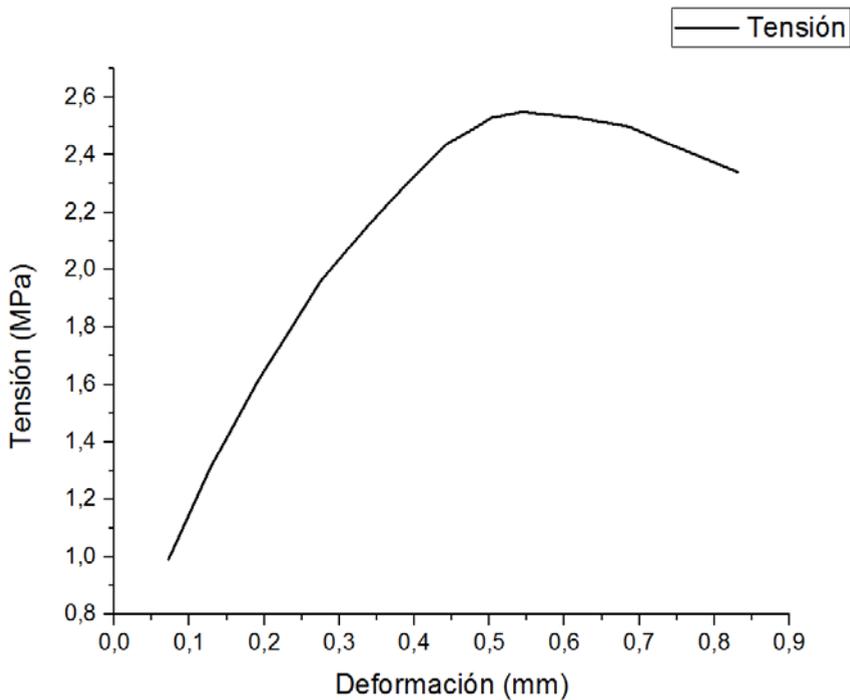


Figura IV.60. Gráfica tensión deformación del PP-PE.

Se debe señalar que es bastante peculiar el comportamiento de la unión PP-PE, teniendo en cuenta que son materiales termoplásticos parcialmente miscibles y ambos son de carácter dúctil, por tanto se estudiará la unión entre ambas fases mediante una microscopia por barrido electrónico.

Caso 2: ABS-HIPS

Realizando una gráfica con los resultados obtenidos en el laboratorio y tras haber analizado el caso del PP-PE, teniendo en cuenta que el ABS es un material rígido la unión del ABS-HIPS, reviste de un carácter aún más frágil que el del caso del PP-PE pese a la compatibilidad parcial que existen entre dichos materiales.

Realizando un análisis del error efectuado entre el punto de rotura de la probeta real en comparativa con el punto de rotura de la probeta simulada existe un error del 16% tomando la tensión de rotura promedio y un error máximo del 20%. Este margen de

error es debido a la gran fragilidad de la unión entre el ABS-HIPS, con solo un margen de 0,3Mpa es capaz de provocar un error del 20%.

Tabla IV.22. Errores relativos de los ensayos de tracción del ABS-HIPS

	Tensión de rotura (MPa)	Error (%)
Ensayo 1	1,17	7,23
Ensayo 2	1,20	9,55
Ensayo 3	1,34	19,01
Ensayo 4	1,36	20,19
Ensayo 5	1,25	13,17
Tensión promedio	1,29	16,08

Comparando las gráficas obtenidas mediante el análisis por elementos finitos en ANSYS, a los obtenidos mediante proceso experimental de laboratorio se puede afirmar que la rotura de la unión ABS-HIPS es de tipo frágil. Analizando el punto de rotura, se compara el error relativo efectuado entre el punto de rotura de la simulación en comparativa con el punto de rotura de la probeta real. El error relativo generado es del 3,9% tomando la tensión de rotura promedio y un error relativo máximo del 11,7%.

El principal problema mostrado en la simulación es la deformación experimentada en el material es menor a la realizada por la máquina de ensayos.

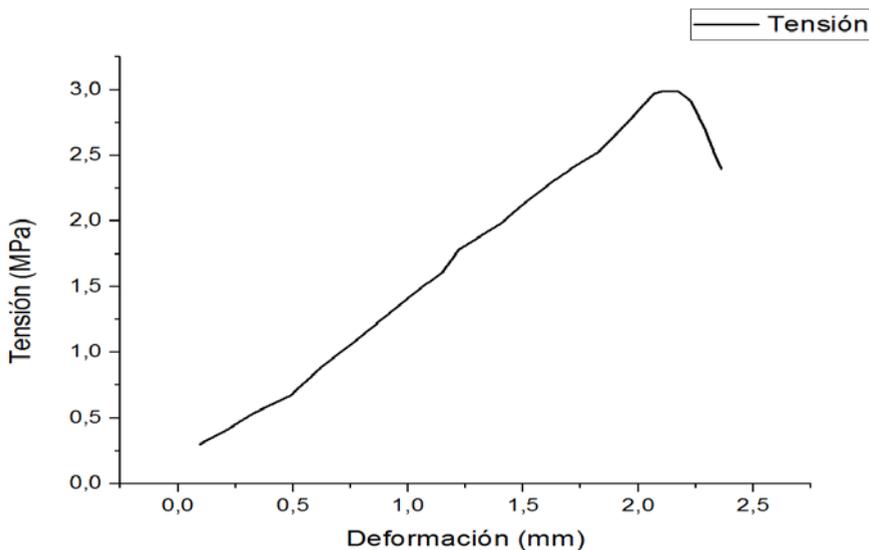


Figura IV.61. Gráfica de tensión deformación del ABS-HIPS.

Tabla IV.23. Errores relativos de los ensayos de flexión del ABS-HIPS

	Tensión de rotura (MPa)	Error (%)
Ensayo 1	1,84	39,15
Ensayo 2	1,98	29,31
Ensayo 3	2,58	0,75
Ensayo 4	2,57	0,37
Ensayo 5	3,35	23,57
Tensión promedio	2,46	3,91

Al igual que ha pasado en el caso del PP-PE debido a la fragilidad de la unión se procede a la realización de una microscopía para el estudio de la frontera del ABS-HIPS para su caracterización morfológica

4.7 Caracterización morfológica

El estudio morfológico de las interfaces de bimaternal se ha realizado empleando la técnica de microscopía electrónica por barrido (SEM), en un equipo JEOL modelo JSM-6300. Antes de la caracterización de las muestras se ha de proceder a su preparación y acondicionamiento.

4.8 Conclusiones parciales

CASO 1: PP-PE

En el análisis mediante microscopía electrónica de barrido de la interfaz PP-PE, se muestra claramente la presencia de dos zonas y la línea de frontera de ambas zonas. Debido al proceso de manufactura existen pequeñas grietas producidas:

- Falta de adherencia de ambos materiales.
- Atrapamientos de aire.
- Fenómenos de contracción.

Debido a estos fenómenos el material presenta una unión frágil a los esfuerzos de tracción y cortadura en dicha unión.

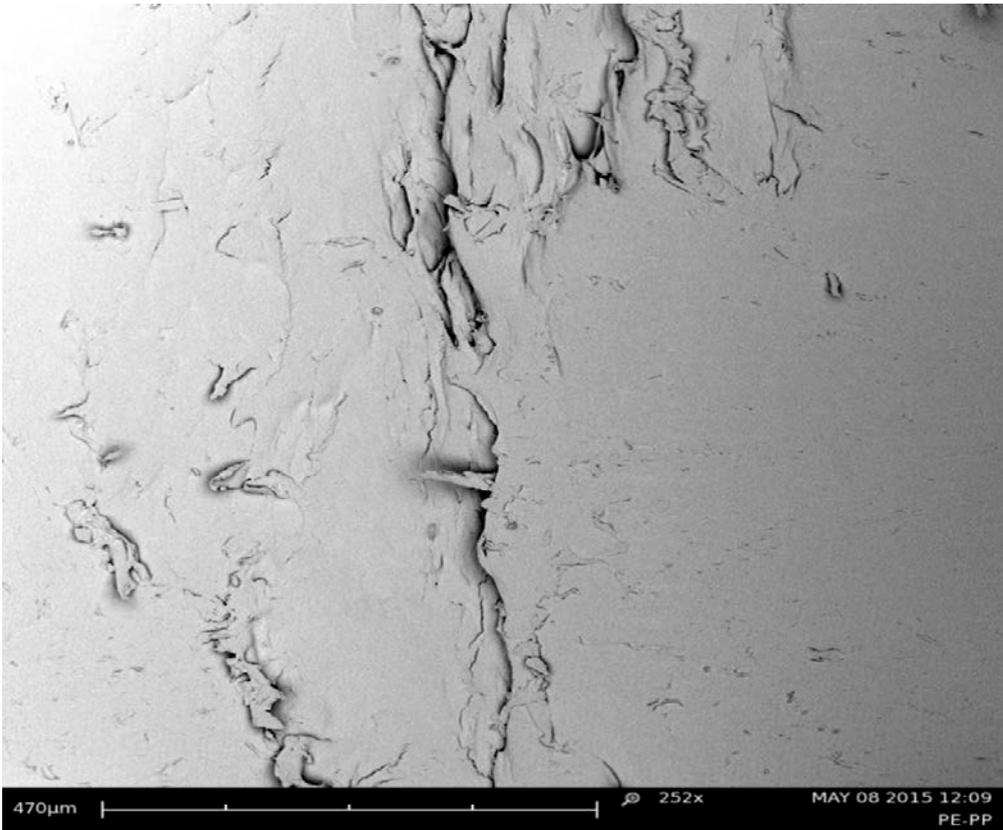


Figura IV.62, Microscopia SEM del PP-PE.

Mediante la corrección por recalentamiento y presión, se consigue la eliminación parcial de dichas grietas obteniendo una frontera con mayor interacción entre materiales y mejorando el comportamiento a tracción y flexión de dicha unión. Se debe señalar que pese a la existencia de ser materiales parcialmente miscibles, mediante la microscopía electrónica de barrido se muestra la inmiscibilidad de dichos materiales en un proceso de sobremoldeo.

Además teniendo en cuenta lo mostrado en Moldflow se podría extrapolar dichos resultados a las probetas generadas mediante coinyección debido a la interacción de flujos frontales la soldadura entre ambos materiales sería muy pobre y se generaría el mismo problema que el mostrado en este caso.

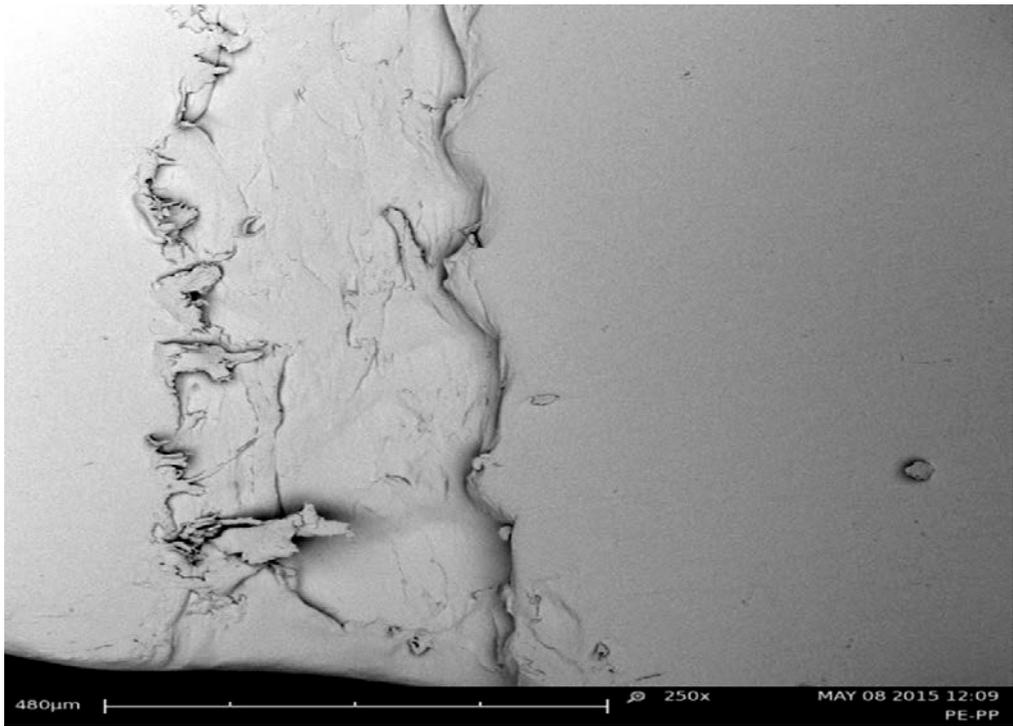


Figura IV.63. Microscopía SEM del PP-PE tras aplicar un recalentamiento.

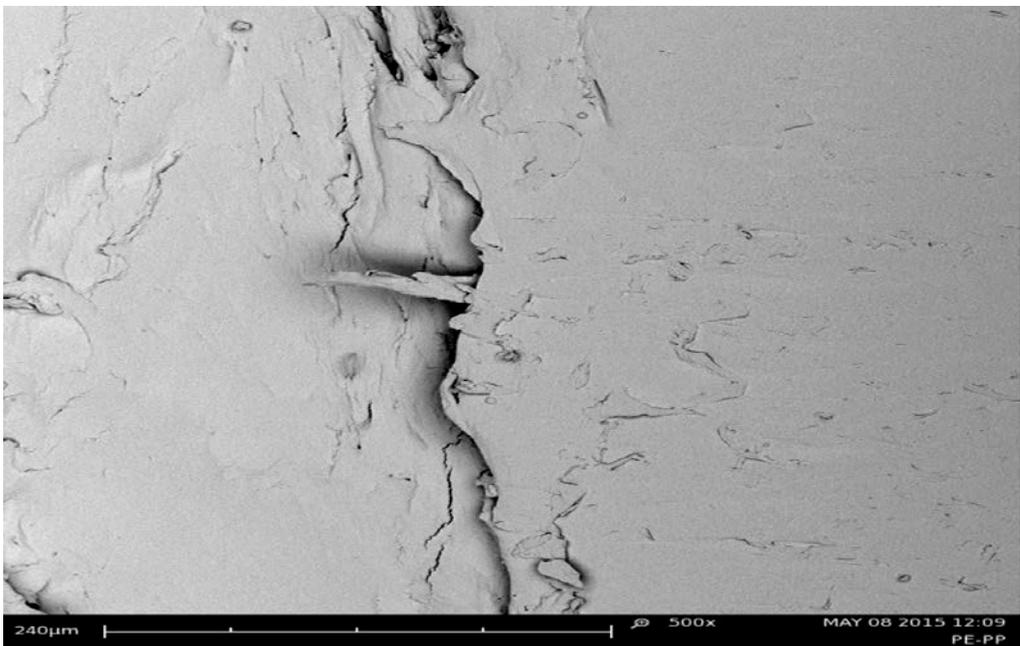


Figura IV.64. Microscopía SEM del PP-PE.

Caso 2: ABS-HIPS

De la misma forma que el análisis mediante microscopía electrónica de barrido de la interfaz PP-PE, en el caso del ABS-HIPS se muestra claramente la presencia de dos zonas y la línea de frontera de ambas zonas. Debido al proceso de manufactura existen pequeñas grietas producidas:

- Falta de adherencia de ambos materiales.
- Atrapamientos de aire.
- Fenómenos de contracción.

Debido a estos fenómenos el material presenta una unión frágil a los esfuerzos de tracción y cortadura en dicha unión.



Figura IV.65. Microscopía SEM del ABS-HIPS.

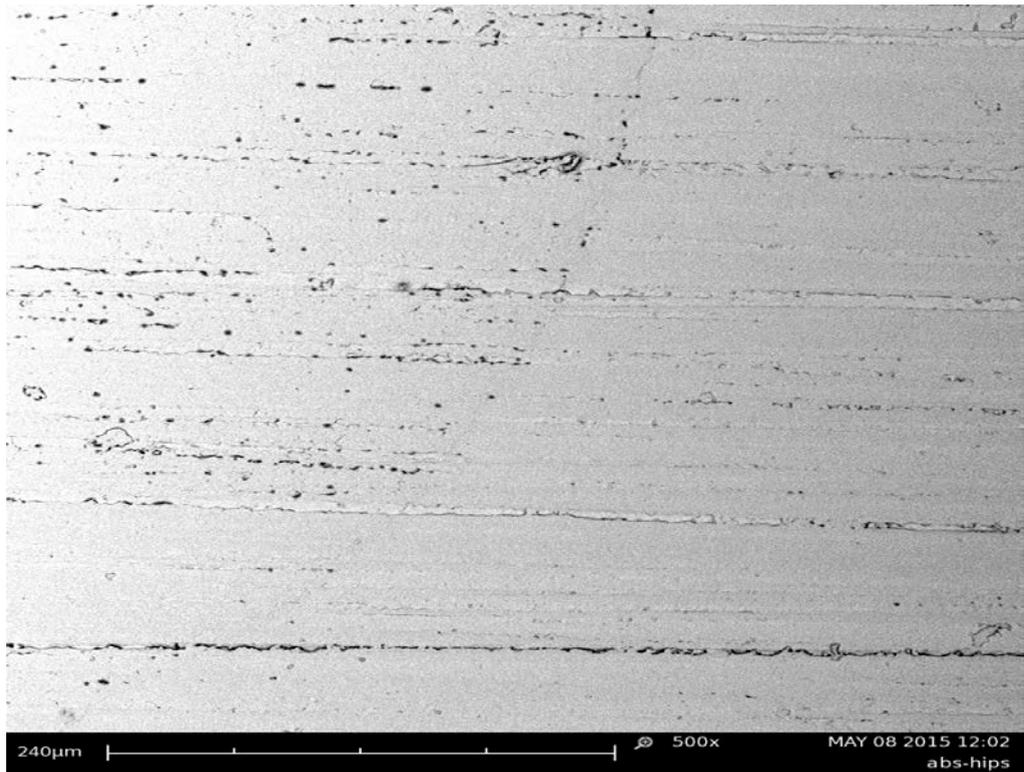


Figura IV.66. Microscopia SEM tras aplicar un recalentamiento.

En la Figura IV.66 se muestra una microscopía tras la aplicación de un recalentamiento a la pieza, se puede observar cómo se cierran algunas de las oclusiones que mostraba la pieza inicial, aun así la interacción entre ambos materiales resulta muy baja.

Conclusiones V

V. Conclusiones

En la fase final de este trabajo de investigación cabe efectuar un resumen de las aportaciones realizadas que el presente estudio pone de manifiesto.

De acuerdo con los objetivos planteados y tras los resultados obtenidos en este trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Desde el punto de vista general, se ha caracterizado el comportamiento de las uniones de termoplásticos parcialmente miscibles como son las parejas de PP-PE y ABS-HIPS, procesable mediante técnicas de inyección multimaterial.
- Se ha desarrollado una metodología para el análisis de dichas uniones multimaterial en el ámbito de su procesado, así como en el ámbito de su comportamiento mecánico.

Respecto al modelado mediante el software Moldflow

Se ha desarrollado y validado experimentalmente la metodología de diseño de piezas multimaterial, estudiando su previsible comportamiento mediante software de simulación.

Se observa una buena concordancia entre la probeta bimaterial experimental (procesada mediante sobremoldeo) y la probeta teórica (obtenida a través de simulación con Moldflow® con los parámetros determinados en la investigación).

Respecto a la validación mediante elementos finitos

Se observa que existe una buena concordancia entre la probeta analizada mediante el método experimental y la probeta analizada por elementos finitos (obtenida a través de simulación con ANSYS WORKBENCH).

Respecto a las mezclas PP-PE

Se observa que existe fragilidad en las uniones de PP-PE conformadas mediante procesos de inyección bimaterial debido a la interacción frontal de los flujos de material fundido, mediante un proceso de sobrecalentamiento en dicha zona de unión, la mejora de las propiedades mecánicas aumenta un 68 %.

Respecto a las mezclas ABS-HIPS

Las uniones de ABS-HIPS conformadas mediante procesos de inyección bimaterial son de elevada fragilidad, mediante un proceso de sobrecalentamiento en dicha zona de unión, la mejora de las propiedades mecánicas aumenta un 50 %, pese a ello siguen presentando gran fragilidad y no se espera una posible aplicación de dichos materiales en sectores industriales.

Líneas futuras de trabajo

VI

VI. Líneas futuras de trabajo

La investigación realizada ha permitido obtener conclusiones satisfactorias en cuanto al comportamiento de la unión de termoplásticos parcialmente miscibles. Además se ha establecido las bases en cuanto a la simulación por elementos finitos tanto del comportamiento mecánico de las probetas como del proceso de manufactura de dichas probetas.

Análisis equivalente para otras parejas de termoplásticos

El estudio realizado es extrapolable a otras parejas de termoplásticos como podrían ser el PBT- PC, ABS-PC debido al auge de la utilización de termoplásticos en sectores como la automoción, electrodomésticos o deportivo.

Estudio de soldabilidad de materiales termoplásticos

El estudio realizado abre el camino a posibles estudios de métodos de refuerzo en piezas bimateriales realizadas con termoplásticos, tales métodos podrían ser:

- Uniones de forma, como dientes de sierra aplicable en proceso de sobremoldeo. De forma que se aumentaría la superficie de contacto e incrementaría la frontera entre ambos materiales y por tanto las fuerzas atractivas entre ambos.
- Uniones mediante adhesivos, debido al auge de este sector y a la aparición de un gran número de nuevos adhesivos aplicables a los materiales poliméricos.
- Mediante calor, estudio de los diferentes sistemas para soldar piezas de distintos termoplásticos para la aplicación a sectores industriales.

Estudio de la soldabilidad mediante software más avanzado

Debido al rápido avance del software de simulación sería interesante la aplicación de los nuevos programas CAE en el análisis de la interacción entre termoplásticos parcialmente miscibles, un ejemplo podría ser PlanetsX para ANSYS Workbench que se halla especializado en el análisis de soldadura en el campo de los polímeros.

Referencias VII

VII. Referencias

Bibliografía

Quiminet.com. Todo sobre el poliestireno. 2005; Available from: http://www.quiminet.com/articulos/todo-sobre-el-poliestireno3337.htm?mkt_source=22&mkt_medium=1011616587&mkt_term=66&mkt_contnt=&mkt_campaign=1.

Fan-Long Jin, S.-L.L., Zhen-Biao Song, Effect of rubber contents on brittle–tough transition in acrylonitrile-butadiene-styrene blends, in *Materials Science and Engineering*. 2010. p. 3438-3441.

E. Stenvall, S.T., A. Boldizar, and M. R. St. J. Foreman The Influence of Extrusion Conditions on Mechanical and Thermal Properties of Virgin and Recycled PP, HIPS, ABS and Their Ternary Blends. *International Polymer Processing*, 2013. 28(5): p. 541-549.

Spaleck, W., *Polypropylene Handbook. Polymerization, Characterization, Properties, Processing, Applications.*, ed. W.-V.V.G.C. KGaA. Vol. 109. 1997, Weinheim.

BA Krentsel, Y.V.K., VI Kleiner and LL Stotskaya Carl Hanser Verlag, *Polymers and copolymers of higher α -olefins* Polymer International, 1997. 48(7): p. 622.

Utracki, L.A., *Polymer Blends Handbook*. Vol. 1. 2002: Springer.

A. Santamaría, M.E.M., J. J. Peña and, P. Remiro, Viscoelastic behaviour of molten polypropylene/polyethylene blends. *Macromolecular Materials and Engineering*, 1985. 134(1): p. 63–71.

M. Levij and, F.H.J.M., Density Polyethylene Blends. *Polymer Engineering & Science*, 1988. 28(10): p. 670–678.

Young Keon Lee, Y.T.J., Kook Choong Kim, Han Mo Jeong and, Byung Kyu Kim, Ultralow density polyethylene blends with polypropylene. *Polymer Engineering & Science*, 2004. 31(13): p. 944–953.

L D'Orazio, G.C., Isotactic polypropylene/ethylene-co-propylene blends: effects of composition on rheology, morphology and properties of injection moulded samples. *Polymer*, 2001. 42(6): p. 2675–2684.

Lan-Peng Li, B.Y.a.M.-B.Y., Morphology prediction and the effect of core-shell structure on the rheological behavior of PP/EPDM/HDPE ternary blends. *Polymer Engineering & Science*, 2011. 51(12): p. 2425–2433.

Chen, S.C., K.F. Hsu, and J.S. Huang, Observation of the polymer melt flow in injection-molding process using coinjection molding technique. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1994. 21(4): p. 499-508.

- Nguyen, K.T., et al., Polymer melt flow behavior in the coinjection molding process. Antec 2000: Society of Plastics Engineers Technical Papers, Conference Proceedings, Vols I-Iii. 2000. 533-537.
- Vangosa, F.B., Effects of Process Parameters on the Skin/Core Distribution in Co-Injection: Experiments and Simulations Using a Simple Geometry. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2011. 50(13): p. 1314-1322.
- Chen, S.C. and K.F. Hsu, Numerical-simulation and experimental-verification of melt front advancements in coinjection molding process. Numerical Heat Transfer Part a-Applications, 1995. 28(4): p. 503-513.
- Parsons, M. and P. Toyoda, Co-injection molding of PVC with other thermoplastics: Processing, properties, and applications. Journal of Vinyl & Additive Technology, 2002. 8(3): p. 202-208.
- Cheng, C.-C., Y. Ono, and C.-K. Jen, Real-time diagnosis of co-injection molding using ultrasound. Polymer Engineering and Science, 2007. 47(9): p. 1491-1500.
- Karger-Kocsis, J., J. Varga, and D. Drummer, Instrumented falling weight impact of coinjection-molded multipolypropylene sandwich plaques containing beta-phase polypropylene core. Journal of Macromolecular Science-Physics, 2002. B41(4-6): p. 881-889.
- García, Á.F. Física con Ordenador. 2010; Available from: www.sc.ehu.es.
- Ming-Luen Lu, C.-B.L.a.F.-C.C., Fracture toughness of acrylonitrile-butadiene-styrene by J-integral methods. Polymer Engineering & Science, 1995. 35(18): p. 1433-1439.

APÉNDICES VIII

VIII. Apéndices

Lista de figuras

Figura I.1. Poliacrilonitrilo.....	16
Figura I.2. Polibutadieno.....	16
Figura I.3. Poliestireno.....	17
Figura I.4. Estructura del ABS.....	18
Figura I.5. Identificación del ABS.....	18
Figura I.6. Aplicaciones del ABS.....	23
Figura I.7. Proceso de polimerización del PS.....	24
Figura I.8. Estructura del PS cristal.....	25
Figura I.9. Estructura del HIPS.....	25
Figura I.10. Identificación del PS.....	26
Figura I.11. Aplicaciones del HIPS.....	29
Figura I.12. Estructura del Polietileno.....	30
Figura I.13. Polietileno.....	31
Figura I.14. Identificación del LDPE.....	32
Figura I.15. Aplicaciones del polietileno.....	34
Figura I.16. Monómero de polipropileno.....	35
Figura I.17. Estructura del Polipropileno Isotáctico.....	36
Figura I.18. Estructura del polipropileno atáctico.....	36
Figura I.19. Estructura del polipropileno sindiotáctico.....	36
Figura I.20. Identificación PP.....	37
Figura I.21. Aplicaciones del polipropileno.....	39
Figura I.22. Deshumidificador del laboratorio de materiales.....	40
Figura I.23. Inyectora del laboratorio de procesos de fabricación.....	41
Figura I.24. Proceso de bi-inyección.....	43
Figura I.25. Proceso de inyección sándwich.....	46
Figura I.26. Ejemplo interfaz Web of Science.....	56
Figura I.27. Ejemplo interfaz EndNote.....	57
Figura I.28. Ejemplo de interfaz RefWorks.....	58
Figura I.29. Ejemplo de interfaz Polibuscador.....	59
Figura I.30. Citas de artículos publicados en los últimos 20 años. Iz PP, Dcha PE.....	61
Figura I.31. Citas de artículos publicados en los últimos 20 años. Iz ABS, Dcha HIPS.....	61
Figura I.32. Publicaciones de la mezcla de ABS + HIPS y citas al año.....	62
Figura I.33. Publicaciones de la mezcla de PP+PE y citas al año.....	62
Figura I.34. Publicaciones de la mezcla del proceso de coinyección y citas al año ...	63
Figura III.1. Máquina universal de ensayos del laboratorio de materiales.....	77
Figura III.2. Microscopio electrónico de barrido.....	80

Figura III.3. Metalizador del laboratorio de materiales.....	80
Figura IV.1. Gráfica tensión deformación del PP.....	88
Figura IV.2. Gráfica tensión deformación del LPDE.....	89
Figura IV.3. Gráfica tensión deformación del HIPS.....	90
Figura IV.4. Gráfica tensión deformación del ABS.....	90
Figura IV.5. Presión en el punto de inyección del PP.	92
Figura IV.6. Presión en el punto de inyección del PE.....	92
Figura IV.7. Presión de cierre en la cavidad del PP.....	93
Figura IV.8. Presión de cierre en la cavidad del PE.....	93
Figura IV.9. Tiempo de llenado en la cavidad del PP.....	94
Figura IV.10. Tiempo de llenado de la cavidad del PE.....	94
Figura IV.11. Presión al final del llenado en el PP.....	95
Figura IV.12. Presión al final del llenado en el PE.....	95
Figura IV.13. Presión de inyección en la cavidad del ABS.....	96
Figura IV.14. Presión de inyección en la cavidad del HIPS.....	96
Figura IV.15. Fuerza de cierre en la cavidad del ABS.....	97
Figura IV.16. Fuerza de cierre en la cavidad del HIPS.....	97
Figura IV.17. Tiempo de llenado de la cavidad del ABS.....	98
Figura IV.18. Tiempo de llenado de la cavidad del HIPS.....	98
Figura IV.19. Presión final de llenado de la cavidad del ABS.....	99
Figura IV.20. Presión final de llenado de la cavidad del HIPS.....	99
Figura IV.21. Zona rosada será donde se aumenta la densidad de malla.	100
Figura IV.22. Captura de pantalla del Moldflow.....	101
Figura IV.23. Colocación de los puntos de inyección.....	101
Figura IV.24. Configuración de la inyección.....	102
Figura IV.25. Presión de llenado de la coinyección del PP-PE.....	103
Figura IV.26. Tiempo de llenado del molde del PPE-PE.....	103
Figura IV.27. Crecimiento del frente de grano.....	104
Figura IV.28. Líneas de soldadura.....	104
Figura IV.29. Presión de llenado del ABS-HIPS.....	105
Figura IV.30. Tiempo de llenado del molde de ABS-HIPS.....	105
Figura IV.31. Crecimiento de grano.....	106
Figura IV.32. Líneas de soldadura del ABS-HIPS.....	106
Figura IV.33. Captura de pantalla de Ansys de los datos del Finalloy HXN 0340 (PP)	109
Figura IV.34. Captura de pantalla de Ansys de los datos del ABS 55 (ABS).....	109
Figura IV.35. Captura de pantalla de Ansys de los datos del Asahi PE J320 (PE)....	110
Figura IV.36. Captura de pantalla de Ansys de los datos del Polystyrol 454C (HIPS)	110
Figura IV.37. Probeta creada en Solidworks.....	111
Figura IV.38. Probeta modificada en ANSYS.....	111

Figura IV.39. Captura de pantalla resumen de las configuración de malla.	112
Figura IV.40. Configuración de la condiciones de entorno.....	114
Figura IV.41. Deformación unitaria del PP-PE.	116
Figura IV.42. Gráfica del avance de la deformación máxima y mínima en el eje x	117
Figura IV.43. Gráfica del avance de la tensión equivalente máxima y mínima en el PP-PE.....	118
Figura IV.44. Gráfica del avance de la tensión normal en el PP-PE.	119
Figura IV.45. Gráfica de la deformación unitaria del ABS-HIPS.	121
Figura IV.46. Gráfica de la deformación del eje X del ABS-HIPS.....	122
Figura IV.47. Gráfica del avance de la tensión normal en el ABS-HIPS.....	123
Figura IV.48. Montaje del ensayo mediante el software SolidWorks	125
Figura IV.49. Caras a seleccionar en la configuración del primer y segundo contacto.	126
Figura IV.50. Condiciones de entorno del ensayo.	127
Figura IV.51. Gráfica de la deformación	129
Figura IV.52. Gráfica del avance de la tensión equivalente en el PP-PE.....	130
Figura IV.53. Gráfica de la deformación en el eje Y del ABS-HIPS.	132
Figura IV.54. Gráfica del avance de la tensión equivalente en el ABS-HIPS.	133
Figura IV.55. Probetas bimaterial empleadas en los ensayos de laboratorio.	134
Figura IV.56. Gráfica tensión deformación del PP-PE.....	135
Figura IV.57. Gráfica tensión deformación del ABS-HIPS.....	135
Figura IV.58. Gráfica de tensión deformación del PP-PE.....	137
Figura IV.59. Grafica tensión deformación del ABS-HIPS.	138
Figura IV.60. Gráfica tensión deformación del PP-PE.....	139
Figura IV.61. Gráfica de tensión deformación del ABS-HIPS.	140
Figura IV.62. Microscopia SEM del PP-PE.	142
Figura IV.63. Microscopia SEM del PP-PE tras aplicar un recalentamiento.	143
Figura IV.64. Microscopía SEM del PP-PE.	143
Figura IV.65. Microscopia SEM del ABS-HIPS.	144
Figura IV.66. Microscopia SEM tras aplicar un recalentamiento.....	145

Lista de tablas

Tabla I.1. Propiedades cuantitativas del ABS.	20
Tabla I.2. Propiedades Cuantitativas del ABS (Techno Polymer).	21
Tabla I.3. Comparativa propiedades mecánicas PS y HIPS.	26
Tabla I.4. Propiedades del Polystyrol 454C de BASF.	28
Tabla I.5. Propiedades del LDPE Asahi Kasei Chemicals Corporation.	33
Tabla I.6. Propiedades del PP Finalloy HXN-0340 de TOTAL PETROCHEMICALS.	38
Tabla I.7. Principales características de la máquina de inyección Mateu & Solé, modelo Meteor 270/75	42
Tabla III.1. Características del Finalloy HXN-0340.	73
Tabla III.2. Características del Asahi-PE J320.	74
Tabla III.3. Características del ABS 55.	75
Tabla III.4. Características del Polystyrol 454C.	75
Tabla III.5. Principales características del microscopio electrónico JEOL JSM-63000	79
Tabla IV.1. Resultados del Moldflow para la inyección de una probeta de PP.	85
Tabla IV.2. . Resultados del Moldflow para la inyección de una probeta de PE.	86
Tabla IV.3. Resultados del Moldflow para la inyección de una probeta de ABS.	86
Tabla IV.4. . Resultados del Moldflow para la inyección de una probeta de HIPS.	87
Tabla IV.5. Tabla resumen de resultados del PP-PE.	115
Tabla IV.6 . Resumen de la deformación unitaria.	116
Tabla IV.7. Deformación en el eje X.	117
Tabla IV.8. Resumen del avance de la tensión equivalente en el PP-PE.	118
Tabla IV.9. Resumen de los resultados del ABS-HIPS.	120
Tabla IV.10. Resumen de la deformación unitaria.	121
Tabla IV.11. Resumen de la deformación en el eje X del ABS-HIPS.	122
Tabla IV.12. Resumen del avance de la tensión normal en el ABS-HIPS.	123
Tabla IV.13. Resumen de resultados del ensayo de flexión.	128
Tabla IV.14. Resumen de la deformación el eje Y.	129
Tabla IV.15. Resumen del avance de la tensión equivalente del PP-PE.	130
Tabla IV.16. Resumen de resultados del ensayo a flexión del ABS-HIPS.	131
Tabla IV.17. Resumen de la deformación el eje Y	132
Tabla IV.18. Resumen del avance de la tensión equivalente.	133
Tabla IV.19. Errores relativos de los ensayos de tracción del PP-PE	136
Tabla IV.20. Errores relativos de los ensayos de tracción del ABS-HIPS.	137
Tabla IV.21. Errores relativos de los ensayos de flexión del PP-PE	138
Tabla IV.22. Errores relativos de los ensayos de tracción del ABS-HIPS.	140
Tabla IV.23. Errores relativos de los ensayos de flexión del ABS-HIPS.	141