

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR D'ALCOI

**DESARROLLO DE UNA LÍNEA DE PRODUCTOS
DE CUBERTERÍA DESECHABLE MEDIANTE EL
EMPLEO DE BLENDS DE MATERIALES
POLIMÉRICOS BIODEGRADABLES**

Trabajo Final de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Piñeiro Valdés, Federico

Tutor: Rafael Antonio Balart Gimeno

Miguel Jorge Reig Pérez

Curso académico: [2014-2015]

Resumen

El objetivo que se persigue con el presente proyecto es desarrollar una línea de productos de cubertería desechable de plástico empleando blends o mezclas físicas de polímeros biodegradables. El desarrollo y la creación del producto se realizará basándose en las distintas disciplinas de la Ingeniería Mecánica: caracterización del material, diseño, simulación de esfuerzos, fabricación y estudio económico. La estructura del trabajo se ha dividido en varias fases que se resumen a continuación: 1- Procesado y obtención de distintos blends biodegradables. 2- Caracterización de compuestos basados en mezclas de ácido poliláctico (PLA), policaprolactona (PCL) y almidón termoplástico (TPS). 3- Diseño en SolidWorks de una línea de cubertería desechable. 4- Simulación del proceso de moldeo por inyección mediante MoldFlow. 5- Análisis de esfuerzos y deformaciones mediante simulación con métodos de elementos finitos (FEM). 6- Estudio de viabilidad económica del proyecto.

Palabras clave: Blend, polímero biodegradable, ácido poliláctico, policaprolactona, almidón termoplástico, inyección.

El objectiu que es persegueix amb el present projecte es desenvolupar una línia de productes de coberteria d'un sol ús de plàstic utilitzant blends o mescles físiques de polímers biodegradables. El desenvolupament i la creació del producte es realitzarà basant-se en les distintes disciplines de la Enginyeria Mecànica: caracterització del material, disseny, simulació d'esforços, fabricació i estudi econòmic. La estructura del treball s'ha dividit en varies fases que es resumeixen a continuació: 1- Processat i obtenció de distints blends biodegradables. 2- Caracterització de compostos basats en mescles d'àcid polilàctic (PLA), policaprolactona (PCL) i midó termoplàstic (TPS). 3- Disseny amb SolidWorks d'una línia de coberteria d'un sol ús. 4- Simulació del procés de moldeig per injecció mitjançant MoldFlow. 5- Anàlisi d'esforços i deformacions mitjançant simulació amb mètodes d'elements finits (FEM). 6- Estudi de viabilitat econòmica del projecte.

Paraules clau: Blend, polímer biodegradable, àcid polilàctic, policaprolactona, midó termoplàstic, injecció.

The objective that is pursued with this project is to develop a product line of disposable plastic cutlery using physical mixtures or blends of biodegradable polymers. The development and the creation of the product is based in different disciplines of mechanical engineering: material characterization, design, simulation of efforts, manufacturing and economic study. The structure of the work has been divided in several phases that are summarized below: 1- Processed and obtaining of biodegradable blends. 2- Characterization of compounds based on acid (PLA), polycaprolactone (PCL) and thermoplastic starch (TPS). 3- Design a line of disposable cutlery in SolidWorks. 4- Simulation of injection molding process with MoldFlow. 5-

stress-strain analysis by simulation with finite element methods (FEM). 6- Economic viability study of the project.

Keywords: Blend, biodegradable polymer, polylactic acid, polycaprolactone, thermoplastic starch, polymer injection.

Índice

1.	Objeto y objetivos del TFG.	6
2.	Antecedentes.	7
2.1.	Biodegradabilidad	7
2.2.	Biopolímeros	8
2.2.1.	Polímeros Biodegradables	8
2.3.	Materiales Empleados	8
2.3.1.	Ácido Poliláctico (PLA)	8
2.3.1.1.	Obtención del Ácido Poliláctico (PLA)	9
2.3.1.2.	Características y propiedades	10
2.3.1.3.	Aplicaciones	11
2.3.1.4.	Impacto ambiental	11
2.3.2.	Policaprolactona (PCL)	12
2.3.2.1.	Obtención de la Policaprolactona (PCL)	12
2.3.2.2.	Características y propiedades	13
2.3.2.3.	Aplicaciones	13
2.3.3.	Almidón termoplástico (TPS)	15
2.3.3.1.	Obtención del almidón termoplástico (TPS)	15
2.3.3.2.	Características y propiedades	15
2.3.3.3.	Aplicaciones	16
2.3.3.4.	Impacto ambiental	17
2.4.	Uso de blends de PLA, PCL Y TPS	17
2.5.	Productos en el mercado	18
3.	Secuenciación del Trabajo	20
4.	Preparación de las mezclas y procesado del material	24
4.1.	Materiales utilizados	24
4.2.	Procedimiento	24
4.2.1.	Extrusión	25
4.2.2.	Trituración	27
4.2.3.	Inyección de Probetas Normalizadas	28
4.2.3.1.	Moldeo Por Inyección	29
5.	Caracterización y selección del material	30
5.1.	Resultados Obtenidos	30

5.1.1.	Caracterización Propiedades Mecánicas	30
5.1.1.1.	Ensayo de Tracción	31
5.1.1.2.	Flexión	36
5.1.1.3.	Dureza Shore D	38
5.1.1.4.	Charpy	39
5.1.2.	Caracterización de Propiedades Térmicas	41
5.1.2.1.	Temperatura de deformación bajo carga HDT	41
5.1.2.2.	Temperatura de reblandecimiento VICAT	42
5.1.2.3.	Análisis Termogravimétrico (TGA)	44
5.1.2.4.	Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).	47
5.1.3.	Caracterización por Microscopio Electrónico de Barrido de Emisión de Campo (FESEM)	51
5.1.4.	Biodegradabilidad	55
6.	Selección de Material	59
7.	Diseño de las piezas de cubertería	60
7.1.	Diseño de los cubiertos en SolidWorks	61
7.1.1.	Diseño del mango	61
7.1.2.	Diseño del cuchillo	63
7.1.3.	Diseño de la cuchara	65
7.1.4.	Diseño del tenedor	67
8.	Simulación por elementos finitos Ansys	68
8.1.	Análisis de esfuerzos del tenedor.	69
8.2.	Análisis de esfuerzos de la cuchara	71
8.3.	Análisis de esfuerzos del cuchillo	73
9.	Simulación del proceso de inyección con "MoldFlow"	75
9.1.	Molde de canales fríos	76
9.1.1.	Tiempo total de ciclo	80
9.2.	Molde de canales calientes	81
9.2.1.	Tiempo total de ciclo	85
10.	Estudio económico	85
10.1.	Estudio económico molde de canales fríos.	85
10.1.1.	Coste de la mano de obra y material	85
10.1.2.	Coste total de un paquete de cubiertos producido en un molde de canales fríos	86

10.2. Estudio económico molde de canales calientes	86
10.2.1. Coste mano de obra y material	86
10.2.2. Coste total de un paquete de cubiertos producido en un molde de canales calientes	87
10.4. Comparativa general del coste de producción de la pieza según el tipo de molde	88
10.3. Amortización del molde	88
11. Conclusiones	89
12. Planos y esquemas técnicos	90
13. Pliego de condiciones	95
13.1. Normativa Exigible	95
13.1.1. Probetas Normalizadas	95
13.2. Materiales	96
14. Bibliografía	98

1. Objeto y objetivos del TFG.

El objetivo principal del siguiente estudio es el desarrollo de una línea de cubertería desechable termoplástica y biodegradable fabricada a partir de blends o mezclas de materiales poliméricos biodegradables tales como el ácido poliláctico (PLA), policaprolactona (PCL) y almidón termoplástico (TPS).

Se ha tratado de obtener un blend biodegradable con una buena combinación de propiedades que lo hagan óptimo para la fabricación de cubertería, que soporte los esfuerzos a los que son sometidos estos utensilios de cocina desechables y que sea viable económicamente.

Para ello, el primer objetivo del trabajo ha sido la preparación de las mezclas. En todas ellas se ha utilizado el ácido poliláctico (PLA) como material base, y se ha ido variando el porcentaje de policaprolactona (PCL) y de almidón termoplástico (TPS) que contiene la mezcla. Se han preparado 6 mezclas en total con los siguientes porcentajes de materiales: (100% PLA), (60% PLA + 40% PCL), (60% PLA + 30% PCL + 10% TPS), (60% PLA + 20% PCL + 20% TPS), (60% PLA + 10% PCL + 30% TPS), (60% PLA + 40% TPS).

Preparadas las mezclas con los distintos porcentajes de material, se procedió a extruir cada composición en una extrusora de doble usillo para producir la mezcla física de los materiales y obtener el blend, que posteriormente se trituró para producir granza de cada combinación de materiales que se pudiera inyectar para obtener las probetas de ensayo con las que se caracterizó el material.

El siguiente objetivo del trabajo fue la caracterización de los distintos blends, para ello se han realizado diversos ensayos: Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), Análisis Termogravimétrico (TGA), Temperatura de Reblandecimiento (HDT), Dureza Shore, Impacto Charpy, Tracción, Flexión, Microscopía Electrónica de Barrido (FESEM) y Biodegradabilidad bajo condiciones de compostaje simuladas.

A continuación, se realizaron los diseños de los cubiertos utilizando software de diseño asistido por ordenador (SolidWorks). Se diseñó un mango base para los tres elementos del pack de cubertería y posteriormente se diseñaron los tres cabezales distintos para el cuchillo, la cuchara y el tenedor.

Una vez acabados los diseños con SolidWorks, se realizó una simulación de esfuerzos y deformaciones totales de cada cubierto utilizando una herramienta de análisis por elementos finitos, en este caso se hizo uso del programa Ansys para realizar las simulaciones y comprobar si cada elemento soportaba los esfuerzos propios de una pieza de cubertería.

Seguidamente, con los diseños de los cubiertos acabados y optimizados, se realizó una simulación del proceso de inyección de plásticos con la ayuda del software de simulación de flujo "MoldFlow". Con esta herramienta se pudo hacer un cálculo teórico aproximativo del comportamiento del polímero previamente caracterizado cuando se procese por el método de inyección de plásticos. Además, este método permite modificar las variables del proceso de inyección hasta encontrar el método óptimo para procesar el material elegido.

Finalmente, se ha realizado un estudio económico que determinará si la producción de los cubiertos biodegradables es viable económicamente. Para realizar este estudio se compararon

en primer lugar dos tipos diferentes de moldes, uno de cámara caliente y el segundo molde con cámara helada. Además de los moldes se han tenido en cuenta varias variables económicas como coste de hora de inyección, coste de operarios o coste del material, que determinaron el precio final del producto.

2. Antecedentes.

2.1. Biodegradabilidad

El concepto de biodegradabilidad se define como la capacidad intrínseca de algunas sustancias a ser transformadas en una estructura química más simple por vía microbiana. En el mismo sentido una sustancia es biodegradable cuando puede ser descompuesta con cierta rapidez por organismos vivos (bacterias, hongos, gusanos e insectos), que emplearán esta materia para producir energía (por respiración celular) y crear otras sustancias como aminoácidos, nuevos tejidos y nuevos organismos. Lo contrario corresponde a las sustancias no biodegradables, como plásticos, latas, vidrios y otros materiales que no se descomponen, o que lo hacen muy lentamente, es el caso de algunos organoclorados, metales pesados, algunas sales, detergentes de cadenas ramificadas y ciertas estructuras plásticas.

Sin embargo, el que una sustancia pueda ser degradada o descompuesta no implica que esta sea biodegradable, ya que los procesos químicos y físicos del ambiente pueden producir degradación de ciertas sustancias sin que intervengan organismos vivos.

El crecimiento de los microorganismos degradadores depende de varios factores como la presencia de nutrientes suficientes, la disponibilidad de humedad, oxígeno, temperatura y pH idóneos. Por su parte, la biodegradabilidad también depende de la complejidad compuesto a degradar y del microorganismo utilizado. No existen organismos especializados para cada tipo de sustancias.

La biodegradación se puede presentar en dos condiciones básicas, en condiciones aerobias (bacterias, hongos, algas y plantas) o en condiciones anaerobias (bacterias).

- **Biodegradación aerobia:** en presencia de oxígeno suficiente y otros nutrientes elementales, los organismos degradan los contaminantes orgánicos hasta convertirlos finalmente en dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y biomasa. En la bioestimulación es común la inyección de agua junto con los nutrientes y oxígeno disuelto, que favorezca el proceso.
- **Biodegradación anaerobia:** en ausencia de oxígeno (condiciones anaerobias), los contaminantes orgánicos son metabolizados hasta la obtención de metano (CH_4) y cantidades limitadas de dióxido de carbono (CO_2) e hidrógeno molecular (H_2). Bajo condiciones sulfato-reductoras, el sulfato es transformado a sulfuro o azufre elemental; y bajo condiciones nitrato-reductoras se genera como producto final nitrógeno molecular (N_2).

La ventaja principal de los materiales biodegradables es que provocan un menor impacto ambiental, si hablamos de la generación de residuos. Estos materiales desaparecen relativamente pronto del ecosistema. En cambio, un polímero o un metal pueden permanecer cientos de años en el medio ambiente hasta que se degrada finalmente.

2.2. Biopolímeros

2.2.1. Polímeros Biodegradables

Los polímeros biodegradables son aquellos polímeros que experimentan reacciones de degradación resultantes de la acción de microorganismos como bacterias, hongos y algas, bajo condiciones que ocurren naturalmente en la biosfera en un periodo de tiempo relativamente corto. Esta degradación de los polímeros genera dióxido de carbono (CO₂), agua (H₂O), sales minerales y biomasa en presencia de dióxido de carbono (CO₂), oxígeno (O₂), y metano (CH₄), o en ausencia de oxígeno (O₂).

Según su origen, los polímeros biodegradables se pueden clasificar en dos categorías principales:

- a) Biopolímeros de origen natural.
- b) Polímeros biodegradables de origen sintético.

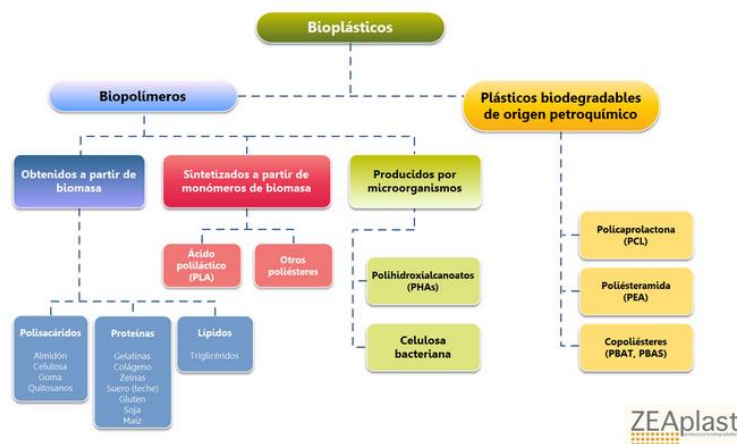


Figura 2.1 Tipos de polímeros biodegradables

2.3. Materiales Empleados

2.3.1. Ácido Poliláctico (PLA)

El ácido poliláctico (PLA) es un polímero biodegradable cuya molécula precursora es el ácido láctico. Es un material fabricado a partir de recursos renovables 100% como el maíz, la remolacha, el trigo y otros productos ricos en almidón. Debido a su biodegradabilidad, propiedades de barrera y su biocompatibilidad, el PLA ha encontrado numerosas aplicaciones ya que presenta en un amplio abanico de propiedades que lo pueden hacer cambiar desde el

estado amorfo hasta el estado cristalino. Estos cambios en la estructura del ácido poliláctico se logran manipulando las mezclas entre los isómeros “D” y “L”, modificando los pesos moleculares y el proceso de copolimerización. En su estado natural el PLA tiene características similares al polietilentreftalato (PET) y al polietileno (PE).

2.3.1.1. Obtención del Ácido Poliláctico (PLA)

La obtención ocurre generalmente en dos etapas consecutivas: la primera la síntesis del ácido láctico y la segunda la polimerización.

El primer paso a realizar para la obtención del ácido poliláctico, es sintetizar y obtener el ácido láctico a partir del almidón.

Se puede resumir el proceso de obtención del ácido láctico en cuatro fases básicas:

- Hidrólisis del sustrato hasta azúcares fermentables
- Fermentación de azúcares a ácido láctico
- Separación de biomasa y partículas sólidas del medio de fermentación
- Purificación del ácido láctico obtenido

El segundo paso, una vez obtenido el ácido láctico, es la polimerización del ácido para obtener el polímero.

Se han desarrollado durante años dos vías básicas para obtener un polímero de alto peso molecular como el ácido poliláctico (PLA) partiendo de su molécula precursora, el ácido láctico. Por un lado tenemos el proceso indirecto vía lactido, cuyo producto se denomina poliláctico, y el proceso directo de polimerización por policondensación que produce ácido poliláctico. A ambos productos resultantes se les agrupa bajo la denominación de PLA.

El primer método, es un proceso indirecto y continuo que utiliza la polimerización por apertura de anillo o método ROP, creado por “El Cargill Dow”. El método ROP incluye policondensación del ácido láctico seguido de una despolimerización afín de obtener el dímero cíclico deseado, la lactida. Se pueden obtener polímeros de alto peso molecular tras la apertura del anillo. La despolimerización permite aumentar la temperatura de policondensación y disminuir la presión, y destilación de la lactida producida. La ventaja de la polimerización por ROP es que la reacción se puede controlar más fácilmente, variando así las características del polímero resultante de una manera más controlada.

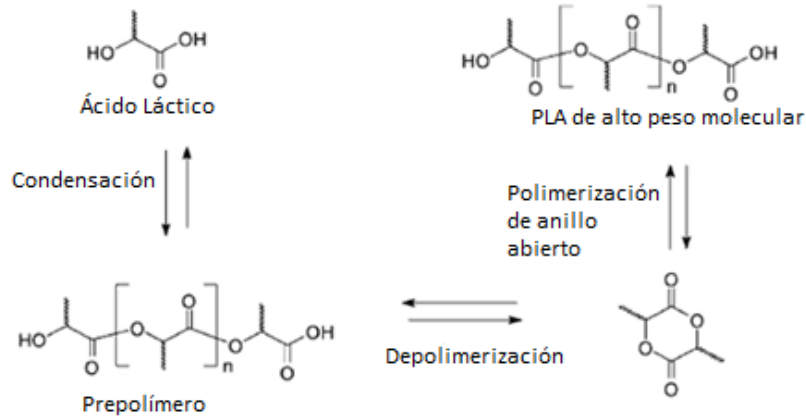


Figura 2.2. Obtención del Ácido Poliláctico

El segundo método de polimerización, utilizado por Mitsui Chem, el ácido láctico es policondensado directamente en polímeros de alto peso molecular, manipulando el equilibrio entre: ácido láctico, agua y ácido poliláctico en un solvente orgánico.

2.3.1.2. Características y propiedades

El PLA es un polímero termoplástico que se puede presentar de forma amorfa o cristalina. Es un plástico con unas propiedades ópticas que lo hacen de color claro y brillante como el poliestireno. Cuenta con unas características inodoras y con propiedades de barrera del sabor y de los olores similares al PE que lo hacen apto para el uso en aplicaciones alimenticias, en este caso, la fabricación de cubertería desechable. Además, su módulo de Young también es comparable al PE, difiere con el PE en que el PLA es más hidrofílico y cuenta con una densidad más baja. Por otra parte, el PLA es muy estable a la luz U.V y su índice de inflamabilidad es muy bajo.

La gran versatilidad en la formulación del ácido poliláctico hace que se pueda formular el material para que este sea más rígido o más flexible modificando la cantidad de los isómeros L y D, además el PLA permite variar en cierto grado sus características mecánicas dependiendo del proceso de fabricación seguido.

En resumen, el PLA cuenta con numerosas ventajas tales como:

- Propiedades mecánicas similares al PET, PS y PE.
- Se puede imprimir en su superficie sin tratamiento superficial
- Resistente a grasas y productos acuosos
- Procesado similar a las poliolefinas convencionales
- Alto brillo y transparencia
- Resistente a los rayos UV
- Elevado módulo de elasticidad
- Termosoldable
- Degradable

Por otra parte, entre sus inconvenientes habituales encontramos:

- Muy quebradizo
- Elevada permeabilidad al vapor de agua
- Poca resistencia al dióxido de carbono
- Requiere de un secado previo a su procesado
- Baja resistencia a los ácidos y las bases

2.3.1.3. Aplicaciones

- Industria del empaquetado
 - Films para envasado, recipientes para líquidos, vasos, platos, cubertería desechable, empaquetado de alimentos congelados, envases transparentes para alimentos.
- Industria textil
 - Los tejidos de PLA son más hidrofílicos que el PET, tienen una densidad más baja, alta resistencia al moldeado y doblado. Estos polímeros tienden a ser estables a la luz ultravioleta dando como resultado telas con poca decoloración. Es un material ignífugo y produce una baja generación de humos. Todas estas características lo hacen óptimo para la creación de fibras para la fabricación de tejidos.
- Industria médica
 - Suturas quirúrgicas, implantes de hueso, implantes de tejido y prótesis.
 - Dispositivos de liberación de fármacos

Aunque existen diversos productores de PLA en el mundo, el productor más importante sin duda es NatureWorks (Nebraska, EEUU) con una capacidad de producción de 140mil ton/año y precios de venta entre los 2.5€ y 5.5€ por kilo.

2.3.1.4. Impacto ambiental

El PLA es un producto biodegradable, por lo tanto, si algún producto se deja olvidado por error en el campo, una vez finalizado su ciclo de vida desaparecerá sin dejar ningún tipo de residuo. Por otra parte, el PLA proviene de fuentes renovables que siempre estarán disponibles en el medio.

Sin embargo, este material aún necesita de combustibles fósiles para su producción, aunque utilizan casi un 50% menos de combustible que los plásticos derivados del petróleo, siguen

siendo necesarios en las máquinas cosechadoras y máquinas de procesado, al igual que para su producción química.

El PLA, también acumula críticas ya que en la fase de degradación el material libera gases de efecto invernadero como son el dióxido de carbono y el metano.

Por último, el material necesita de un correcto compostaje para su degradación, generalmente se mezcla con residuos orgánicos. Esta tecnología de compostaje se está desarrollando en la universidad de florida con el nombre de SEBAC (sequential batch anaerobic composting).

2.3.2. Policaprolactona (PCL)

La policaprolactona (PCL) es un polímero degradable de origen sintético fabricado a partir de recursos petroquímicos. Se trata de un poliéster alifático con un bajo punto de fusión (T_m) aproximadamente sobre los 60°C y que cuenta con una temperatura de transición vítrea (T_g) muy baja, alrededor de -60°C . El polímero se obtiene a partir de la síntesis de la caprolactona. Su formulación química es $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_2)_n$.

La policaprolactona (PCL) tiene un gran abanico de aplicaciones pero normalmente se usa como aditivo plastificante para otros polímeros. Debido a su bajo punto de fusión se utiliza en solitario como plástico para moldear manualmente prototipos y en implantes para el cuerpo humano. Y mezclado con otros polímeros se utiliza básicamente para mejorar la plasticidad de los polímeros a los que se aditiva, aditivado con resinas mejora la resistencia al impacto de estas, además como la policaprolactona es compatible con una gran cantidad de polímeros, suele mezclarse con otros polímeros para disminuir su coste final.

2.3.2.1. Obtención de la Policaprolactona (PCL)

La Policaprolactona se obtiene a partir de derivados del petróleo por el método de polimerización de apertura de anillo de ϵ -caprolactona, para ello se utilizan catalizadores como el octoato estannoso.



Figura 2.3. Obtención de la Policaprolactona (PCL)

2.3.2.2. Características y propiedades

La policaprolactona (PCL), como se ha mencionado anteriormente, es un polímero sintético fabricado a partir de derivados del petróleo. Su estructura interna la componen una secuencia de unidades de metileno entre las que se forman grupos éster. Al tener una estructura tan simple, el movimiento de las cadenas es limitado lo que provoca que la temperatura de transición vítrea (T_g) sea muy baja alrededor de los -60°C . La PCL es un polímero semicristalino, viscoso y fácil de procesar. A temperatura ambiente la PCL es amorfa y tiene una apariencia blanda y gomosa.

Por otro lado, la policaprolactona (PCL) tiene un alto grado de miscibilidad por lo que combina bien con otro tipo de plásticos, además de adherirse bien a un gran número de superficies. Por estas propiedades el material se suele usar mezclado como plastificante para otro tipo de polímeros con un grado de rigidez más alto.

Su obtención es relativamente más sencilla que la de otros plásticos, funde fácilmente y no resulta tóxico para el ser humano.

Las principales características mecánicas de la policaprolactona (PCL) son:

Densidad	1.1 g/cm³
Módulo de Young	1.2 GPa
Alargamiento a la rotura	300%
Temperatura de transición vítrea	-60°C
Temperatura de fusión	60°C
Fuerza	9 Kn·m/kg
Resistencia a la tracción	10 MPa

Tabla 2.1. Características Principales de la policaprolactona (PCL)

2.3.2.3. Aplicaciones

- Aditivo para polímeros
 - Debido a sus características que le otorgan resistencia al agua, a los aceites, a los disolventes y al cloro, la policaprolactona es un aditivo común en la fabricación de poliuretanos.
 - Se suele añadir a las resinas para conseguir un mejor procesamiento y mejorar sus propiedades como la resistencia al impacto
 - El uso mayoritario de la policaprolactona se produce mezclado con el almidón, ya que le otorga mejor resistencia a la humedad y actúa como plastificante. Esta mezcla se utiliza para producir envases, bolsas y menaje del hogar.



Figura 2.4. Cubertería desechable fabricada con PCL y TPS

- Aplicaciones biomédicas

- Su biocompatibilidad con el cuerpo humano y sus propiedades de biodegradación lo hacen óptimo para aplicaciones que estén en contacto con el cuerpo humano como suturas quirúrgicas, implantes, dispositivos de suministro de fármacos o piel sintética.



Figura 2.5. Sutura quirúrgica de PCL

- Hobbies y prototipado

- Algunas empresas como Hand Moldable Plastic, Mold-Your-Own Grips, Simple-Plastic, InstaMorph, Shapelock, Missing Link, Polymorph y Plastimake han sabido aprovechar las propiedades de la PCL que le confieren unas características físicas similares a la masilla para comercializar un producto moldeable utilizado para realizar modelados, prototipos y pequeñas reparaciones.



Figura 2.6. InstaMorph, PCL moldeable

2.3.3. Almidón termoplástico (TPS)

El almidón es un polisacárido abundante, de bajo coste, renovable y biodegradable 100% que se encuentra en las plantas. El almidón para uso comercial se obtiene principalmente de los cereales: arroz, trigo, maíz, etc. También se puede extraer de algunas raíces y de tubérculos como la patata o la yuca, pero el más utilizado por su disponibilidad y precio para la fabricación de termoplásticos es el almidón de maíz.

EL TPS es un material termoplástico que se obtiene del procesado del almidón utilizando medios químicos, mecánicos o térmicos. Con el material resultante se pueden producir copolímeros con otros biopolímeros tan flexibles como el polietileno (PE) o rígidos como el poliestireno (PS).

El almidón es el carbohidrato más abundante en la naturaleza, se sintetiza por los vegetales durante el proceso de la fotosíntesis y se almacena en los amiloplastos de las células vegetales. Su fisonomía es de gránulos de distintos tamaños oscilando entre 1 a 100 μm (dependiendo de la fuente de origen) con distintas formas geométricas, estos gránulos son parcialmente cristalinos e insolubles en agua. Los gránulos están formados por dos componentes poliméricos: amilosa y amilopectina.

Fuente	% Amilosa	% Amilopectina
Patata	80	20
Maíz	27	73
Trigo	24	76

Tabla 2.2. Componentes principales del TPS

2.3.3.1. Obtención del almidón termoplástico (TPS)

El TPS se obtiene por modificación estructural de los gránulos de almidón procesados con un bajo contenido en agua y por medios térmicos y mecánicos con la ayuda de algunos plastificantes. La función de los plastificantes es destruir los gránulos mediante la rotura de los puentes de hidrógeno de las macromoléculas de almidón.

2.3.3.2. Características y propiedades

El TPS presenta poca estabilidad dimensional y cambios en las propiedades mecánicas cuando las condiciones de humedad son muy altas, pero presenta una buena barrera contra el

oxígeno. Es un polímero muy versátil, ya que sus propiedades se pueden modificar fácilmente aditivando el material, además presenta buenas propiedades de sellabilidad y de impresión superficial. Su resistencia a disolventes y aceites es baja, este factor se puede solucionar aditivando policaprolactona (PCL). También es muy habitual encontrar resinas híbridas de almidón con PLA.

Las principales características del material son:

Densidad	1.4 g/cm ³
Absorción de agua	0.4 – 4%
Resistencia a la flexión	20 MPa
Alargamiento a la rotura	1 – 200 %
Resistencia al impacto	17 J/cm
Módulo de Young	2900 MPa
Transición vítrea	35°C
Temperatura de fusión	115°C

Tabla 2.3. Características principales del TPS

En resumen, el TPS cuenta con numerosas ventajas como:

- Es un material muy abundante
- Tiene propiedades mecánicas similares al LDPE y al PS
- Fácilmente imprimible
- Buena barrera a los gases y olores
- Propiedades fácilmente modificables químicamente

Tiene diversos factores en su contra como:

- Es muy sensible a la humedad
- Densidad demasiado elevada
- Frágilidad

2.3.3.3. Aplicaciones

- Empaquetado
 - Films de sellado
 - Bolsas y sacos



Figura 2.7 Saco de TPS Novamont



Figura 2.8 Bolsa TPS Novamont

- Menaje
 - Cubertería desechable
 - Bandejas para alimentos
 - Vasos y platos desechables



Figura 2.9 Cápsula de café Bioplast 900

2.3.3.4. Impacto ambiental

El TPS es compatible con el medio ambiente, se trata de un material renovable y se puede incorporar al medio como abono orgánico. Al degradarse fácilmente no produce ningún impacto visual ni ningún tipo de contaminación.

2.4. Uso de blends de PLA, PCL Y TPS

Dado que en el presente trabajo se analizarán diversas muestras de Blends compuestos por PLA + TPS, PLA + PCL o PLA + PCL + TPS, con el fin de encontrar un material apto y con buenas

propiedades para la fabricación de cubertería desechable, se realizará una pequeña recopilación de información acerca de dichos Blends.

En los últimos años resulta muy habitual encontrar en el mercado productos y aplicaciones en los que se emplean estos materiales, ya que sus características físicas y su condición de biodegradables los hacen interesantes a la hora de la gestión de residuos y el respeto por el medio ambiente. Estos materiales se pueden encontrar mezclados entre ellos o individualmente, la ventaja de utilizar mezclas de estos tipos de materiales es que modifican sus características y propiedades mutuamente para reforzar y complementar las carencias y puntos débiles que presentarían los materiales individualmente.

Se han encontrado diversos estudios en los que se analizan distintas mezclas de estos materiales para estudiar la variación de ciertas propiedades con el fin de encontrar un producto que mejore las propiedades de los materiales que se encuentran hoy en día en el mercado. Un ejemplo es el estudio que analiza una mezcla ternaria de estos materiales y su permeabilidad al vapor de agua (Diego Fabián Joaquín, 2013). En este estudio se realiza una mezcla ternaria de TPS 75% + PLA 17.5% + PCL 7.5% en la que se demuestra que dicha mezcla mejora notablemente la permeabilidad y el brillo del producto frente al TPS. Dicho producto se orientará a la fabricación de envasados alimenticios que con esta mezcla mejorarán la permeabilidad al agua.

Por otra parte, en un artículo publicado en la “Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales” en 2013 y realizado por la “Universidad Simón Bolívar” se estudia una mezcla ternaria de polilactida (PLLA), almidón termoplástico (TPS) y policaprolactona (PCL) con diversas proporciones de estos materiales donde se concluye que la composición con TPS 10% + PLLA 63% + PCL 27% tiene unas características similares a las del PP y donde los productos fabricados con esta mezcla se podrían utilizar en aplicaciones para empaquetado alimenticio y empaquetado general.

También encontramos un estudio realizado por el equipo de investigadores de la “Universidad de Cauca” donde se analiza una mezcla ternaria de TPS 75% + PLA 17.5% + PCL 7.5% y que determina una mejora notable del material en las propiedades de barrera y permeabilidad a los gases.

Otras investigaciones realizadas a mezclas binarias de estos materiales (Cha et al., 2001; Mihai et al., 2007; Preechawong et al., 2005; Petnamsin et al., 2000) explican que las mezclas de TPS + PLA o TPS + PCL ayudan a mejorar la resistencia a la absorción de agua del TPS y mejoran las propiedades mecánicas en los productos fabricados con estos blends orientados al sector médico

2.5. Productos en el mercado

Comercialmente, van aumentando las grandes empresas de productos biodegradables que han lanzado al mercado artículos fabricados con blends que combinan los materiales en los que se basa este trabajo (PLA, PCL, TPS) con otros materiales biodegradables como las celulosas degradables o los polihidroxialcanoatos (PHAs).

Son un claro ejemplo de esta tendencia al alza empresas como “BASF”, “Novamont”, “Perstorp” o “Biotec”. Si bien cada empresa tiene sus líneas comerciales de productos biodegradables y

utilizan distintos tipos de blends con distintos porcentajes de materiales, todas ellas coinciden en las aplicaciones a las que se orientan este tipo de productos: films de protección, embolsado, empaquetado, fabricación de menaje desechable (vasos, platos y cubertería) y artículos para inyección.

Empresa	Producto Comercial Biodegradable
Basf	ecoflex [®] , ecovio [®]
Novamont	Mater-Bi [®]
Perstorp	Capa [™]
Biotec	Bioplast

Tabla 2.4 Blends biodegradables en el mercado



Figura 2.10 Cápsulas de café Banarella fabricadas con ecovio[®]



Figura 2.11 Menaje fabricado con Capa[™] (blend de PLA/PCL)

3. Secuenciación del Trabajo

1. Preparación de las mezclas y procesado del material
2. Caracterización y selección del material
3. Diseño de las piezas de cubertería
4. Simulación de esfuerzos
5. Simulación del proceso de inyección con "MoldFlow"
6. Estudio económico

1- Preparación de las mezclas y procesado del material

a) Preparación de las mezclas de material

En la primera fase del trabajo se han preparado manualmente las mezclas de los blends que se utilizaron en el estudio. Para ello se dispuso de granza de los tres materiales que conforman las mezclas. Se preparó 1 Kg de cada mezcla de materiales con diferentes porcentajes de cada material manteniendo el ácido poliláctico (PLA) como material base de las mezclas, (100% PLA), (60% PLA + 40% PCL), (60% PLA + 30% PCL + 10% TPS), (60% PLA + 20% PCL + 20% TPS), (60% PLA + 10% PCL + 30% TPS) y (60% PLA + 40% TPS).

b) Procesado del material y obtención de las probetas

La finalidad de esta etapa fue la obtención de granza y posteriormente de probetas de cada mezcla de material.

En primer lugar se extruyeron las mezclas en una extrusora de doble usillo para generar un filamento continuo de cada material. Este filamento se trituró posteriormente para obtener granza de cada mezcla de material.

Finalmente, la granza se inyectó para producir probetas normalizadas de cada blend con las que realizar los ensayos pertinentes.

2- Caracterización y selección del material

a) Caracterización mecánica del material

Las probetas de material compuesto obtenidas por inyección se han sometido a los ensayos mecánicos de Tracción, Flexión, Impacto Charpy y Dureza shore D con el fin de caracterizarlas y obtener sus propiedades físicas y mecánicas.

Los resultados obtenidos han servido para comparar los materiales y elegir el compuesto que mejor se adapte a las necesidades del producto que se pretende fabricar.

b) Caracterización térmica del material

Se han realizado los ensayos de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) y Análisis Termogravimétrico (TGA) que aportaron los datos referentes a la Temperatura de

Fusión (T_m), la Temperatura de Transición Vítrea (T_g) y la Temperatura de Degradación (T_d) de cada mezcla.

Por otro lado, se realizaron los ensayos HDT y Vicat que han proporcionado la temperatura de reblandecimiento de cada compuesto.

Estos datos son indispensables para procesar el material correctamente y conocer el comportamiento de cada mezcla con amplios rangos de temperatura.

c) Caracterización por Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM)

Una vez realizado el ensayo de impacto Charpy se analizó con el microscopio la zona de rotura de las 5 muestras de material.

Con este ensayo se ha comprobado la miscibilidad de cada compuesto en las muestras y la adhesión entre caras de los materiales que forman la mezcla sin usar agentes compatibilizantes en la producción del blend.

d) Caracterización por ensayo de Biodegradabilidad bajo condiciones de compostaje simuladas.

Con el ensayo de Biodegradabilidad se ha determinado el tiempo que necesita el material para degradarse por completo, bajo condiciones de compostaje simuladas.

Se compararon las 6 muestras utilizadas en el trabajo y se obtuvo una idea orientativa del tiempo de degradación de cada material. El tiempo final obtenido por cada material es un factor importante a la hora de elegir un material para la fabricación de las piezas de cubertería desechable.

e) Selección del material

Como último apartado de la caracterización se compararon todos los resultados obtenidos por las mezclas y se eligió el material que mejores propiedades presentaba para formar las piezas de cubertería.

3- Diseño de las piezas de cubertería

a) Diseño de los modelos con SolidWorks

Aunque en el mercado actual la variedad de diseños es muy diversa, para la realización de los diseños del trabajo se han utilizado como modelos los cubiertos desechables más habituales del mercado. Este tipo de diseño se debe a que las piezas fabricadas no deben destacar por su diseño, sino por su simpleza, su funcionalidad y por encima de todo por sus características biodegradables y su precio. Se ha buscado un diseño simple ya que se abaratan costes a la hora de la fabricación del molde y por consiguiente se consigue un producto de venta al público económico.

Para realizar el diseño se ha utilizado la herramienta de diseño 3D asistido por ordenador "SolidWorks".

4- Simulación de esfuerzos

a) Simulación de esfuerzos con herramienta de análisis por elementos finitos

Una vez obtenidos los diseños de las tres piezas de cubertería se realizó un análisis de esfuerzos a las tres piezas que ha determinado si los cubiertos fabricados con los blends aguantan los esfuerzos típicos que deben aguantar las piezas de cubertería. Para realizar el análisis de esfuerzos, se introdujeron en el programa los datos del material elegido para fabricar el producto y las fuerzas que tiene que soportar cada cubierto. Una vez introducidos todos los parámetros, el programa devuelve el análisis tensional con el que se ha determinado si la pieza de cubertería es válida o no para la fabricación de piezas de cubertería desechable.

b) Simulación de deformaciones

El siguiente parámetro que se sometió a estudio fue la deformación de las piezas. El análisis de deformaciones de Ansys ha determinado si la pieza rompe o se deforma en exceso como para ser utilizada como pieza de cubertería o si por el contrario, cumple las condiciones para fabricar cubertería desechable.

5- Simulación del proceso de inyección con “MoldFlow”

a) Preparación de la pieza

Antes de proceder a la simulación de la inyección se prepararon las piezas. Este proceso ha consistido en primer lugar, en disponer las piezas con la misma distribución que tienen en el molde de inyección.

Una vez distribuidas las piezas correctamente, se procedió a crear el sistema de canales de alimentación que conduce el material fundido hasta las cavidades que forman los cubiertos y los bebederos por los que el material fluye al interior de las cavidades.

Por último, se ha creado el punto de inyección por el que el material entra al molde.

b) Optimización de la ventana de procesos

Cuando se dispuso de todos los elementos mencionados anteriormente que simulaban el molde de inyección, se procedió a realizar inyecciones de prueba.

En este apartado se ha recurrido a la ventana de proceso, en esta sección se pudieron modificar ciertos parámetros de inyección con el fin de encontrar un ciclo de inyección óptimo.

Con los valores ideales que nos aportó la ventana de procesos se fueron variando los datos de entrada del ciclo de inyección para aproximarlos lo máximo posible a los valores de la ventana de proceso que se supone que son con los que se alcanza un ciclo óptimo.

c) Tiempo de llenado

El primer parámetro a modificar ha sido el tiempo de llenado. Con los datos previos que aportó la ventana de procesos se obtuvo un rango de tiempos sobre los que se debía trabajar.

Para optimizar el tiempo de llenado se ha observado la tendencia de la presión de inyección en función del tiempo de llenado.

Se observó que las piezas se llenaran completamente y que la diferencia de presiones entre ellas no fuera muy alta. Cuando se consiguió el equilibrio entre tiempo y presión se obtuvo el ciclo de llenado óptimo.

d) Optimización de la compactación y enfriamiento

Con la pieza llena al 100% de material, se procedió a configurar el proceso de compactación. Para saber si el tiempo de compactación elegido era el correcto, se observó el % de capa solidificada de la pieza. Se ha ajustado la fase de compactación hasta que toda la pieza tuvo el 100% de capa solidificada o bien hasta que el punto de inyección se solidificó y la compactación ya no afectaba a la pieza.

Una vez optimizado el proceso de compactación se ha configurado el proceso de refrigeración hasta que el 100% de la pieza estuviera solidificada o hasta que la temperatura de la pieza estuviera por debajo de la temperatura de reblandecimiento del material.

La modificación de estos factores ha afectado al resultado final de la pieza inyectada y se ha tenido que configurar un proceso que optimice tiempo, fuerzas de inyección y que garantice una buena calidad a la pieza.

6- Estudio económico

a) Estudio económico de la mano de obra y material

En este apartado del trabajo se ha analizado el coste de la mano de obra y la maquinaria necesarios para realizar los cubiertos.

Además se ha analizado el coste del material por kilo de mezcla.

b) Estudio económico del molde de cámaras calientes y cámaras frías

Para realizar esta parte del estudio económico se acudió a “Talleres Pardo”, donde realizaron un presupuesto aproximativo de estos dos tipos de moldes. Con el presupuesto facilitado por Talleres Pardo se pudo realizar una comparativa entre ambos moldes con el que calcular el tiempo de amortización de ambos.

Con los dos presupuestos comparados se ha elegido finalmente el tipo de molde óptimo para la realización de las piezas.

c) Coste total

Con todas las variables económicas comparadas se ha realizado un presupuesto del coste total de las piezas de cubertería.

4. Preparación de las mezclas y procesado del material

Dentro de este apartado se explica cómo partiendo de tres tipos de grana de materiales diferentes se han obtenido probetas normalizadas de 6 blends distintos. Cada blend cuenta con un porcentaje diferente de PLA, PCL y TPS que provoca que sus propiedades físicas varíen.

4.1. Materiales utilizados

Para la caracterización del proyecto se han utilizado tres tipos de materiales biodegradables diferentes facilitados por el departamento de materiales de la Universidad Politécnica de Valencia Campus de Alcoy.

- **Ácido Poliláctico (PLA)**

El ácido poliláctico es el material base para la fabricación de los blends. Cada mezcla contiene un mínimo de un 60% en peso de PLA en su composición.

Fabricante: NatureWorks LLC

Grado comercial: Ingeo™ Biopolymer 6201D

- **Policaprolactona (PCL)**

La policaprolactona está presente en los compuestos con diferentes porcentajes en peso, la cantidad puede variar entre el 0 y el 40%.

- **Almidón termoplástico (TPS)**

El almidón termoplástico está inversamente relacionado con la policaprolactona, cuanto más PCL contiene la mezcla menos porcentaje de TPS forma el blend. Los porcentajes de TPS varían entre 0 y 40% en peso del compuesto.

4.2. Procedimiento

El primer paso ha sido establecer los porcentajes de cada material para cada una de las 6 mezclas que se han sometido a estudio en el presente trabajo.

Se han preparado 6 blends diferentes con un peso de 1 kg de mezcla cada uno. Los porcentajes de cada material se han calculado en función del peso.

Los 6 blends que se han preparado tienen las siguientes formulaciones:

- 1) PLA 100%
- 2) PLA 60% + PCL 40%
- 3) PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%
- 4) PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%
- 5) PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%
- 6) PLA 60% + TPS 40%

Como se observa en las formulaciones, el ácido poliláctico es el material base de la mezcla y provoca que la influencia del PLA en el comportamiento de las muestras sea mayor que la del PCL y TPS.

Los blends, al ser mezclas físicas y no llevar en su composición ningún tipo de plastificante, ni ningún compatibilizante adicional, se han preparado de forma manual teniendo en cuenta los porcentajes en peso de cada material, lo que supone que para su preparación se necesita una báscula y bolsas herméticas de plástico donde verter el contenido de cada mezcla.

En el caso de la primera mezcla (PLA 100%) se ha pesado en la báscula 1 kg de granza de PLA, se ha sellado y marcado la bolsa para su posterior procesado.

Para la segunda muestra (PLA 60% + PCL 40%) se han pesado 600 g de PLA y 400 g de policaprolactona PCL. Con los porcentajes pesados se añaden los dos componentes a la bolsa hermética y se marcan. Es importante, una vez se hayan mezclado las diferentes granzas, agitar manualmente la bolsa para conseguir que las dos granzas se mezclen homogéneamente y así facilitar el proceso de extrusión.

Para la tercera mezcla (PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%) se ha preparado la base de 600 g de PLA y se ha añadido a la bolsa 300 g de PCL y 100 g de TPS. Siguiendo el mismo procedimiento anterior, se mezclan manualmente en la bolsa hermética y se marca para su posterior procesado.

La cuarta muestra (PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%) está formada por 600 g de PLA base al cual se le añaden 200 g de PCL y 200 g de TPS.

En la quinta muestra (PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%) se han necesitado 600 g de PLA, al que se le han añadido 300 g de PCL y 100 g de TPS.

Para finalizar la preparación de los blends se ha preparado una mezcla de 600g de PLA y 400 g de TPS.

Con las mezclas preparadas, se han procesado por extrusión para obtener una mezcla física homogénea.

4.2.1. Extrusión

La extrusión consiste en hacer pasar bajo la acción de la presión un material termoplástico a través de un orificio con forma más o menos compleja (hileras) y de manera continua, de forma que el material adquiera una sección transversal igual a la del orificio. Este proceso de extrusión tiene por objetivos, la obtención de material de forma continua y con la forma determinada por la boquilla. Este método de procesado de materiales termoplásticos suele usarse para la producción de perfiles, tubos, películas plásticas, hojas plásticas, etc.

En nuestro caso, se extruye un filamento continuo de forma circular

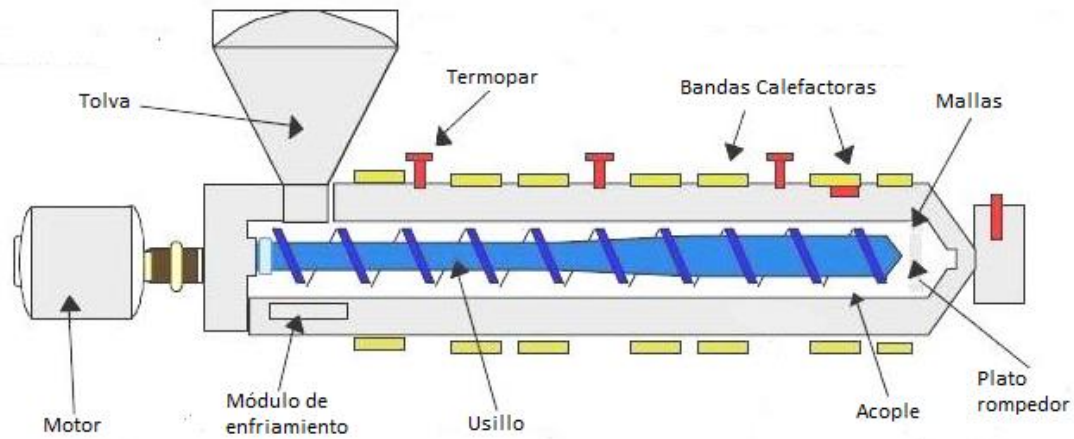


Figura 4.1 Diagrama Extrusora

Antes de proceder a extruir los materiales, se han tenido en cuenta una serie de datos para procesar el material correctamente. Dadas las características de los materiales, las resistencias de la máquina se han configurado a una temperatura de 185°C para que los materiales fundan correctamente sin llegar a degradarse.

Por otra parte, el otro dato a tener en cuenta ha sido la velocidad de alimentación de los usillos. A estos se les configuró una velocidad continua de 60 rev/min, lo que dio al polímero fundido una velocidad continua de avance.

Basándonos en el esquema anterior, las 5 mezclas de material se han vertido en la tolva que dosifica el material y lo introduce progresivamente dentro de la extrusora de doble usillo.

La primera zona por la que ha pasado el material dentro de la extrusora ha sido la zona de alimentación. En esta zona, el material se precalienta para facilitar su procesado y se le induce un movimiento de avance hacia la segunda zona de la extrusora.

En la segunda etapa de la extrusión, etapa de compresión, el polímero fundido adquiere una consistencia líquida. En esta zona se elimina el aire restante que pueda contener el polímero y se le aplica una fuerza de compresión al polímero.

Seguidamente, el material pasa por la zona de medición donde se obtiene un polímero fundido homogéneamente y con la presión necesaria para ser bombeado a través del troquel.

Antes de extruir el material, ha pasado por la placa rompedora. Este elemento de la extrusora es un elemento de gran importancia ya que tiene la función de borrar la “memoria del material”. Debido a las propiedades viscoelásticas de los materiales, si no pasaran por una placa rompedora, los polímeros recordarían el movimiento giratorio aplicado por los usillos y tenderían a rotar una vez extruido el perfil provocando distorsiones y deformaciones en el producto extruido. Con el uso de las placas rompedoras se consigue borrar la memoria de los materiales y se evita que el material se deforme una vez extruido.

Los perfiles obtenidos se dejarán enfriar en unas placas de aluminio hasta que solidifique el material completamente.

4.2.2. Trituración

La trituración se define como el proceso mecánico por el cual se reduce el tamaño de las partículas de un material.

En nuestro caso, una vez enfriadas las mezclas de material, ha sido necesario obtener granza homogénea que se pueda inyectar.

Para triturar el material se ha recurrido a una trituradora industrial que reduce el tamaño de las partículas del material compuesto hasta obtener un tamaño de granza adecuado para el proceso de inyección.

Al igual que la extrusora de doble usillo utilizada anteriormente, la trituradora también cuenta con zonas diferenciadas para procesar el material:

La primera zona por la que ha pasado el material es la tolva o zona de alimentación. Esta zona de la trituradora es la encargada de almacenar el material y dosificar la cantidad de material que pasará a la zona de las cuchillas de corte para su pelletizado.

Seguidamente, el material pasa por la zona de corte donde unas cuchillas de acero procesan el material hasta reducirlo a tamaño de granza adecuada para ser utilizada en el proceso de inyección.

Finalmente, cuando el material ha alcanzado el tamaño de grano óptimo se envía a la zona de recogida donde se almacenan los distintos materiales compuestos debidamente marcados en bolsas herméticas listos para ser procesados por inyección.

Siguiendo este proceso se han triturado los diferentes blends utilizados en el trabajo salvo el PLA 100% que se ha procesado directamente en la inyectora sin necesidad de pasar previamente por la extrusora ni por la trituradora.



Figura 4.2 Trituradora industrial

Datos a tener en cuenta

La trituradora debe limpiarse cada vez que se procese un material distinto para evitar que los restos de otros compuestos contaminen otras mezclas con porcentajes de material distintos.

El proceso de limpieza de la trituradora es un proceso simple pero laborioso ya que cualquier partícula de otro compuesto que no haya sido eliminada podría contaminar las muestras.

Para evitar la contaminación, se desmontarán ciertas zonas de la trituradora donde los materiales sobrantes tienden a acumularse. En este caso se desmontará la carcasa exterior que da acceso a las cuchillas y a la criba de la máquina, y con la ayuda de unos cepillos y de un compresor de aire se limpiará la máquina minuciosamente hasta eliminar todas las partículas de otros materiales.

En la fase de trituración se perderá inevitablemente cierta cantidad de material, aunque la cantidad perdida no afectará a la producción de probetas posterior.

Para realizar la trituración, el operario deberá disponer del equipo de protección individual necesario (gafas, bata y guantes) para evitar que las partículas que salgan despedidas de la máquina puedan provocar alguna lesión. Hay que resaltar que el proceso de limpieza de la máquina se realizará, evidentemente, con la maquina desconectada de la red eléctrica.

4.2.3. Inyección de Probetas Normalizadas

Se denomina moldeo de inyección al proceso semicontinuo por el cual se inyectan materiales en estado fundido en un molde cerrado a presión, a través de un orificio llamado boquilla. Dentro del molde, el material se enfría y solidifica hasta que adquiere una consistencia suficiente para ser extraído. Una vez enfriado el material, el molde se abre y se extrae la pieza del material inyectado de la cavidad del molde.

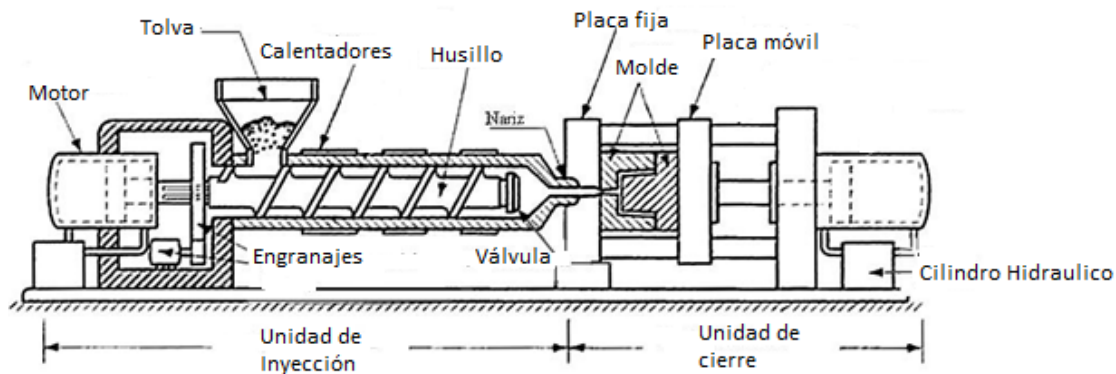


Figura 4.3 Diagrama inyectora

Consideraciones previas a la inyección

La primera consideración a tener en cuenta antes de inyectar los materiales es la humedad que contiene la granza, ya que una humedad elevada producirá errores en las piezas inyectadas.

Para evitar el problema de la humedad, las granzas de todas las mezclas se han introducido en una estufa durante 48h y a una temperatura de unos 45°C. Este proceso seca completamente los materiales eliminando cualquier resto de humedad en las muestras.

El siguiente factor a tener en cuenta es que el PCL suele dar problemas cuando se inyecta junto con PLA, para evitar estos problemas se buscó una temperatura de inyección adecuada en la que los dos materiales no sufrieran ningún tipo de degradación y se obtuvieran muestras con buena miscibilidad y calidad.

Sabiendo que la temperatura de degradación del almidón termoplástico (TPS) y de la policaprolactona (PCL) está sobre 300°C y que la temperatura de degradación del ácido poliláctico (PLA) es de 350°C, se ha buscado una temperatura de inyección que no produzca deterioros a los compuestos de las mezclas.

4.2.3.1. Moldeo Por Inyección

Antes de proceder a la inyección de las probetas se decidió el orden de inyección de los materiales:

- 1) PLA 100%
- 2) PLA 60% + TPS 40%
- 3) PLA 60% + TPS 30% + PCL 10%
- 4) PLA 60% + TPS 20% + PCL 20%
- 5) PLA 60% + TPS 10% + PCL 30%
- 6) PLA 60% + PCL 40%

Seguidamente, se establecieron las condiciones del ciclo de inyección.

Se comprobó que a una temperatura de 180°C el material no sufría ningún desperfecto y se obtenían piezas con la calidad adecuada.

Para alcanzar esta temperatura se configuraron las zonas de calentamiento de la máquina del siguiente modo:

Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
160°C	165°C	170°C	180°C

Tabla 4.1 Zonas de calentamiento de la inyectora

La razón del aumento escalonado de la temperatura no es otro que evitar que el material sufra un choque térmico excesivo que pueda degradarlo. De esta manera el material va fundiendo y aumentando la presión de compresión progresivamente hasta alcanzar las condiciones de inyección.

El siguiente factor a tener en cuenta es el tiempo de ciclo. El tiempo determinará la calidad final de la pieza y es el factor que mejor hay que optimizar para obtener una producción alta.

Los tiempos de ciclo son muy variables y dependen en gran medida de las características de la pieza (tamaño, geometría, material, etc.) aunque siempre se intenta configurar tiempos de ciclo cortos. Los tiempos de ciclo pueden durar desde unos pocos segundos para piezas pequeñas y con diseños simples a varios minutos para piezas grandes o con materiales técnicos.

En nuestro caso, tenemos unos diseños simples (probetas normalizadas) y de tamaño reducido. Pero por otra parte, para garantizar la estabilidad dimensional de las probetas recurriremos a un ciclo relativamente largo para este tipo de piezas, unos 14 segundos por pieza inyectada.

Antes de proceder a la inyección y con el material listo en la tolva, se realizarán 4 descargas de desecho para limpiar el usillo y asegurarnos que la máquina no contiene restos de otro material que podría invalidar las piezas obtenidas por inyección.

Seguidamente, se ajusta la compactación hasta que se obtienen piezas completamente llenas, sin rechupes, sin defectos y sin deformaciones.

5. Caracterización y selección del material

En el apartado de caracterización del material, se han determinado las propiedades físicas, térmicas y de biodegradabilidad de las diferentes mezclas mediante el uso de ensayos normalizados.

Con el resultado de estos ensayos se ha podido realizar un perfil de cada mezcla de materiales y compararlos entre sí para determinar el blend que más se ajuste a las necesidades de nuestro trabajo.

Hay que destacar que debido a que el material base es PLA y cuenta con un mínimo de 60% de peso de la mezcla, las propiedades de los blends obtenidas en algunos ensayos no varían significativamente.

5.1. Resultados Obtenidos

5.1.1. Caracterización Propiedades Mecánicas

En el siguiente apartado del trabajo se han analizado los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos realizados a las 6 muestras de material.

Los resultados de los ensayos han determinado las propiedades mecánicas de los materiales. Con estos resultados se han caracterizado los compuestos y han servido como referencia para decidir cuál de ellos es el más adecuado para la fabricación de los cubiertos desechables.

5.1.1.1. Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción se basa en la aplicación de un esfuerzo axial creciente a una probeta normalizada de los materiales que se van a estudiar hasta que se produzca la rotura de la probeta.

Con el ensayo de tracción se determinan ciertas características mecánicas importantes para caracterizar el material:

- Zona elástica
 - Límite Elástico (RE)
 - Módulo de Young (E)

- Zona plástica
 - Tensión de rotura (Rm)
 - Alargamiento (A)

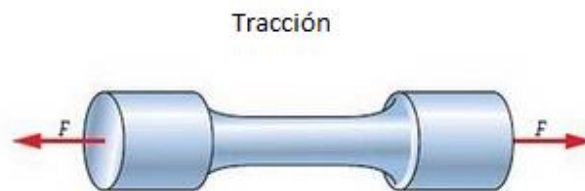


Figura 5.1 Esfuerzo de Tracción

El procedimiento que se ha seguido a la hora de llevar a cabo el ensayo ha sido el siguiente:

- a) Preparar 5 probetas de cada una de las 6 muestras que han sido sometidas a ensayo.
- b) Marcar en el centro de la probeta dos líneas separadas entre sí 5 cm que determinan la longitud inicial (L_0). Dicha longitud se ha utilizado posteriormente para calcular el alargamiento de la probeta midiendo el Δl .
- c) Colocar una probeta normalizada en las mordazas de la máquina.
- d) Configurar en la máquina las condiciones del ensayo
 - Célula de carga 5KN
 - Velocidad del ensayo 10 mm/min

- e) Iniciar el ensayo

Seguidamente, se ensayan 5 probetas de cada una de las 6 muestras y se analizan los resultados obtenidos.

	Módulo Elástico (MPa)	Resistencia (MPa)	Alargamiento (%)
PLA 100%	1140,26	61,77	2,2
PLA 60% + PCL 40%	828,21	38,95	112,6
PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%	827,13	36,812	206,4
PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%	806	36,4	116,4
PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%	823	34,4	38,43
PLA 60% + TPS 40%	736,625	33,59	6

Tabla 5.1 Resultados Ensayo de Tracción

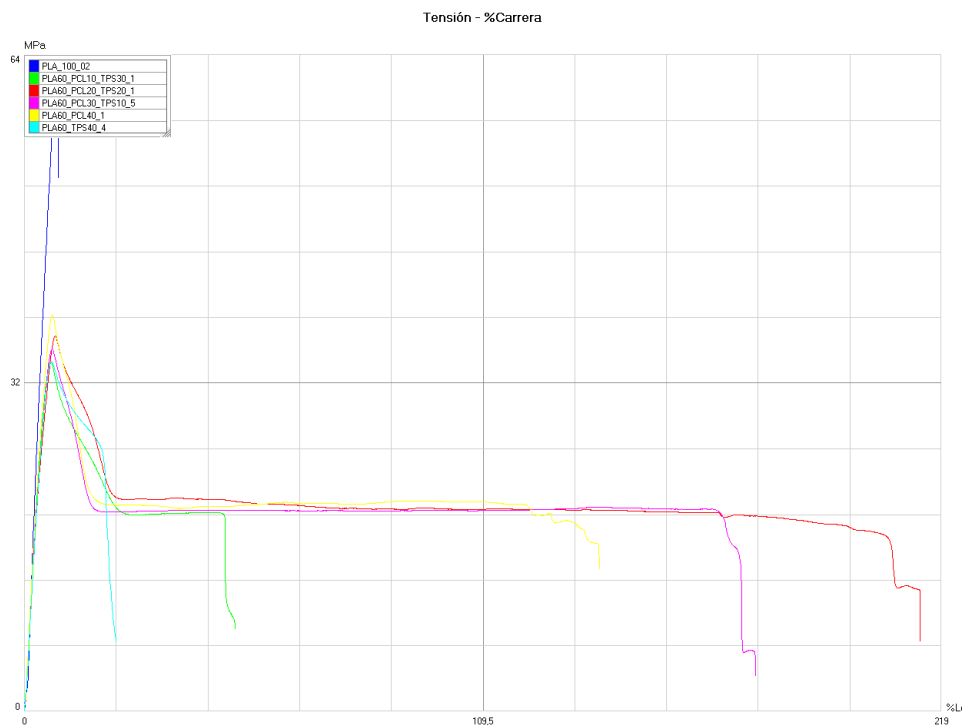


Figura 5.2 Resultados Ensayo de Tracción

Analizadas las 6 muestras se puede decir que con las mezclas de material se obtiene un material más plástico que el PLA virgen, pero menos resistente.

Mezclando el PLA con distintos porcentajes de PCL y TPS se disminuye su módulo y la resistencia a la rotura, pero por otro lado se aumenta su alargamiento.

Como se puede ver en la gráfica Tensión-Carrera, al mezclarse el PLA con otros componentes (PCL y TPS) disminuye la resistencia del material casi a la mitad.

Por otra parte en la gráfica se observa que el PLA virgen es un material rígido que no tiene apenas zona plástica y su alargamiento a la rotura es mínimo, mientras que las mezclas se puede ver que cuentan con una zona plástica parecida y valores de alargamiento muy variables según el porcentaje de material.

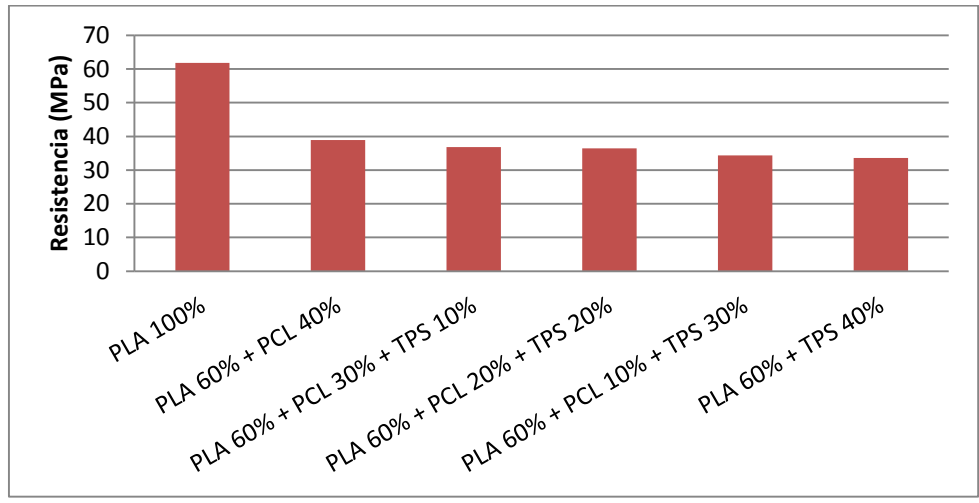


Figura 5.3 Resistencia (MPa)

Analizando en primer lugar la Resistencia a la rotura de los materiales compuestos se observa claramente una tendencia decreciente conforme vamos aumentando la cantidad de TPS y va disminuyendo el porcentaje de PCL en las mezclas.

Aunque la variación es pequeña la tendencia se observa claramente, esto nos indica que el PCL es más elástico que el TPS y que el compuesto más resistente de las 5 mezclas es el “PLA 60% + PCL 40”.

Seguidamente analizamos el Módulo elástico y el Alargamiento de las muestras obtenido en el ensayo:

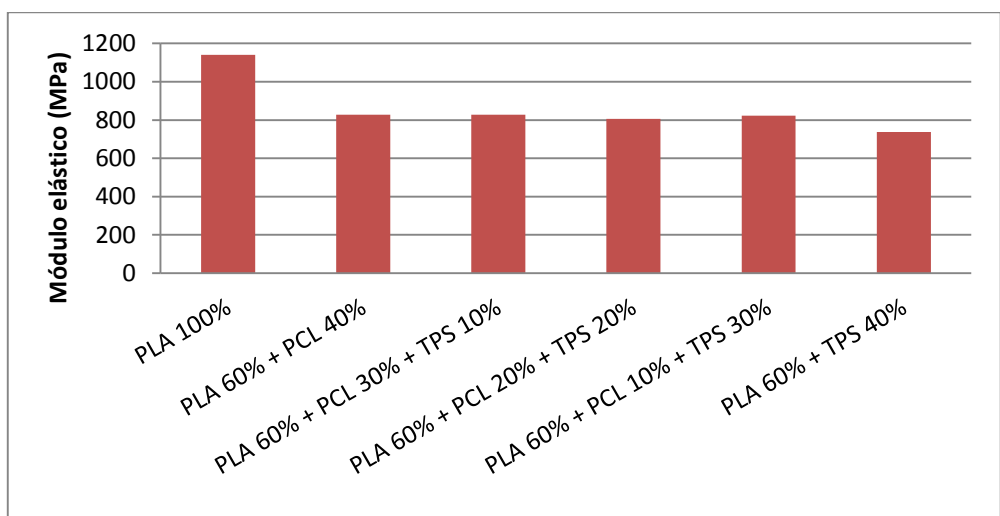


Figura 5.4 Módulo Elástico (MPa)

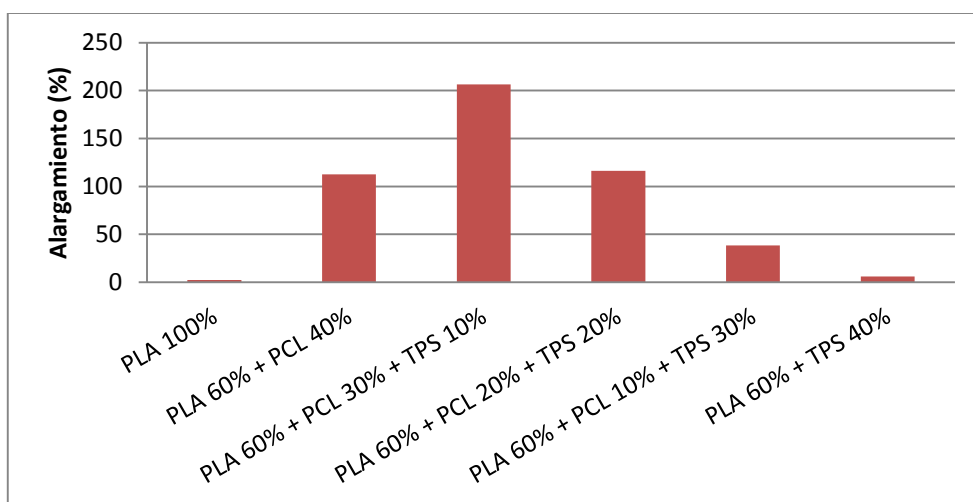


Figura 5.5 Alargamiento (%)

Haciendo referencia al módulo, observamos que el valor de los blends es bastante menor al PLA virgen, lo que nos indica que son materiales menos rígidos que el PLA base.

Por otra parte no se observa ninguna tendencia clara en los valores de los blends, pero se puede decir que todos los compuestos se sitúan sobre 800 (Mpa) menos el “PLA 60% + TPS 40%” que presenta unos valores más bajos que el resto.

Seguidamente, el alargamiento nos aporta unas informaciones muy variadas.

En primer lugar nos encontramos con que el material con el módulo más bajo de los blends “PLA 60% + TPS 40%” es el material que menos se alarga y rompe antes.

Por otro lugar, tenemos que el material a priori más elástico “PLA 60% + PCL 40%” rompe antes que las dos mezclas ternarias que contienen más TPS y menos PCL.

De la misma forma el blend con mayor módulo se observa que es el compuesto que más se alarga (200%).

Estos resultados pueden ser ocasionados por la interacción entre los compuestos dentro del blend, al tratarse de una mezcla física cada material conserva su alargamiento característico y al no contener ningún compatibilizante las cadenas de los materiales se estiran independientemente y de una forma distinta según el material que se trate.

Hay que destacar que las dos mezclas binarias han sido las que han mostrado resultados de alargamiento más constantes en las 5 probetas ensayadas, mientras que las mezclas ternarias han mostrado resultados muy dispares.

Como las medidas del módulo no nos mostraban con claridad el comportamiento de cada material, se midieron los Módulos de Young con la banda extensiométrica longitudinal para confirmar los resultados:

Material	Módulo de Young (MPa)
PLA 100%	3554
PLA 60% + PCL 40%	2327
PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%	2164
PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%	2133
PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%	2328
PLA 60% + TPS 40%	2517

Tabla 5.2 Resultados Módulo de Young medido con banda extensiométrica

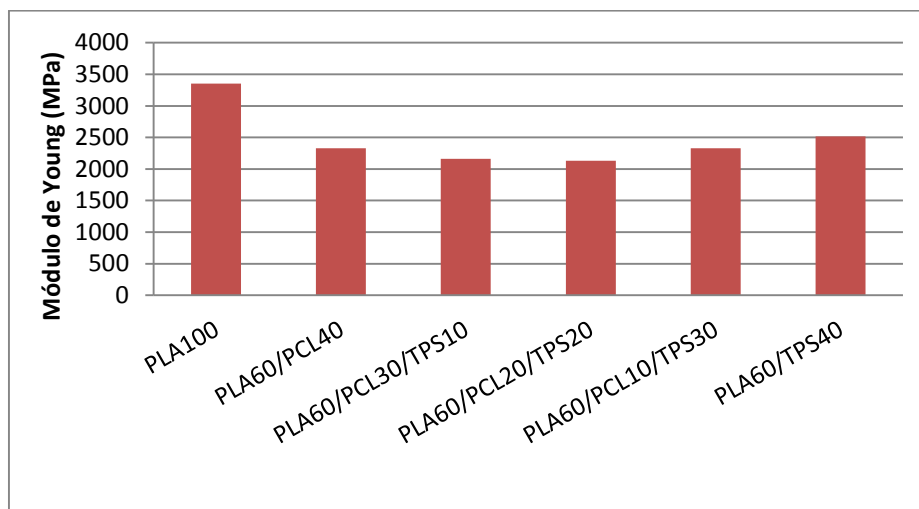


Figura 5.6 Módulo de Young medido con banda extensiométrica

Como se puede observar, los resultados obtenidos por la banda extensiométrica longitudinal parecen más coherentes que los obtenidos por el ensayo de tracción.

En primer lugar, se observa que el PLA sigue siendo el material más rígido.

Seguidamente se observa que las mezclas con módulos más altos y por tanto más rígidas (PLA 60% + TPS 40% y PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%) son las que menos alargamiento tienen.

En el caso contrario tenemos que las mezclas con menos módulo y por tanto más elásticas (las dos mezclas ternarias) son las que más alargamiento tienen.

Así que se puede decir que los resultados obtenidos por las bandas extensiométricas se ajustan mejor a los valores reales de alargamiento de las probetas.

Se destacará de nuevo el PLA 60% + PCL 40%, ya que con un módulo relativamente alto es el material que más resistencia presenta y cuenta con un alargamiento bastante elevado.

5.1.1.2. Flexión

En el ensayo de flexión en tres puntos se generarán esfuerzos totalmente diferentes al ensayo de tracción. La fuerza del ensayo se aplicará en el centro de la probeta, lo que provocará que la parte inferior de las probetas se encuentre traccionada y la parte superior se encontrará comprimida.

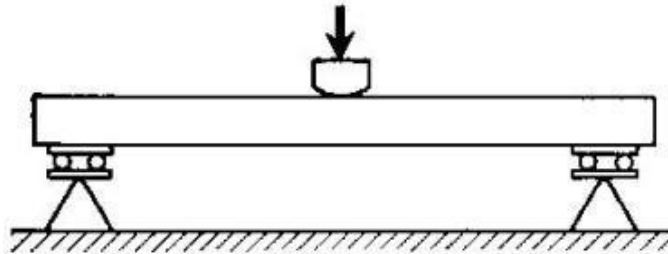


Figura 5.7 Diagrama ensayo de flexión

El procedimiento a seguir ha sido el mismo que en el ensayo de tracción, siguiendo la norma se han ensayado 5 probetas de cada material con las siguientes condiciones de ensayo:

- Célula de carga 5KN
- Velocidad de ensayo 5mm/min

Una vez ajustados los parámetros en máquina el procedimiento es sencillo, se coloca una probeta lo más centrada posible entre los apoyos, se lanza el ensayo y se recopilan los datos del ensayo.

Los resultados de los ensayos pueden mostrar incongruencias debido a que no se ha utilizado ningún compatibilizante en las mezclas y la fuerza soportada por los materiales puede variar.

Antes de mostrar y analizar los resultados hay que mencionar que la única probeta con la rigidez suficiente para romper fue la de PLA virgen, los blends se deformaron pero ninguno llegó a romperse, por lo que se decidió dejar una carrera de unos 20mm para que los resultados de las mezclas fueran fiables.

	Módulo Elástico (MPa)	Resistencia (MPa)	Carrera (mm)
PLA 100%	3200	103,72	10,7
PLA 60% + PCL 40%	2047,1	64,84	18,942
PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%	1856,74	62,3	20
PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%	2037,48	61,42	19,88
PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%	2042,16	59,26	19,976
PLA 60% + TPS 40%	1967,52	57,38	20

Tabla 5.3 Resultados ensayo Flexión

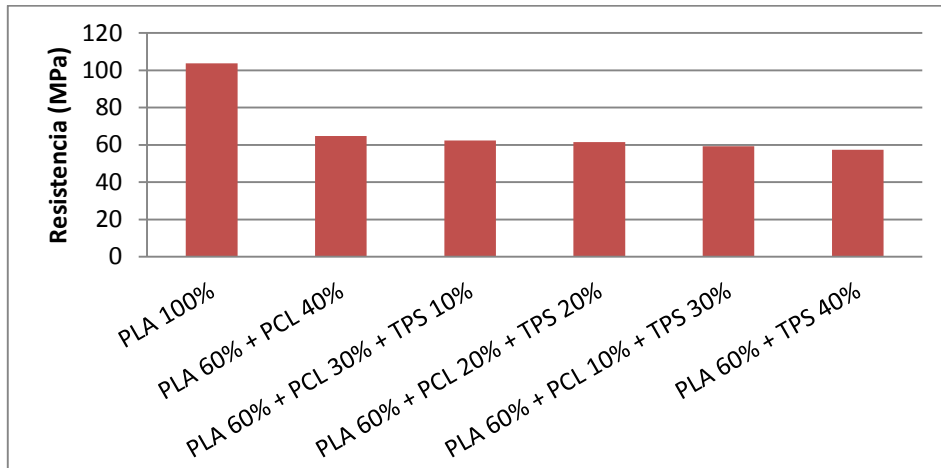


Figura 5.8 Resistencia (MPa)

Para realizar el análisis del ensayo no se ha utilizado la carrera porque el único material que rompía era el PLA, los demás materiales han sido obligados a realizar una carrera de 20mm para poder hacer las comparativas entre ellos.

Lo primero que nos damos cuenta analizando la tabla y los gráficos es que mezclando el PLA virgen con PCL y TPS disminuye la rigidez del material considerablemente y la resistencia. También se puede decir que debido a esta rigidez el único material que rompe es el PLA virgen, mientras que las otras mezclas solo se deforman.

Observando la resistencia máxima a la rotura se observa una tendencia decreciente que nos indica que el material compuesto que más fuerza necesita para deformarse y mejor resiste a la rotura es la mezcla de "PLA 60% + PCL 40%", mientras que el material que peor resiste los esfuerzos es el "PLA 60% + TPS 40%".

Hay que destacar que la diferencia entre los blends es muy pequeña si la comparamos con el material base PLA donde si se observan diferencias notables.

El siguiente parámetro que podemos analizar es el Módulo obtenido por los materiales, en el módulo también se observa una bajada importante del PLA virgen a las mezclas de materiales. Esto nos indica que el PLA virgen es el material más rígido de las seis muestras ensayadas y que al añadirse otros compuestos más plásticos su módulo disminuye drásticamente.

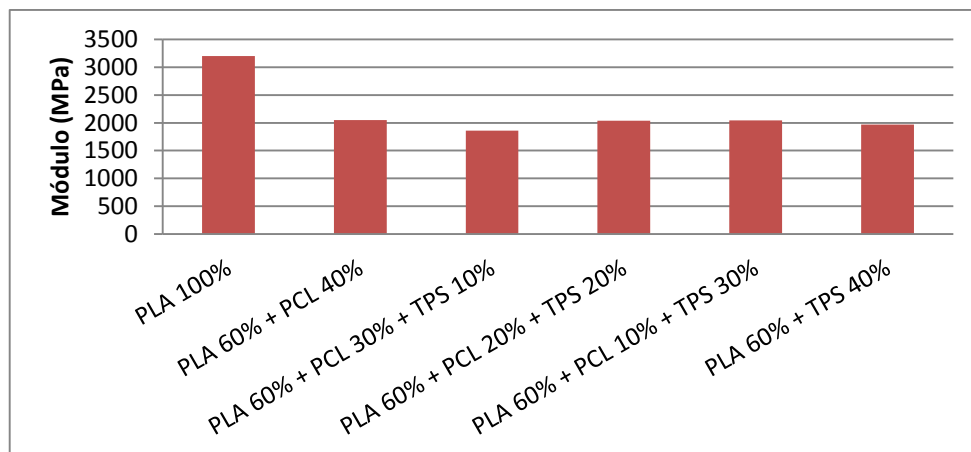


Figura 5.9 Módulo (MPa)

Por otra parte, en el estudio del módulo no encontramos ningún patrón que explique el comportamiento de los materiales. Se han obtenido valores diversos que aparentemente no guardan ninguna correlación entre ellos. Se puede destacar que todos los valores de los blends se mueven sobre los 2000 (MPa).

Por tanto, se puede decir que fijándonos en la flexión del material, el compuesto que presenta las mejores condiciones, aunque con un margen muy estrecho, es el PLA 60% + PCL 40% por ser el material que más resistencia presenta y tener el mayor módulo.

5.1.1.3. Dureza Shore D

Con el ensayo de dureza se ha obtenido la resistencia de cada una de las mezclas de material a ser penetradas o rayadas por otros materiales más duros.

El procedimiento del ensayo de dureza, siguiendo las indicaciones de la norma DIN 53505 ha consistido en realizar 3 medidas de dureza en cada probeta. Así mismo se midió la dureza en 5 probetas distintas de cada material.

Por lo tanto, se han realizado 15 medidas de dureza de cada una de las 6 mezclas de material, dando estas durezas una media de resultados que se han utilizado para realizar el análisis comparativo.

Para realizar las medidas se ha colocado la probeta a ensayar debajo del penetrador, se ha accionado el mecanismo que pone al penetrador en contacto con el material y con ayuda de un reloj comparador se han registrado los resultados del ensayo.

Además del número de mediciones se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Fuerza de aplicación: 50 N
- Ángulo del penetrador: 30°

Realizadas las medidas de cada blend, se obtienen los siguientes resultados:

DUREZA SHORE D	
PLA 100%	73.066
PLA 60% + PCL 40%	63
PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%	63.6
PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%	63.66
PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%	64.26
PLA 60% + TPS 40%	64.6

Tabla 5.4 Dureza Shore D

Se observa en la tabla que el material más duro es el material base PLA.

Analizando las mezclas de materiales se observa una tendencia al aumento de dureza conforme disminuye el porcentaje de PCL en el material y se incrementa el porcentaje de TPS en las mezclas, siendo el blend más duro el (PLA 60% + TPS 40%) y el más blando el (PLA 60% + PCL 40%).

Los resultados de la dureza están estrictamente ligados al Módulo de Young obtenido en los ensayos de Tracción, conforme vaya aumentando el módulo del material aumentará también la rigidez del mismo, y por tanto aumentará la dureza del compuesto.

En los resultados anteriores se observa que el PLA base es el material más rígido y por tanto el material más duro.

Seguidamente, el TPS presenta un módulo más elevado que el PCL. Con lo cual se confirma que conforme se va aumentando el porcentaje de TPS en la muestra y disminuyendo el del PCL, va aumentando la rigidez de la mezcla y por tanto aumenta la dureza del material.

5.1.1.4. Charpy

Con el ensayo de impacto Charpy se analiza la capacidad de absorción y la resistencia a los impactos de cada una de las 6 muestras del estudio.

Una vez realizado el ensayo de impacto sabremos la tenacidad de cada una de las mezclas del estudio y se podrán comparar los resultados para definir cuál de las mezclas es la más adecuada para la fabricación de los cubiertos desechables.

De cada material del estudio se ensayan 5 probetas y se saca una media de los resultados obtenidos para obtener el resultado de cada compuesto.

El procedimiento a seguir en el ensayo de impacto es el siguiente:

- Colocar la probeta en el portamuestras de la máquina
- Liberar el péndulo Charpy
- Registrar la energía absorbida por el material

Antes de realizar el ensayo, tal y como se indica en apartados anteriores, se realizó una entalla normalizada en cada probeta a ensayar para provocar una acumulación de tensiones que asegurara que la probeta rompiera cuando fuese sometida al ensayo.

Realizado el ensayo de impacto se obtienen los siguientes resultados:

Material	Resiliencia
PLA 100%	0.086
PLA 60% + PCL 40%	0.268
PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%	0.264
PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%	0.262
PLA 60% + PCL 10 % + TPS 30%	0.254
PLA 60% + TPS 40%	0.242

Tabla 5.5 Resultados ensayo de impacto Charpy

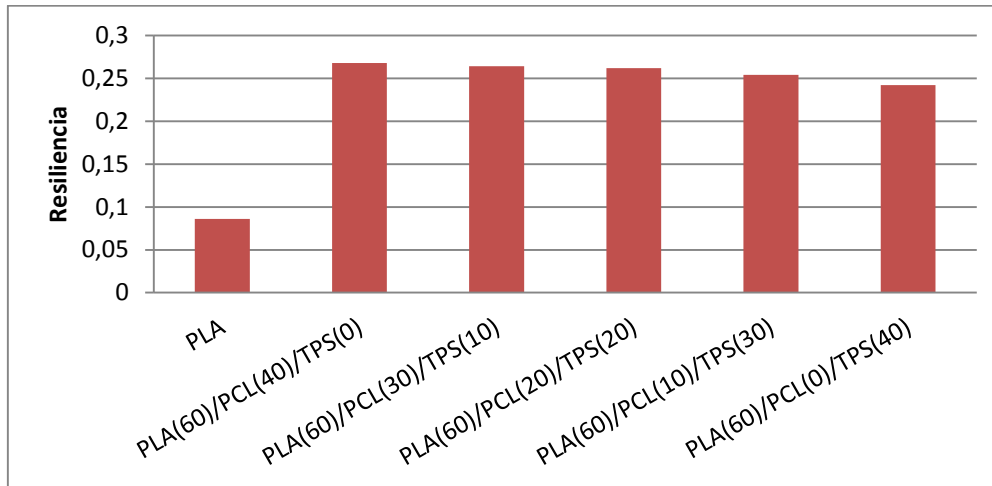


Figura 5.10 Resultados Gráficos Resiliencia

Como se observa en la tabla de resultados, el material con menor capacidad de absorción del impacto es el material base (PLA), mientras que en las mezclas se observa una clara tendencia creciente siendo el compuesto con más cantidad de PCL el que más energía absorbe y el que más contenido en TPS tiene el que menos capacidad de absorción de energía presenta.

Se puede comprobar que los resultados tienen una relación inversa al módulo obtenido en los ensayos de Tracción, con lo que se puede deducir que con el aumento del Módulo de Young disminuye la capacidad de deformación del material y con ello la capacidad de absorción de energía al impacto.

Analizando los resultados, se observa que el material con el módulo más alto (PLA) y por tanto el más rígido, es el que menos capacidad de deformación tiene y por tanto tiene la capacidad de absorción de energía más baja.

De la misma forma que ocurre con el PLA virgen se pueden explicar los resultados obtenidos con los blends. Siendo el blend con el módulo más alto (PLA 60% + TPS 40%) y menor capacidad de deformación, el que menor energía absorbe.

Por el otro lado, el blend con mayor capacidad de deformación y menor módulo (PLA 60% + PCL 40%) resulta ser el material que más energía absorbe.

Siguiendo esta tendencia, se puede explicar que a mayor porcentaje de PCL en la mezcla mayor capacidad de absorción de la energía, mientras que a medida que aumentamos la cantidad de TPS en el blend y vamos disminuyendo la de PCL, también vamos aumentando la rigidez del material, y por tanto la capacidad de absorción va disminuyendo.

A pesar de que la capacidad de absorción de energía del PCL es mejor que la del TPS y que la tendencia a disminuir la resiliencia del material es evidente, las diferencias entre los 5 compuestos son mínimas.

Al margen de los resultados de las mezclas, observamos que añadiendo un material con mejores propiedades plásticas al PLA se mejoran notablemente las características del material. Como muestra la gráfica, añadiendo un material al PLA virgen se ha mejorado la capacidad de absorción de energía en una media de tres veces.

5.1.2. Caracterización de Propiedades Térmicas

Con la realización de los siguientes ensayos se han obtenido las características térmicas de cada compuesto cuando se los somete a un ciclo térmico determinado.

Los ensayos térmicos muestran las temperaturas de las principales transiciones térmicas de cada blend (temperatura de fusión (T_m), transición vítrea (T_g) y temperatura de degradación (T_d)) y su rango de temperaturas de trabajo.

La información que se ha recopilado de estos ensayos nos ha servido para comparar y elegir el material más adecuado para fabricar las piezas de cubertería.

En este apartado del estudio hemos realizado los ensayos de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), Análisis Termogravimétrico (TGA), Temperatura de Reblandecimiento HDT y Vicat.

5.1.2.1. Temperatura de deformación bajo carga HDT

La temperatura de deformación bajo carga (HDT) es la temperatura a la que un material se deforma cuando se le aplica una carga determinada. El HDT nos da una idea de cómo se comporta el material cuando se le solicitan propiedades mecánicas a temperaturas elevadas. Normalmente, con este ensayo lo que se pretende es saber la temperatura máxima a la que puede trabajar el material.

El procedimiento que se ha seguido para realizar el ensayo es el siguiente:

- Colocar la muestra en el portamuestras
- Introducir el portamuestras en el baño de aceite
- Iniciar el ensayo

Antes de iniciar el ensayo se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El ensayo se iniciará a una temperatura de 25°C
- La flecha máxima alcanzada en el ensayo es de 0.31 mm
- El peso aplicado a la muestra es de 300 g.

Seguidamente se inicia el ensayo y se obtienen los siguientes resultados.

Material	Temperatura °C
PLA 100%	48
PLA 60% + PCL 40%	46.2
PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%	46.4
PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%	46.6
PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%	46.2
PLA 60% + TPS 40%	46.8

Tabla 5.6 Resultados ensayo HDT

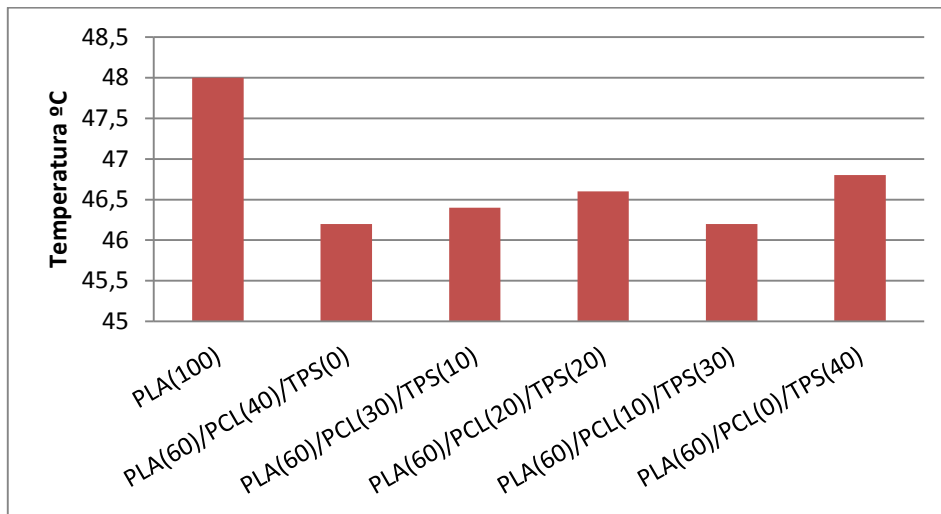


Figura 5.11 Gráfico de resultados HDT

En primer lugar se observa que añadiendo un material más plástico al PLA se disminuye la temperatura de trabajo del material en un orden de 2°C.

Por otra parte, no se observa ninguna tendencia específica en las mezclas de materiales y aunque la variación de la temperatura de trabajo HDT se ve muy claramente en la gráfica, realmente no es tal, ya que no varía ni un grado de temperatura, diferenciándose entre ellas por décimas de grado.

Así que se puede decir que la temperatura de trabajo de los blends estará en torno a los 46°C y la del material base PLA en 48 °C.

5.1.2.2. Temperatura de reblandecimiento VICAT

Con el ensayo Vicat se obtiene una temperatura en la que el material deja de ser sólido 100% y empieza a ablandarse.

Esta temperatura se puede utilizar para hacerse una idea de cuando empieza a fundir un material.

El procedimiento a seguir es muy parecido al utilizado en el ensayo HDT.

Se coloca la muestra en el portamuestras, se introduce en un baño de aceite y se aplica el peso determinado. El ensayo termina cuando la punta de la herramienta penetra 1mm en el interior del material.

Una vez realizado un ensayo para cada tipo de mezcla de materiales se obtienen los siguientes resultados:

Material	Temperatura Vicat (°C)
PLA 100%	53.2
PLA 60% + PCL 40%	51.2
PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%	50.2
PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%	48.8
PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%	47
PLA 60% + TPS 40%	47.4

Tabla 5.7 Resultados ensayo Vicat

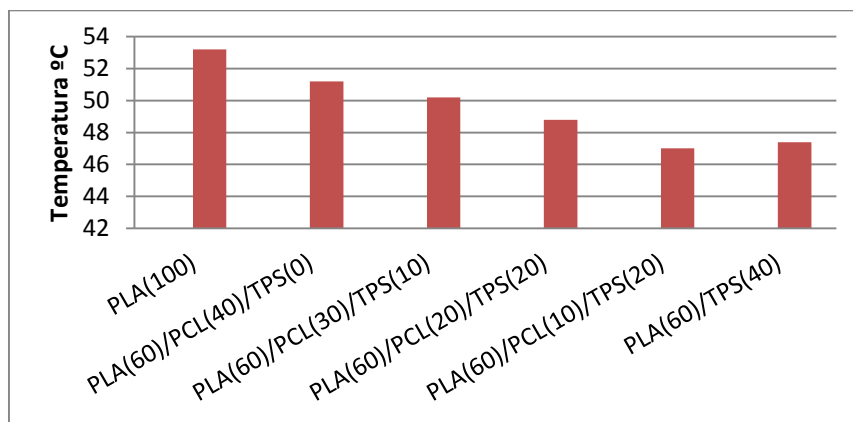


Figura 5.12 Gráfico de resultados ensayo Vicat

En los resultados obtenidos en los ensayos se observa una tendencia del material a reblandecerse antes cuando disminuye el contenido de PCL y aumenta el contenido de TPS.

Sin embargo se observa un repunte de temperatura cuando el contenido de TPS en la muestra es de un 40%.

Así que tendríamos una diferencia de temperaturas entre los blends de unos 4°C, siendo el (PLA60 % + PCL 40%) la muestra que se reblandecería más tarde con una temperatura de 51.2°C y el (PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%) sería la muestra que se reblandecería antes con una temperatura Vicat de 47°C.

También se observa como ocurre en el HDT que la temperatura de reblandecimiento del PLA disminuye cuando se realiza una mezcla física con TPS y PCL. Además las temperaturas de reblandecimiento son unas temperaturas bastante bajas, alrededor de 50°C, lo que sin duda limitará el uso de estos materiales.

5.1.2.3. Análisis Termogravimétrico (TGA)

El Análisis Termogravimétrico mostrará la temperatura a la que el polímero empieza a degradarse y a la que se degrada por completo del polímero.

En la gráfica de resultados se representa el % de masa en función del tiempo.

Antes de empezar los ensayos se han determinado las condiciones en las que se realizarán los mismos. Se ha utilizado una atmosfera inerte de nitrógeno con un caudal de 30cm³/min y un método de ensayo con un rango de temperaturas de 30 a 650°C.

Seguidamente se han preparado las muestras de material con un peso entre 5 y 7 mg.

Material	Peso (mg)
PLA 100%	5.95
PLA 60% + PCL 40%	5.78
PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%	6.73
PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%	5.99
PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%	6.82
PLA 60% + TPS 40%	5.72

Tabla 5.8 Pesos de las muestras

Con las muestras pesadas se han colocado en el crisol y se han lanzado los ensayos.

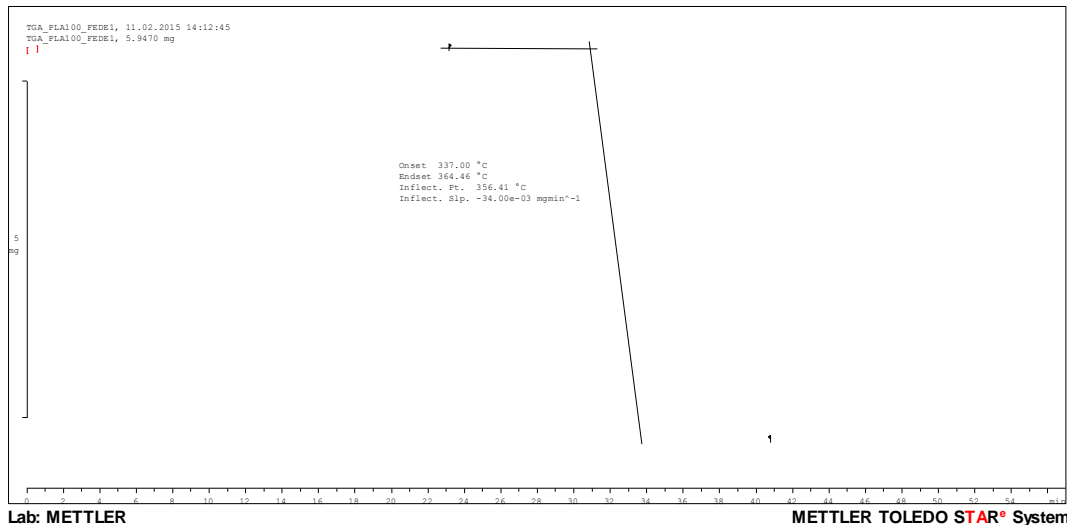


Figura 5.13 Gráfico DSC PLA virgen

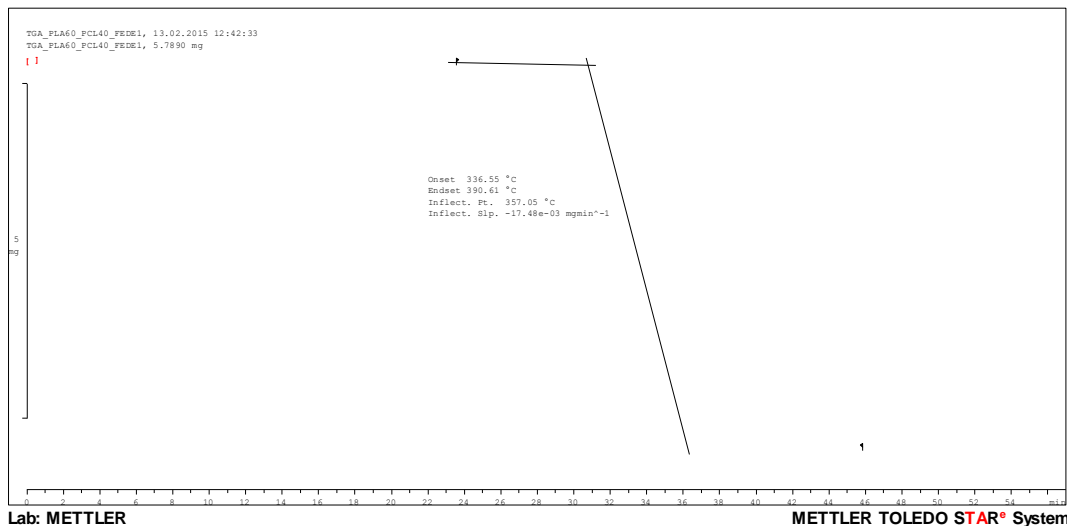


Figura 5.14 Gráfico DSC PLA 60% + PCL 40%

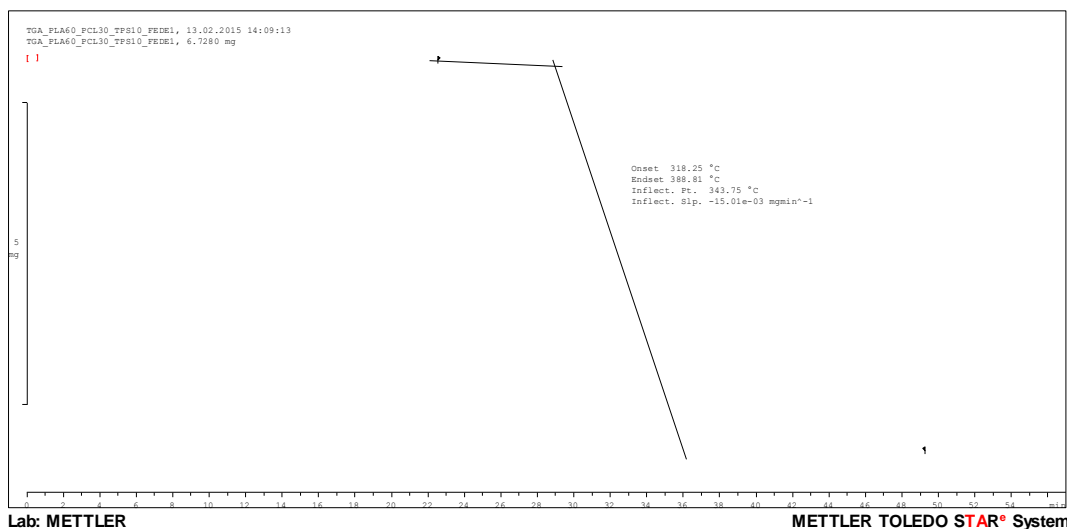


Figura 5.15 Gráfico DSC PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%

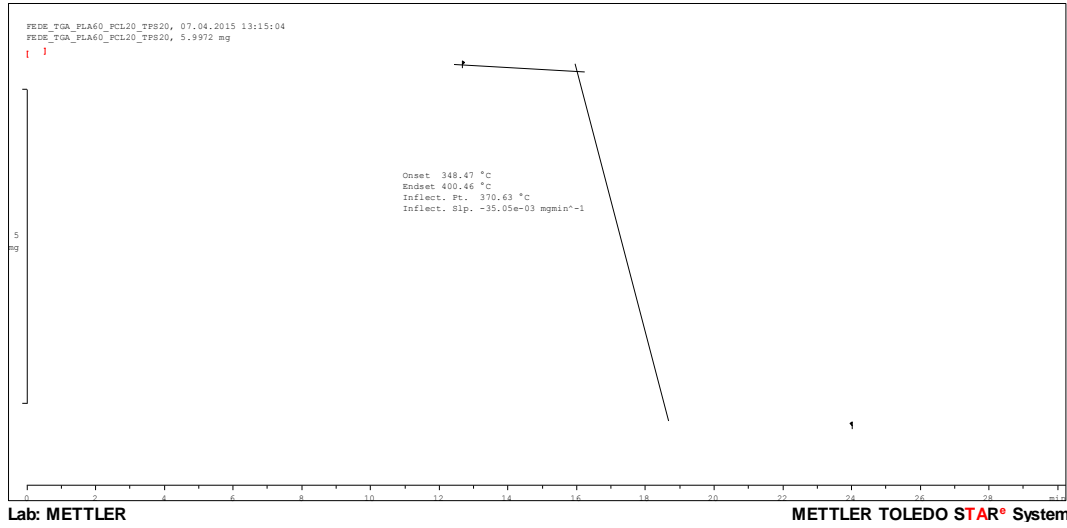


Figura 5.16 Gráfico DSC PLA 60% + PCL 20% + TPS 10%

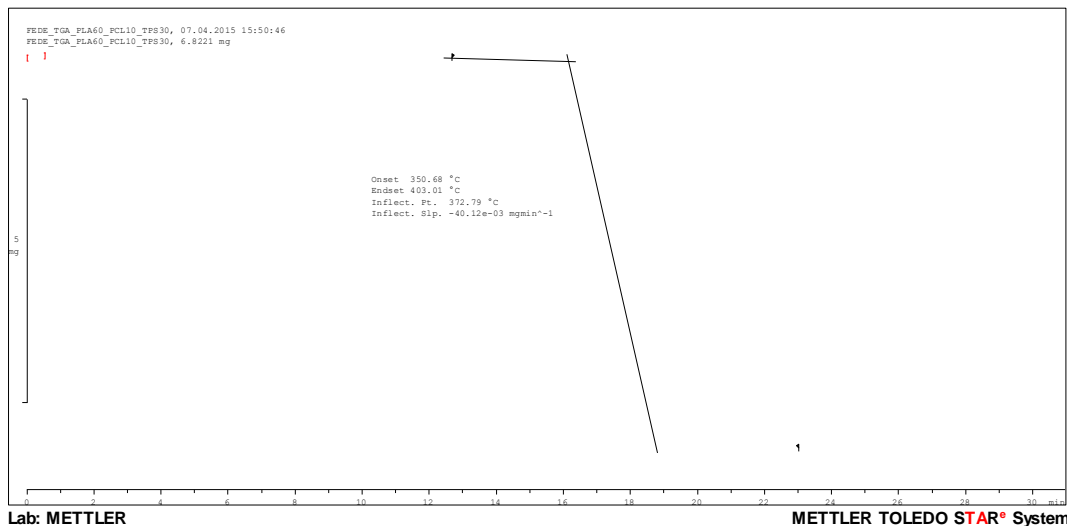


Figura 5.17 PLA60% + PCL 10% + TPS 30%

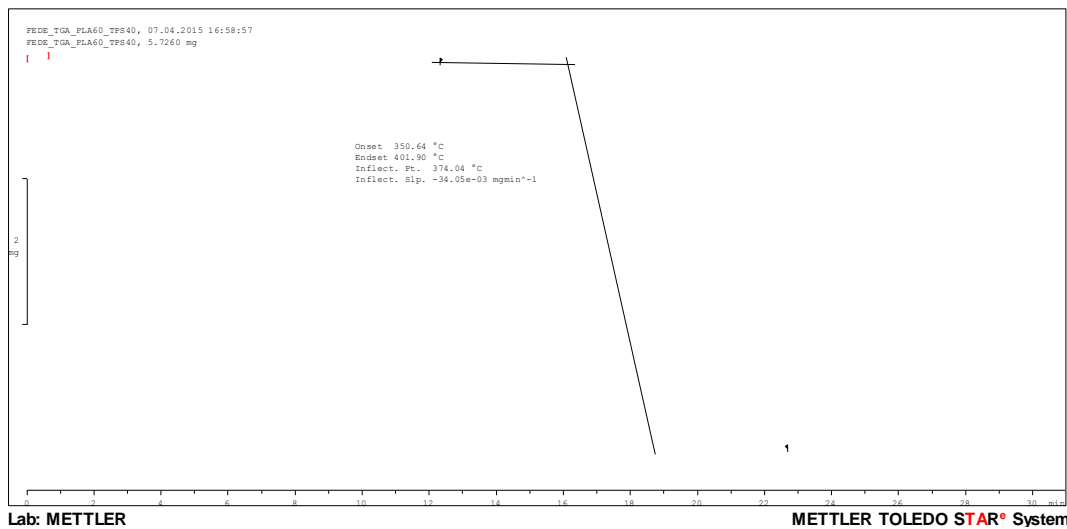


Figura 5.18 Gráfico DSC PLA 60% + TPS 40%

En los resultados obtenidos en el ensayo se observa que todos los compuestos muestran un inicio de degradación sobre 280°C y se degradan completamente a los 500°C.

Estos resultados se ajustan al modelo de degradación que ofrece el PLA virgen, lo que significa que las temperaturas de degradación del PCL y el TPS se encuentran dentro del rango de temperaturas del PLA.

En la siguiente tabla vemos más detalladas las temperaturas de cada compuesto:

Material	Inicio de la degradación (°C)	Final de la degradación (°C)
PLA 100%	280	480
PLA 60% + PCL 40%	280	500
PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%	270	490
PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%	270	500
PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%	290	490
PLA 60% + TPS 40%	290	480

Tabla 5.9 Resultados TGA

Otro detalle que hay que comentar de las gráficas son los saltos y perturbaciones que se observan en los materiales compuestos.

Como se puede ver, el único material que muestra una curva (TGA) uniforme es el PLA referencia. Esto se debe a que toda la muestra está formada por PLA y por tanto el proceso es uniforme.

Por otra parte, la curva TGA de las mezclas de materiales muestra perturbaciones en la curva debidas a los diferentes puntos de degradación del TPS y el PCL que componen las mezclas.

Aunque como se observa en la tabla, los diferentes compuestos varían unos pocos grados en el proceso de degradación, se puede decir que todos los blends tienen su ciclo de degradación muy similar al del PLA.

5.1.2.4. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).

Con el ensayo DSC lo que se ha obtenido son las temperaturas de las transiciones térmicas más importantes de los 6 materiales sometidos a estudio.

El DSC mide en función del tiempo o de la temperatura, la diferencia de calor suministrado a la probeta y la muestra de referencia. Se han identificado los procesos térmicos por los cambios de la entalpía.

Cuando una muestra absorbe energía, el proceso térmico queda reflejado en la gráfica como un proceso endotérmico, y si el material desprende energía, el proceso se refleja en la gráfica como un proceso exotérmico.

Antes de lanzar el ensayo se han preparado las muestras de cada material con unos pesos que pueden oscilar entre 6 y 8 mg de material.

En la siguiente tabla se observan los pesos medidos en la báscula del laboratorio de cada mezcla de material:

Material	Peso (mg)
PLA 100%	6.4
PLA 60% + PCL 40%	6.7
PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%	7.8
PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%	8.06
PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%	6.6
PLA 60% + TPS 40%	5.1

Tabla 5.10 Pesos de las muestras

Seguidamente, se introducen una por una las muestras en la máquina y se lanza el ensayo con un ciclo térmico de ensayo de 30°C a 400°C.

Realizados los ensayos, se han analizado las gráficas obtenidas de cada material y las propiedades de cada uno.

El primer material que se sometió a ensayo fue el PLA base.

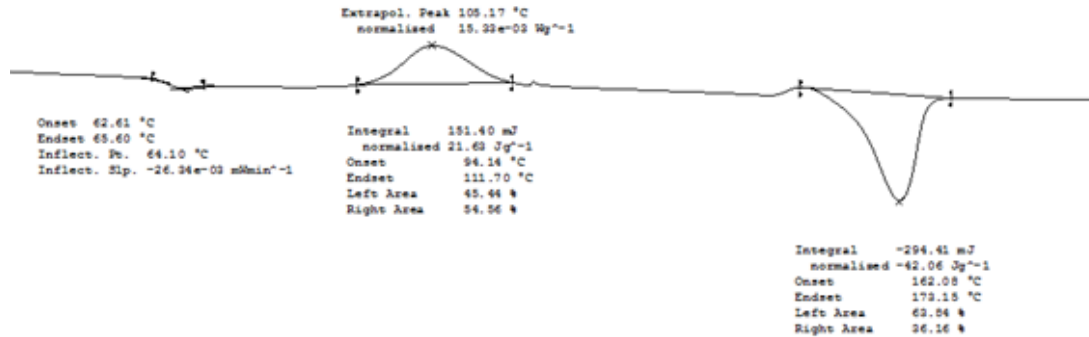


Figura5.19 Gráfico DSC PLA virgen

Se puede observar para el PLA base que el primer proceso endotérmico referente a la temperatura de transición vítrea (T_g) ocurre en un rango de temperaturas entre 62 y 66°C.

La segunda transición térmica la encontramos en el proceso exotérmico ocurrido a 105°C. En este punto podemos decir que ocurre una cristalización en frío del material. Se observa como un proceso exotérmico porque en el reordenamiento de las cadenas del material, se cede energía al medio. En este proceso el material deja de ser amorfo y empieza a cristalizarse.

El siguiente proceso térmico hará referencia a la temperatura de fusión (T_m) del material. Este proceso se mostrará como un proceso endotérmico ya que para que el material alcance la temperatura de fusión será necesario que este absorba energía para aumentar su temperatura. En el PLA base se observa que la temperatura de fusión ocurre a 170°C .

De la gráfica se puede extraer también la temperatura de degradación (T_d) del material que en el caso de PLA comienza a 280°C . Como observamos la T_d extraída del DSC coincide con la temperatura obtenida con el TGA.

Con estos cuatro procesos térmicos, queda caracterizado el PLA base que se comparará con los resultados obtenidos de cada blend.

Para el PLA 60% + PCL 40% se han obtenido los siguientes resultados:

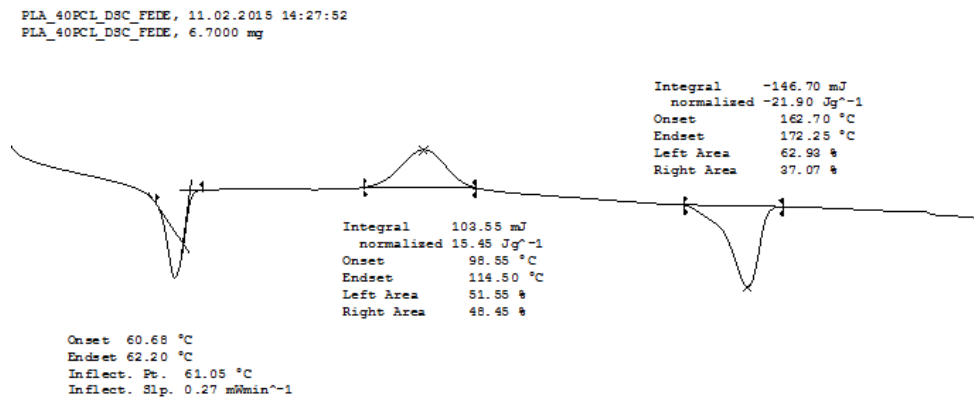


Figura 5.20 Gráfico DSC PLA60% + PCL 40%

La transición vítrea de esta mezcla tiene lugar entre 60 y 62°C , el proceso de cristalización de este blend ocurre a 103°C . El proceso de fusión se sitúa a una temperatura de 168°C .

El último ciclo térmico para esta mezcla, la temperatura de degradación, se produce a 290°C .

El siguiente material a ensayar es la mezcla de PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%.

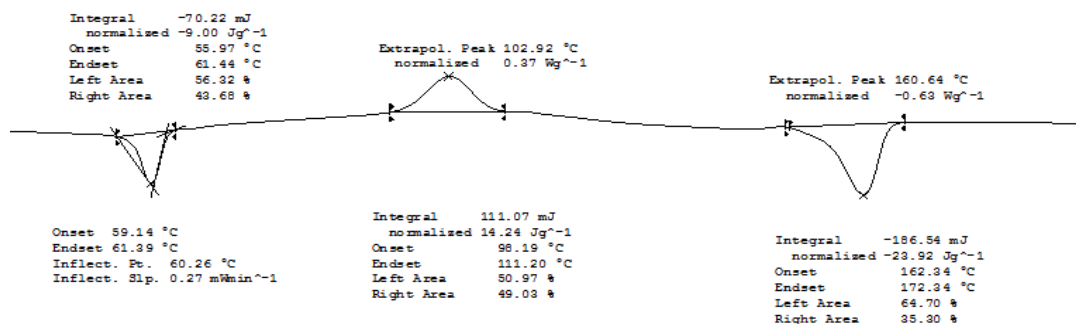


Figura 5.21 Gráfico DSC PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%

De la gráfica de este material se obtiene que la transición vítrea tenga lugar entre 59 y 61°C.

La cristalización en frío ocurre entre 98 y 111°C y la temperatura de fusión sobre 170°C.

La siguiente mezcla a analizar será una mezcla que contiene el mismo porcentaje de PCL y de TPS, un 20% de cada uno.

Y de su gráfica correspondiente se obtiene que el intervalo de temperaturas donde tiene lugar la transición vítrea sea entre 55 y 60°C.

Por otra parte, el rango de temperaturas para el proceso de cristalización en frío se sitúa entre 97 y 110°C.

Por último, su punto de fusión se puede situar a 168°C.

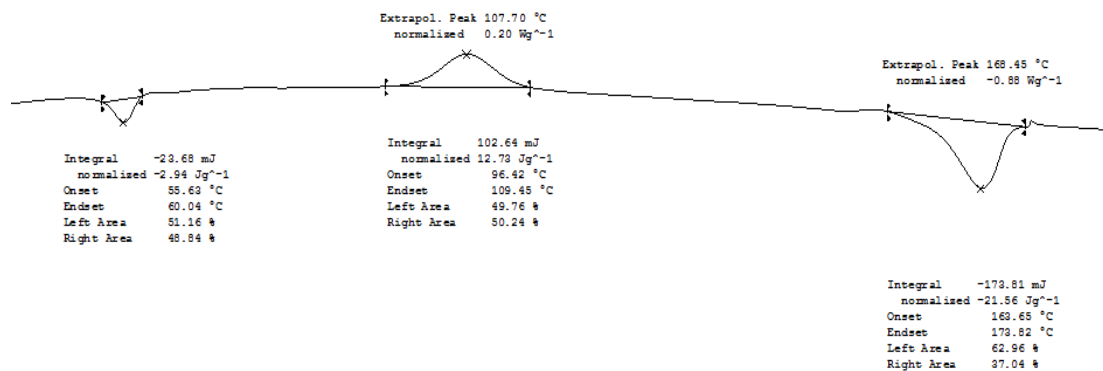


Figura 5.22 Gráfico DSC PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%

Para el PLA 60% + PCL 10% + TPS 30% se han obtenido las siguientes transiciones térmicas:

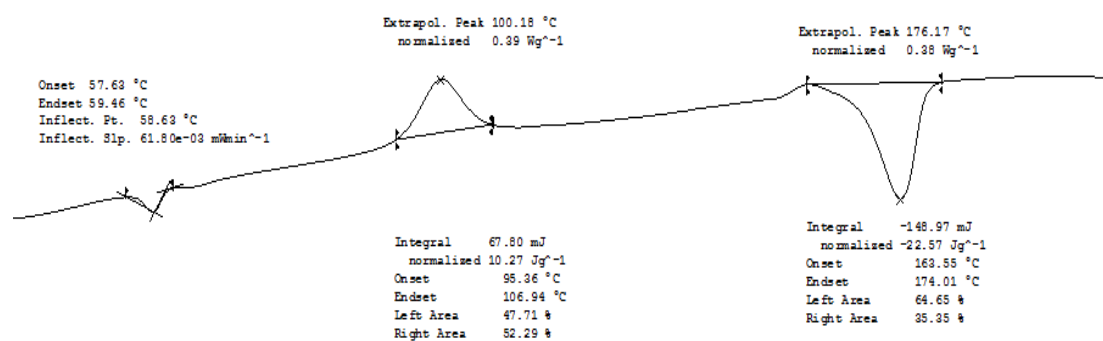


Figura 5.23 Gráfico DSC PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%

Primero se observa el proceso de transición vítrea tiene lugar entre 57 y 60°C. La cristalización en frío del material tiene lugar a 100°C y por último su punto de fusión se sitúa sobre los 176°C.

El último blend al que se ha sometido a estudio es el PLA60% + TPS 40%, y presenta las siguientes características:

El proceso de transición vítrea ocurre a 64°C aproximadamente, seguido por el proceso de cristalización en frío que tiene lugar entre 95 y 106°C.

Por último el punto de fusión, se encuentra a 170°C.

En la siguiente tabla se pueden ver los resultados para cada material:

Material	Transición vítrea (Tg)	Cristalización en frío	Temperatura de fusión (Tm)
PLA 100%	62 - 66°C	105	170
PLA 60% + PCL 40%	60 - 62	103	168
PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%	59 - 61	103	170
PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%	55 - 60	107	168
PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%	57 - 60	100	176
PLA 60% + TPS 40%	60 - 65	99	170

Tabla 5.11 Resultados DSC de las 6 muestras analizadas

Comparando los resultados vemos que el PLA influye en todas las mezclas, y que ninguna de ellas consigue una diferencia significativa de temperaturas respecto al material base. Todas las transiciones térmicas de las mezclas oscilan cerca de las temperaturas del material base PLA.

Por tanto, se podrán utilizar las temperaturas del PLA base como referencia para procesar el material.

5.1.3. Caracterización por Microscopio Electrónico de Barrido de Emisión de Campo (FESEM)

Con la microscopía se ha comprobado la correcta adhesión entre caras de los diferentes materiales que forman las mezclas.

Además se ha podido comprobar si la inyección de las probetas es correcta o existen zonas sin material o burbujas de aire, que puedan ocasionar una rotura prematura de la muestra.

Con el microscopio se han podido diferenciar fácilmente los tipos y cantidad de materiales que forman el compuesto.

Se han realizado dos estudios diferentes a los 5 tipos de muestra.

En el primero de ellos se ha analizado la superficie de las muestras después de ser sometidas al ensayo de impacto Charpy, y en el segundo se ha sometido a las muestras a un ataque parcial con disolventes.

Con el primer ensayo se puede analizar la cohesión de los materiales y la rotura.

Con el segundo tipo de ensayo se puede analizar el efecto de los disolventes sobre las probetas.

PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%

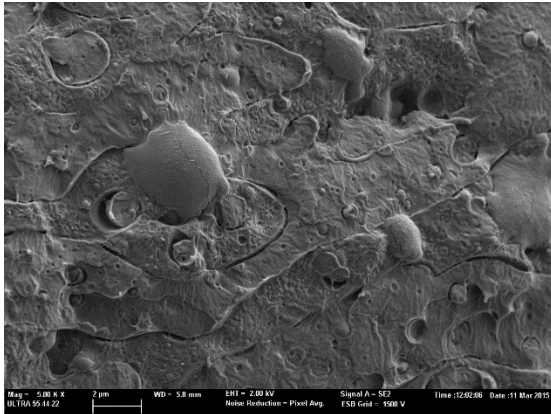


Figura 5.24 Imagen PLA60% + PCL 30% + TPS 10% a 5000 aumentos



Figura 5.25 Imagen PLA60% + PCL 30% + TPS 10% a 10000 aumentos

PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%

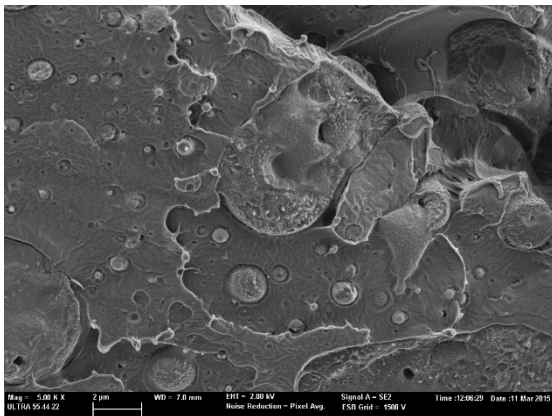


Figura 5.26 Imagen PLA60% + PCL 20% + TPS 20% a 5000 aumentos

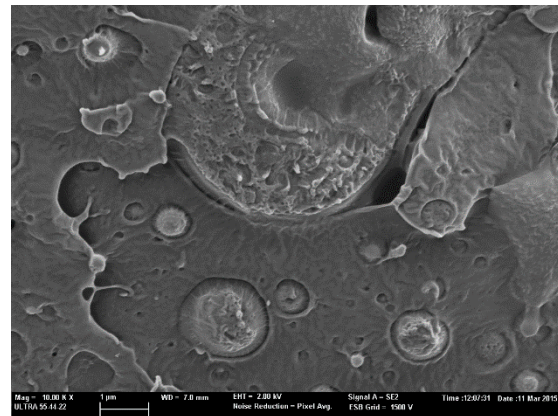


Figura 5.27 Imagen PLA60% + PCL 20% + TPS 20% a 10000 aumentos

PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%

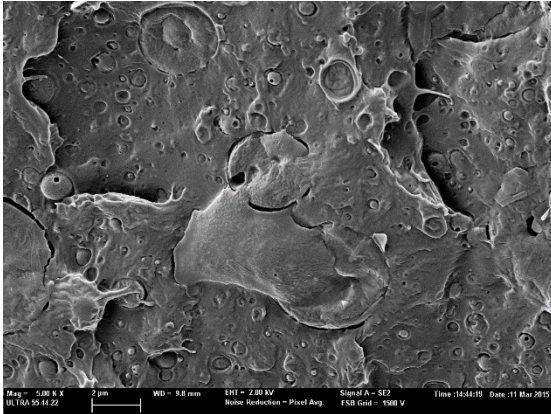


Figura 5.28 Imagen PLA60% + PCL 10% + TPS 30% a 5000 aumentos

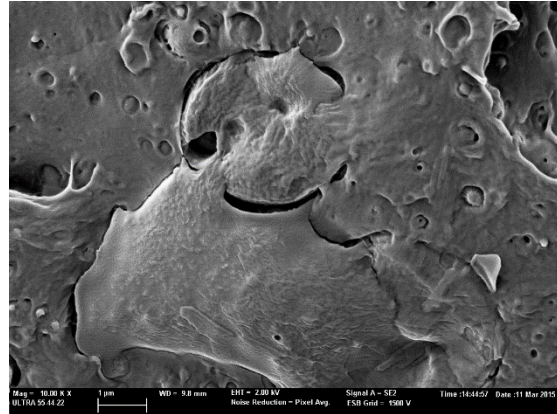


Figura 5.29 Imagen PLA60% + PCL 10% + TPS 30% a 10000 aumentos

PLA 60% + TPS 40%

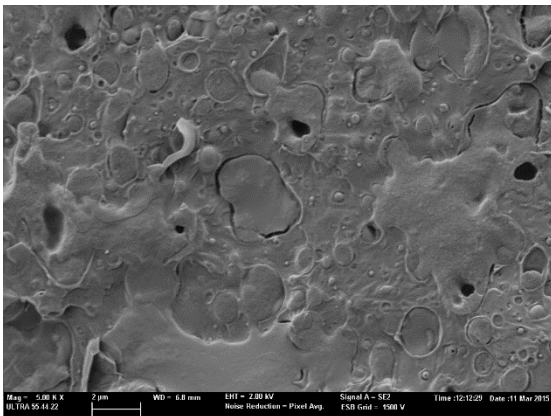


Figura 5.30 Imagen PLA60% + TPS 40% a 5000 aumentos

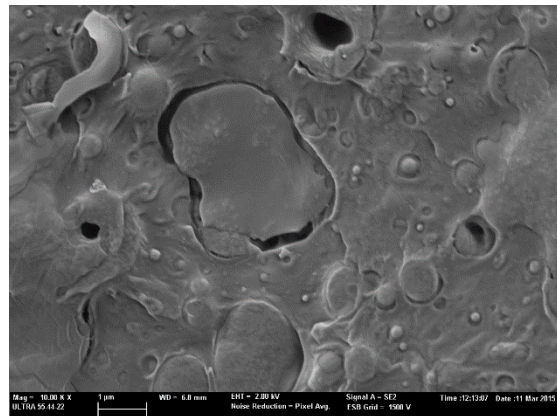


Figura 5.31 Imagen PLA60% + TPS 40% a 10000 aumentos

En primer lugar revisaremos la miscibilidad y cohesión de los materiales.

En las imágenes se muestra claramente que los compuestos son mezclas físicas de materiales y aunque los tres compuestos utilizados son miscibles entre ellos resulta fácil diferenciar los distintos materiales de los que está formada cada muestra.

Como no se le ha añadido ningún compatibilizante, se observa que la interacción entre caras de los materiales es débil dejando algunos espacios en ciertas zonas de la muestra entre ambos materiales.

También observamos pequeñas burbujas de aire y huecos, estos pueden ser ocasionados por varios factores como la falta de miscibilidad o falta de presión en el proceso de inyección.

Seguidamente, se ha realizado un ataque con disolventes sobre todas las mezclas.

PLA 60% + PCL 40%

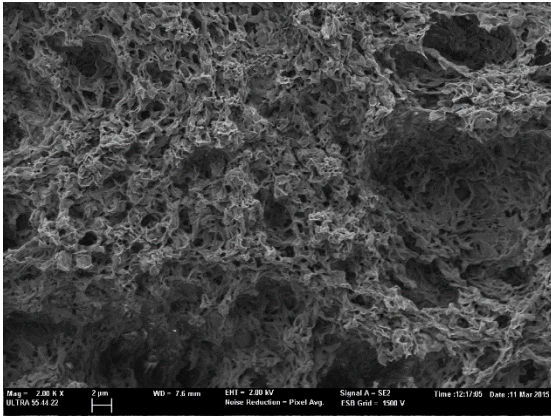


Figura 5.32 Ataque con acetona sobre PLA 60% + PCL 40%, 2000 aumentos

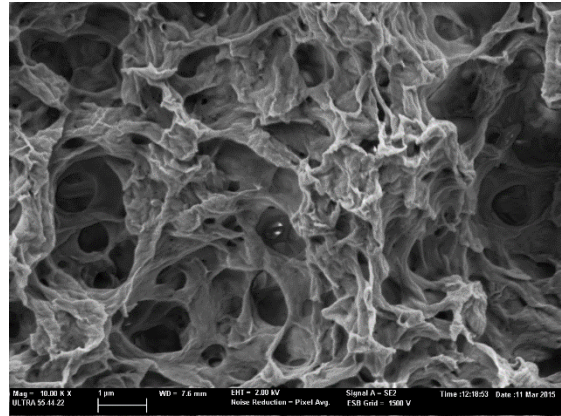


Figura 5.33 Ataque con acetona sobre PLA 60% + PCL 40%, 10000 aumentos

PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%

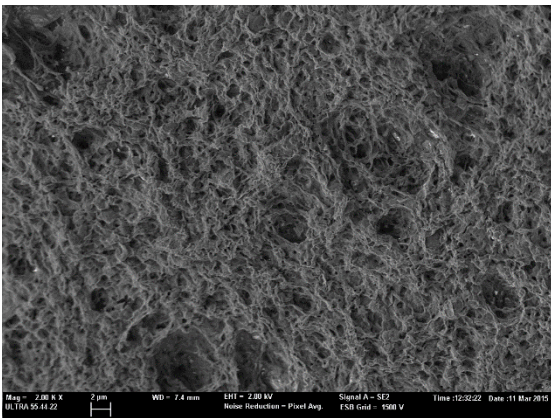


Figura 5.34 Ataque con acetona sobre PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%, 2000 aumentos

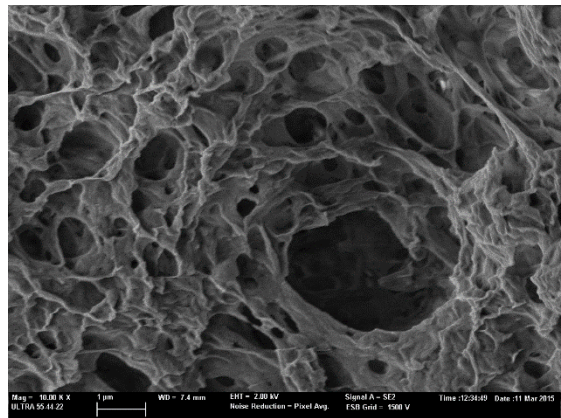


Figura 5.35 Ataque con acetona sobre PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%, 10000 aumentos

PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%

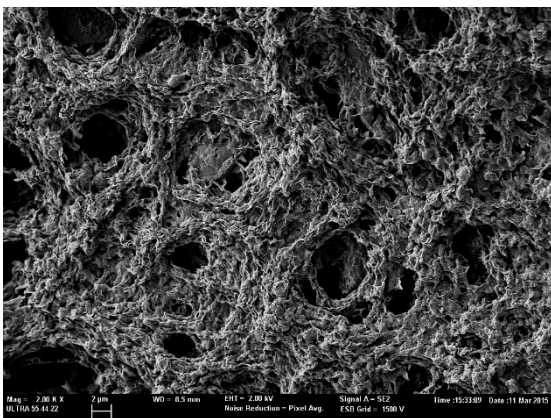


Figura 5.36 Ataque con acetona sobre PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%, 2000 aumentos

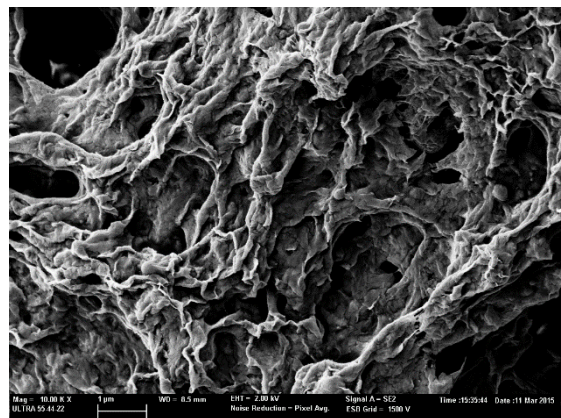


Figura 5.37 Ataque con acetona sobre PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%, 10000 aumentos

PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%

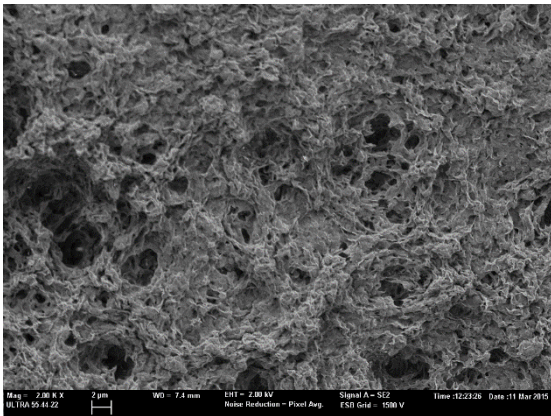


Figura 5.38 Ataque con acetona sobre PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%, 2000 aumentos

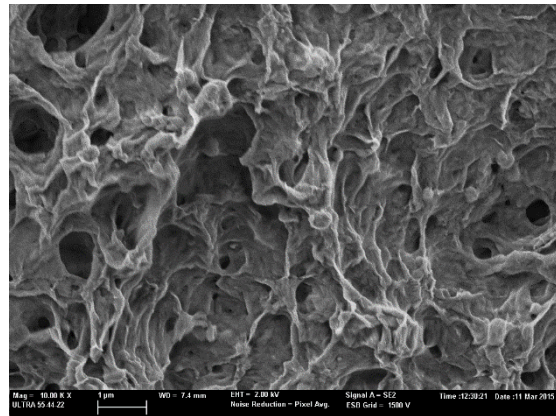


Figura 5.39 Ataque con acetona sobre PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%, 10000 aumentos

PLA 60% + TPS 40%

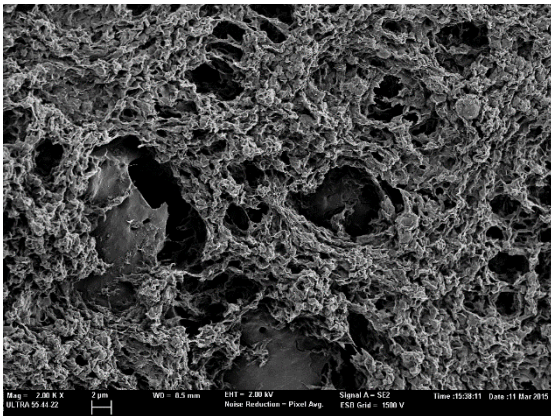


Figura 5.40 Ataque con HCL sobre PLA 60% + TPS 40%, 2000 aumentos

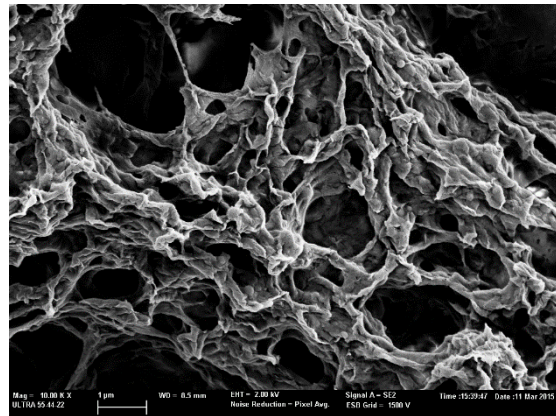


Figura 5.41 Ataque con HCL sobre PLA 60% + TPS 40%, 10000 aumentos

Las muestras que contenían PCL han sido atacadas con acetona mientras que la muestra que contenía el 40% de TPS ha sido atacada con HCL.

En las imágenes se observa que todas las muestras se degradan parcialmente por el ataque de los disolventes debilitando su estructura interna, pero se puede observar que las muestras se ven más afectadas cuanto más cantidad de TPS contienen en su formulación.

5.1.4. Biodegradabilidad

En este apartado del estudio se ha determinado el grado de desintegración de cada mezcla de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un laboratorio siguiendo la norma ISO20200:2006.

Antes de proceder con el ensayo se han fabricado 8 plaquetas de cada mezcla de materiales con las medidas 3 x 3 cm.

Una vez fabricadas las plaquetas se procedió a realizar el ensayo siguiendo el procedimiento establecido por la norma.

En primer lugar se han pesado todas las plaquetas y se han anotado sus pesos iniciales.

Seguidamente se ha preparado el compost en el laboratorio con las cantidades y los ingredientes que marca la norma.

Preparado el compost, se vertió en un recipiente y se colocaron las probetas dentro.

A continuación, se introdujo el recipiente en una estufa a 45°C y se pudo empezar a registrar los resultados.

Para registrar los resultados hubo que seguir las pautas y los tiempos que marca la norma:

- a) El día 1 se pesaron todas las probetas y se lanzó el ensayo
- b) El día 3 se sacó el recipiente de la estufa y se pesó para comprobar el agua que haya perdido. Se sacó la primera plaqueta de cada material y se pesó.
Se repuso el agua que se perdió y se volvió a meter en la estufa.
- c) El séptimo día seguimos el mismo procedimiento que el tercer día, sacamos el recipiente y lo pesamos para comprobar el agua que se perdió durante el ensayo. Se sacó una probeta, la documentamos y la pesamos.
Después de reponer el agua perdida, volvimos a meter el recipiente en la estufa.
- d) El procedimiento anterior se repitió el día 14, se pesó el recipiente, sacamos la tercera muestra de cada material para comprobar su estado y su peso.
Se repuso el agua perdida y se volvió a introducir el recipiente en la estufa.
- e) Repitiendo el proceso, el día 21 se sacó el recipiente y se secó para comprobar el agua que pudo haber perdido.
Se sacó la cuarta plaqueta de cada material y se comprobó su peso y su estado.
Se rellenó el agua del recipiente y lo introdujimos de nuevo en la estufa.
- f) El día 28 repetimos el proceso de los últimos días, y se comprobó que todas las muestras se habían degradado por completo.

Ordenando las placas en orden cronológico se aprecia claramente el ciclo de degradación de cada blend utilizado en el estudio.


















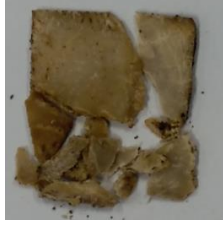





Material.	Día 3	Día 7	Día 14	Día 21
PLA				Degradada
PLA 60% + PCL 40%				
PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%				
PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%				
PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%				
PLA 60% + TPS 40%				

Tabla 5.12 Ciclo de Biodegradabilidad

Con las imágenes de la Tabla 5.12 se muestra claramente el ciclo de vida de los materiales utilizados en el trabajo y sometidos al ensayo de biodegradabilidad.

Como complemento a las imágenes, los pesos de las muestras nos mostrarán la cantidad de masa perdida durante el transcurso del ensayo:

Material	Peso Día 1	Peso Día 3	Peso Día 7	Peso Día 14	Peso Día 21
PLA	0.741	0.738	1.11	0.848	Degradada
PLA 60% + PCL 40%	0.53	0.528	0.587	0.454	0.129
PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%	0.773	0.758	0.941	0.782	0.250
PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%	0.532	0.524	0.590	0.423	0.077
PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%	0.67	0.657	0.820	0.384	0.181
PLA 60% + TPS 40%	0.71	0.677	0.719	0.405	0.436

Tabla 5.13 Histórico de los pesos de las muestras

Pesos iniciales de las muestras:

Material	Probeta Día 3	Probeta Día 7	Probeta Día 14	Probeta Día 21
PLA	0.741	1	1.08	0.684
PLA 60% + PCL 40%	0.53	0.591	0.64	0.629
PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%	0.773	0.949	0.936	0.936
PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%	0.532	0.591	0.631	0.747
PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%	0.67	0.844	0.602	0.705
PLA 60% + TPS 40%	0.71	0.867	0.616	1.02

Tabla 5.14 Pesos iniciales de las muestras

Analizando las imágenes se observa que todas las muestras se han degradado completamente como máximo en un periodo de 28 días.

La muestra más susceptible a la degradación ha sido la fabricada con PLA virgen. La plaqueta de PLA mostraba claramente los efectos de la degradación al día 14 de ensayo donde la muestra perdió un 21.5% de su peso, y además se encontraba fragmentada en múltiples trozos, que acelerarían aún más el proceso de degradación.

De forma general, se puede decir que las probetas no sufrieron los efectos de la degradación de forma evidente durante la primera semana de ensayo (días 3 y 7). Durante estos días las probetas perdieron una pequeña cantidad de masa pero físicamente no sufrieron muchos cambios, ya que conservaban su forma y su color inicial.

En la segunda semana de ensayo, más concretamente al día 14 desde que se lanzara el ensayo se procedió a realizar la 3ª extracción de muestras. En esta tercera extracción ya se pueden ver

claros signos de degradación en las muestras, la muestra de PLA está totalmente fragmentada al igual que las muestras de “PLA 60% + PCL 20% + TPS 20%” y “PLA 60% + PCL 10% + TPS 30%” que han perdido un 33 y 36% de su masa respectivamente. También se muestran signos evidentes de degradación en el blend que contiene 40% de TPS que se ha fragmentado en dos grandes trozos.

Por otra parte, las mezclas de “PLA 60% + PCL 40%” y “PLA 60% + PCL 30% + TPS 10%” son las menos afectadas, aunque se puede comprobar a simple vista que ambas muestras han perdido masa (un 29% el PLA 60% + PCL 40%, y un 16% la muestra de PLA 60% + PCL 30% + TPS10%), que han empezado a agrietarse y su color ha envejecido.

En la cuarta extracción realizada el día 21 de la tercera semana de ensayo nos encontramos con que la muestra referencia de PLA ya se ha degradado completamente y las muestras restantes, se encuentran totalmente fragmentadas con una evidente pérdida de peso y un gran deterioro en el color de las muestras.

Finalmente, en la cuarta semana de ensayo nos encontramos con que todas las muestras de las diferentes mezclas se han degradado completamente.

Como conclusión, se puede decir que el PLA con un ciclo de degradabilidad de 21 días, es el material que más sufre los efectos de la degradabilidad y antes desaparece en el medio.

Por otra parte, diremos que añadiendo ciertos porcentajes de PCL y TPS al PLA virgen se alarga el ciclo de degradabilidad del material en una semana, con una duración total de 28 días.

6. Selección de Material

Para seleccionar el material adecuado que formará la cubertería se han analizado los resultados obtenidos en los distintos ensayos y se ha seleccionado el que presenta las propiedades más adecuadas para fabricar cubertería desechable.

- **Caracterización mecánica**

Empezando por el ensayo de tracción vemos que de los blends, el material que más fuerza soporta y más resistencia presenta al ensayo de tracción es el PLA 60% + PCL 40% contando además con un módulo de elasticidad bastante alto, solo superado por el PLA60% + TPS 40%.

En el ensayo de flexión, todos los materiales muestran propiedades similares, pero vuelve a ser el PLA 60% + PCL 40% el que mejores propiedades presenta aunque por un estrecho margen.

En la Dureza Shore D, se muestran resultados similares nuevamente entre todos los materiales, pero en este caso se muestra una tendencia al incremento de la dureza conforme se aumenta el contenido de TPS en la mezcla.

Seguidamente, de los datos extraídos en el ensayo de impacto se observa que el material que mejor absorbe los impactos súbitos es de nuevo el PLA 60% + PCL 40%, esto es debido a que el PLA es más elástico y más deformable que el TPS, que como vemos es el material que menos fuerza de impacto resiste.

Comparando todas las características mecánicas, se puede decir que el material que cumple mejor las exigencias del producto es el compuesto de PLA60% + PCL40%, ya que para las aplicaciones de cubertería desechables se necesitará un material que resista sobre todo esfuerzos de flexión, y que tenga un buen módulo elástico.

- **Caracterización térmica**

En la caracterización térmica, se observa en los ensayos de DSC y TGA que todos los compuestos tienen unas temperaturas de fusión y degradación similares, y por tanto no se puede destacar ningún material frente a otro.

Lo mismo ocurre en el ensayo de reblandecimiento HDT, donde todos los materiales tienen una temperatura HDT de 46°C diferenciándose únicamente por décimas de grado.

Por otra parte, en la temperatura de reblandecimiento VICAT sí que se observan diferencias mayores de temperatura que en el HDT. En esta prueba se observa una tendencia decreciente conforme se aumenta la cantidad de TPS de la muestra y se disminuye el PCL. Aunque el material que mejor soporta la penetración es el PLA virgen (es el material más rígido), el compuesto que mejor soporta la deformación es el PLA 60% + PCL 40% con 51.2°C respecto a los 47.4°C del PLA 60% + TPS 40%, mientras que los compuestos ternarios se mantienen en valores comprendidos entre estas dos temperaturas.

- **FESEM**

En la microscopía, se puede afirmar que los compuestos con valores más altos de PCL soportan mejor el ataque de los disolventes. Por tanto, en este apartado serían válidos los compuestos con 40% y 30% de PCL en la mezcla.

- **Biodegradabilidad**

Por último en la biodegradabilidad no habría diferencias entre materiales, ya que todos los compuestos, independientemente de sus componentes, se degradan a los 28 días.

Así que debido a sus características mecánicas fundamentalmente y a su buen comportamiento a la temperatura y a la biodegradabilidad, el material elegido para fabricar nuestros cubiertos ha sido el **PLA 60% + PCL 40%**

7. Diseño de las piezas de cubertería

En el apartado de diseño del trabajo se han elaborado los diseños de las piezas de cubertería que se utilizarán.

Como se busca un producto que destaque principalmente por sus cualidades biodegradables y que sea lo más económicamente posible, se han realizado los diseños de los cubiertos buscando la economía y sacrificando más el diseño y el color de las piezas.

En el diseño se han intentado optimizar los espesores de las piezas para que tengan el material necesario y la resistencia justa para soportar los esfuerzos realizados en las comidas.

Como se comprobará en los siguientes apartados, se ha realizado un diseño de cubierto básico basado en el estilo de los cubiertos desechables de PS blanco donde se busca la economía y la funcionalidad por encima del diseño.

7.1. Diseño de los cubiertos en SolidWorks

Para el diseño de los cubiertos se ha utilizado el programa de modelado SolidWorks, que nos ha permitido crear las piezas en 3D.

El diseño de las piezas de cubertería se ha desarrollado en dos fases.

En primer lugar se ha diseñado un mango base para las tres piezas de cubertería. Con el diseño del mango logramos crear un elemento común que actúa como nexo de unión entre las piezas y que se muestra como un sello característico de la línea de cubertería desechable que los diferenciará de los demás productos de cubertería desechable del mercado.

La segunda etapa del diseño ha consistido en crear los tres cabezales distintos para cada tipo de cubierto partiendo del mango base que se ha diseñado anteriormente.

Al igual que ocurre con el mango, los cabezales se han diseñado pensando en la optimización del material y la funcionalidad de estos. Por ello se han optimizado los espesores en los lugares que lo permitían y se han reforzado los lugares que presentaban mayor acumulación de tensiones.

7.1.1. Diseño del mango

Como ya hemos mencionado anteriormente, se ha creado un mango que sirve como base para los tres tipos de cubiertos. Este mango tiene un diseño sencillo y robusto que permitirá optimizar la cantidad de material utilizado y que garantizará la resistencia necesaria para soportar los esfuerzos ocasionados por el uso de los cubiertos.

Para la realización del mango nos hemos basado en los diseños de cubertería clásica desechable.

Lo primero que se fijó fue la longitud total que tendría el cubierto, para ello se midieron distintos modelos de cubiertos desechables que se pueden encontrar en el mercado y se consultaron webs de venta de menaje desechable. Recopilada la información se observó que la mayoría de cubertería monouso tenía una longitud máxima de 170 mm.

Dando una longitud de entre 100 y 110mm a los mangos y sobre 50 mm a los cabezales.

Para nuestro diseño se decidió dar una longitud al mango de 110mm, en primer lugar basándonos en los antecedentes que encontramos en el mercado, pero la razón principal es

que se buscó un tamaño que permitiera un buen agarre que facilitara su uso, sin añadir un exceso de material innecesario para este tipo de cubiertos.

Como se observa en la Figura [7.1] el mango cuenta con todas sus caras planas, y con una sección que disminuye a medida que se acerca al cabezal. Además se ha aplicado un vaciado en sus caras superior e inferior.

La razón por la cual el mango cuenta con todas sus caras planas y no redondeadas es simplemente crear más superficie de presión y de agarre para la mano, asegurando así que el utensilio no se resbalará y además se ejercerá la presión adecuada, además las aristas evitarán que el cubierto pueda girar sobre sí mismo.

Por otra parte, la sección disminuye 1mm en la zona del cabezal para que los dedos al ejercer presión deslicen ligeramente hacia delante y la fuerza se aplique correctamente sobre el cabezal del cubierto.

El vaciado de 1mm además de crear un pequeño escalón que mejora el agarre, sirve fundamentalmente para disminuir la cantidad de material del mango. La razón de aplicar un vaciado de 1mm, es que se ha comprobado en la simulación de elementos finitos que aguanta la presión suficiente con un espesor de 1mm y permite una buena inyección.

Para finalizar, como se observa en la Figura [7.1] el mango termina con una forma redondeada.

La razón de redondear el extremo es la de crear una superficie cómoda al tacto evitando cantos y aristas que pudieran hacer daño en la palma de la mano.

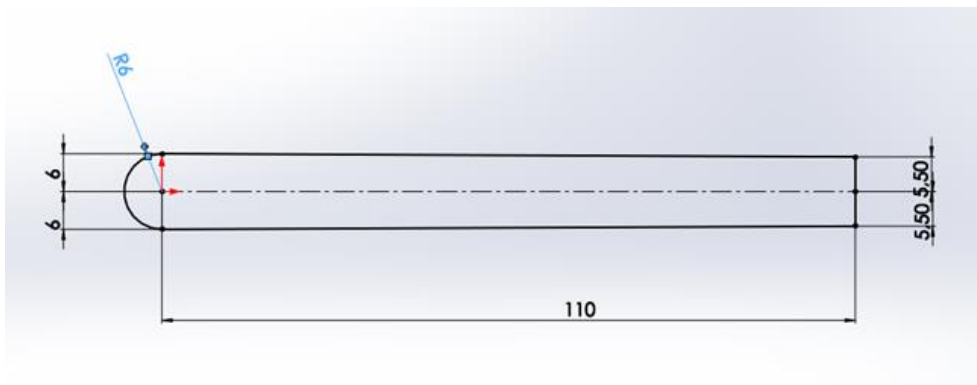


Figura 7.1 Croquis del mango

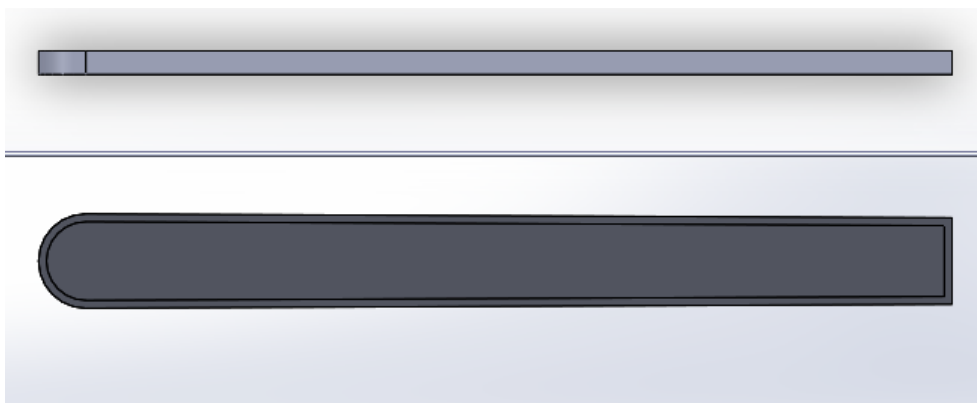


Figura 7.2 Diseño final del mango

7.1.2. Diseño del cuchillo

Para el diseño de la hoja del cuchillo se ha partido de la longitud elegida anteriormente de 50mm para los cabezales de los cubiertos. Con una hoja de 50mm se obtiene una longitud suficiente para un cuchillo desechable.

Se ha buscado un espesor de hoja suficiente para aguantar los esfuerzos producidos en el corte y se ha intentado optimizar este espesor para utilizar la cantidad de material justa de material.

Con la ayuda de software de cálculo por elementos finitos se ha comprobado que un espesor de 1mm de hoja es suficiente para aguantar los esfuerzos de corte, que en este caso generan una fuerza de 10N.

Seguidamente se ha comprobado con el software de simulación de inyección que un espesor de 1mm de hoja no da problemas de llenado en la inyección, por tanto se ha decidido aplicar este espesor a la hoja.

Con el espesor y la longitud del cabezal definidos, se ha empezado a diseñar la forma de la hoja.

Para el perfil de la hoja se han comparado varios modelos de cuchillos desechables disponibles en el mercado. Después de realizar la búsqueda nos hemos dado cuenta de que hay dos tendencias básicas en el mercado, los cuchillos con filos rectos y los cuchillos con filos curvos.

Los perfiles rectos provocan un corte más agresivo y tienen un diseño más simple, pero en su contra provocan acumulaciones de tensiones muy severas en sus aristas que pueden provocar que se supere el límite elástico del material y el cuchillo se deforme o incluso se rompa.

Por otra parte, aunque los cuchillos redondeados no son tan eficientes en el corte, su forma redondeada ayuda a distribuir mejor las tensiones y permite que se le pueda aplicar más fuerza al cuchillo.

Por tanto se decide fabricar un diseño curvo de 1mm de espesor.

Seguidamente, se observa que una hoja de 1mm se puede doblar con facilidad si se aplica una fuerza lateral, y que se genera una gran acumulación de tensiones en la intersección con el mango ya que tenemos un cambio de espesor muy severo y unos ángulos rectos muy agresivos. Esta fuerza lateral puede provocar que la hoja se rompa con relativa facilidad por la intersección entre el mango y la hoja.

Para evitar esta acumulación de tensiones y darle más rigidez a la pieza, se decide crear un nervio que una el mango con la hoja y que le dé más rigidez a la pieza.

Con el nervio conseguimos en primer lugar disminuir la sección de 3mm del mango a 1mm de la hoja de forma progresiva. Además se otorga más rigidez a la hoja y se consiguen distribuir mejor las tensiones provocadas por el corte.

Con todos los datos anteriores tomados en cuenta se obtiene el diseño final del cuchillo mostrado en la Figura [7.3].

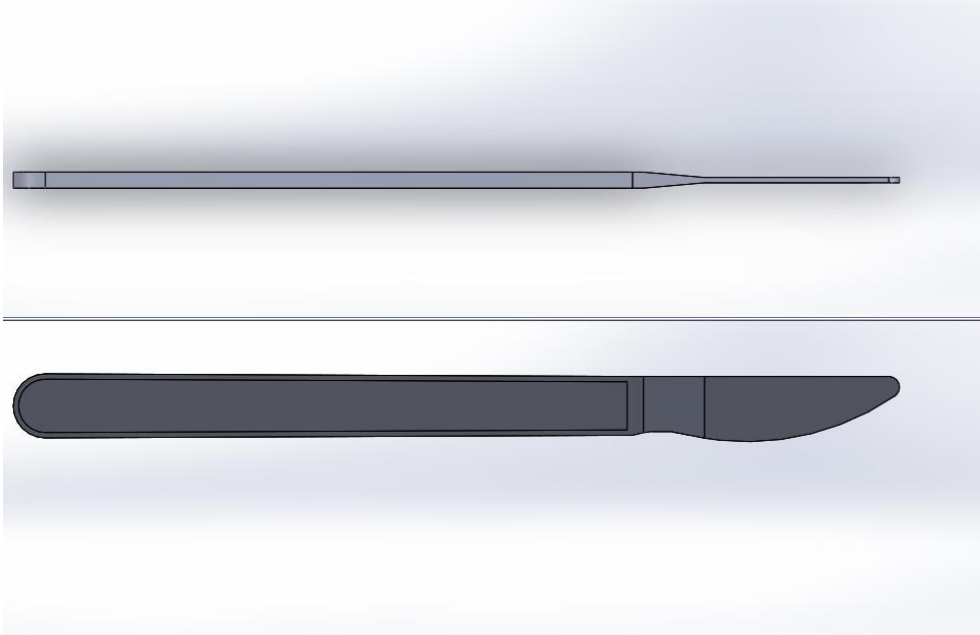


Figura 7.3 Diseño final del cuchillo

A continuación, en la Figura [7.5] se pueden observar las medidas básicas utilizadas para el diseño del cuchillo.

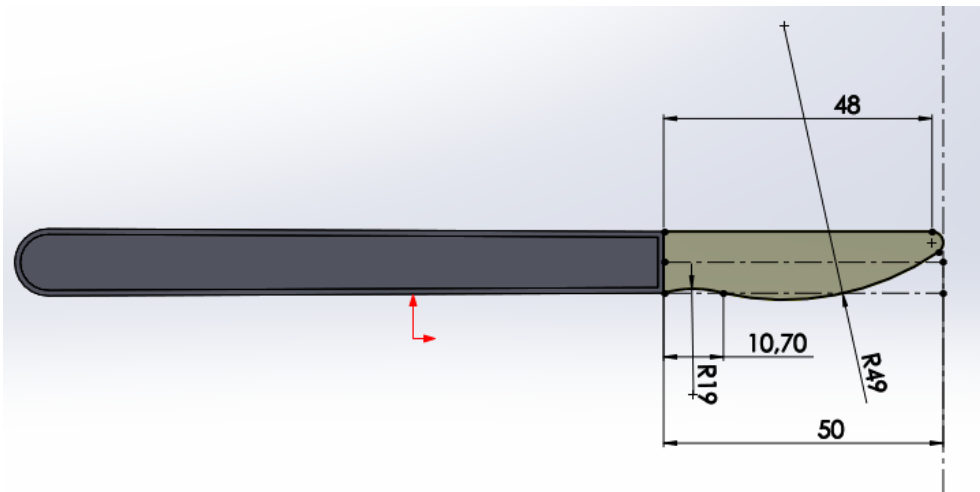


Figura 7.4 Medidas básicas del cuchillo

Para finalizar el cuchillo se le añaden al diseño los dientes de sierra que provocarán el corte a lo largo del filo del cuchillo.

Para el diseño de los dientes de sierra se decide por una forma de diente semicircular con un espesor de diente de 0.5mm.

En la Figura [7.5] podemos observar la forma final de los dientes, y como se integran en el diseño del cuchillo.

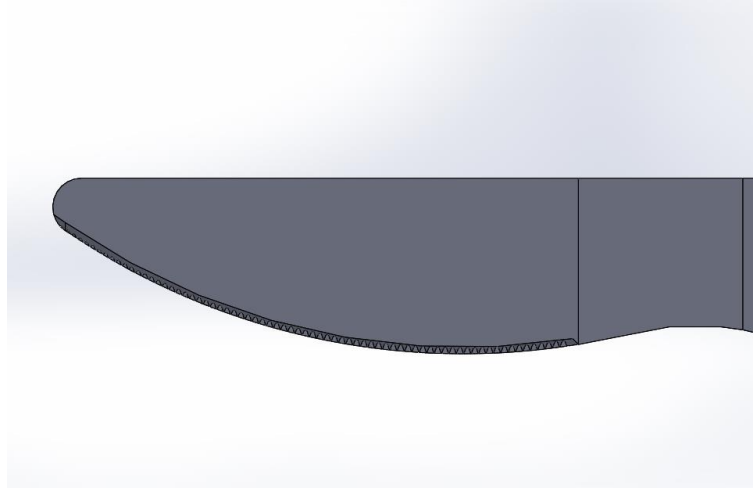


Figura 7.5 Diseño de los dientes de sierra del cuchillo

7.1.3. Diseño de la cuchara

Al igual que se ha hecho con el cuchillo, para que la longitud total del cubierto sea de 160mm, se determina que el cabezal de la cuchara medirá 50mm de longitud.

Actualmente existen múltiples modelos y formas para las cucharas, pero muchos de estos cabezales sacrifican la funcionalidad por un diseño atractivo, lo que provoca que no sean prácticos y que muchos de ellos no se ajusten bien a las medidas y forma de la boca. Para evitar el problema de la practicidad y utilidad, el diseño de la cuchara se ha basado en la forma clásica de las cucharas, con una forma ovalada que se va estrechando gradualmente hasta llegar al radio mínimo situado en el extremo.

En la Figura [7.6] se puede observar la forma clásica del cabezal y las medidas básicas que lo conforman.

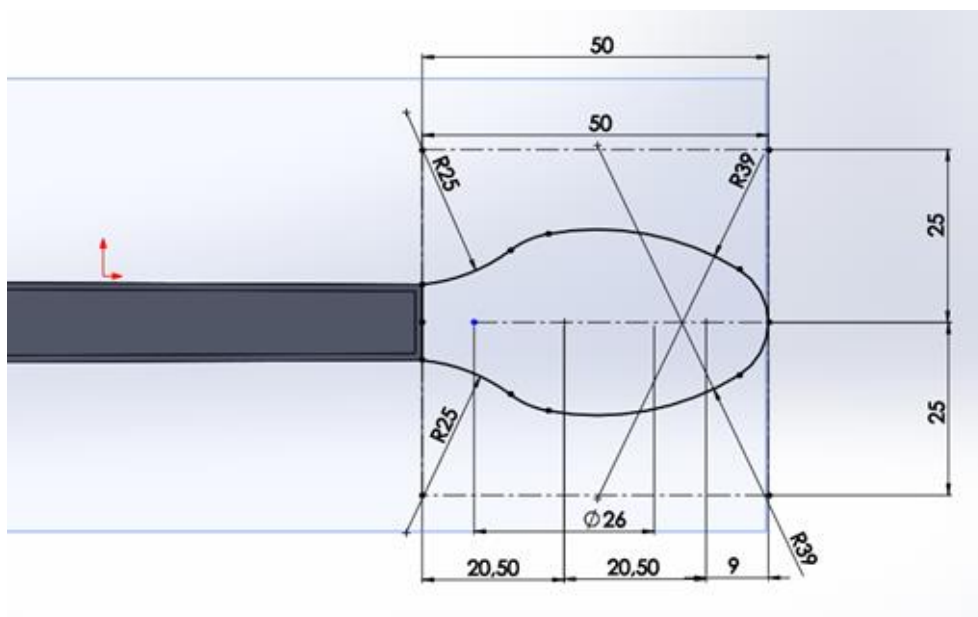


Figura 7.6 Medidas básicas de la cuchara

A continuación, se observó que si el cabezal queda plano en la misma horizontal que el mango, el uso de la cuchara puede resultar incómodo ya que se fuerza la muñeca. Por tanto se decidió dar cierta inclinación al cabezal mejorando el agarre y el uso del cubierto.

El último detalle que se diseñó fue el ancho máximo que tendría el cubierto. Para ello nos basamos en los diseños que existen en el mercado para la cubertería desechable, que como se puede observar son más pequeños y compactos que los cabezales fabricados en acero. Esto se produce porque un cabezal muy ancho tiene mucha superficie de contacto y las fuerzas que soporta son mayores. Esas fuerzas no son ningún problema para los cubiertos de acero, pero puede provocar que el material plástico supere el límite elástico y se rompa con mucha facilidad.

Teniendo en cuenta las problemáticas que puede haber, se decide diseñar un cabezal con un ancho máximo de 30mm y una forma compacta, que sea suficiente para realizar las funciones de una cuchara correctamente y que soporte mejor las cargas que un cabezal más ancho.

Otro detalle característico de nuestra cuchara, como se puede observar en la Figura [7.7] es que todo el borde de la cuchara no se encuentra al mismo nivel, y que justo en el extremo del cabezal se produce un rebaje que provoca que la forma ovalada no sea tan acusada. Este cambio de sección se debe a que se ha observado que como el tamaño de las cucharas desechables es menor que los cubiertos de acero no suelen ajustarse a las medidas de la boca y pueden llegar a ser incómodas cuando se usan. Con este cambio de sección, los labios se ajustan mejor al perfil de la cuchara, se pierde capacidad de carga pero se mejora su uso y la comodidad del cubierto.

Finalmente, siguiendo las directrices anteriores se realiza el diseño de la cuchara como se puede observar en la Figura [7.7].

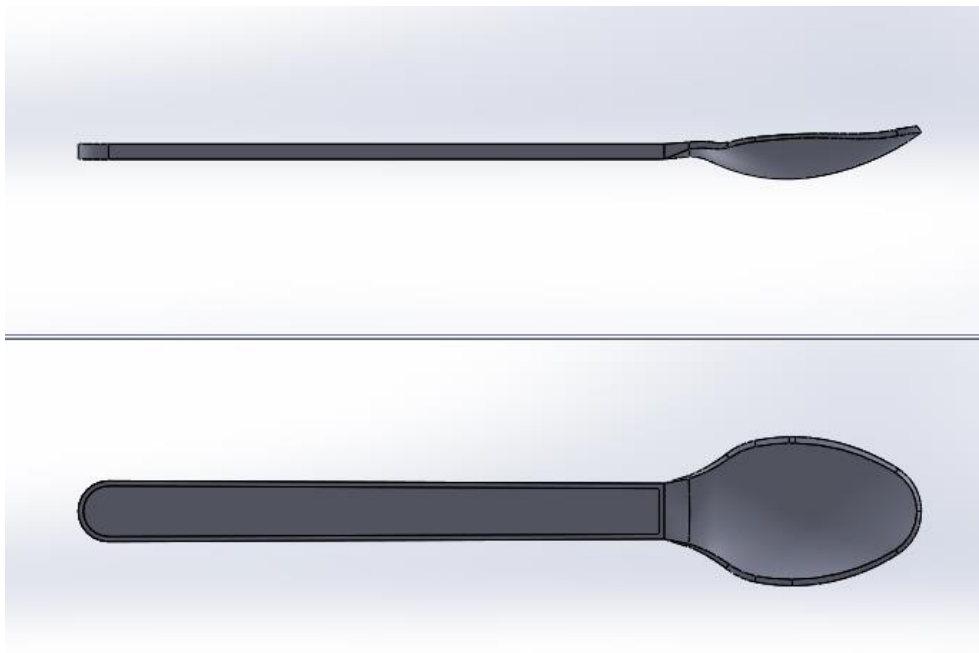


Figura 7.7 Diseño final de la cuchara

7.1.4. Diseño del tenedor

En el tenedor se utilizan las mismas medidas de referencia que se han utilizado anteriormente en las demás piezas de cubertería, dando una longitud de cabezal de 50mm se consigue que todas las piezas tengan una longitud total de 160mm.

Para el cabezal se ha diseñado una forma clásica de cuatro puntas con cierta inclinación respecto al mango para mejorar la presión sobre el cubierto y mejorar su uso.

Como se puede observar en la Figura [7.8] todo el conjunto del cabezal tiene formas curvas para que las puntas se claven con mayor facilidad en la comida. En los laterales del cubierto también se ha optado por formas curvas en vez de líneas rectas para aumentar la superficie de la herramienta en contacto con la comida.

En la Figura [7.8] podemos observar las medidas básicas del tenedor.

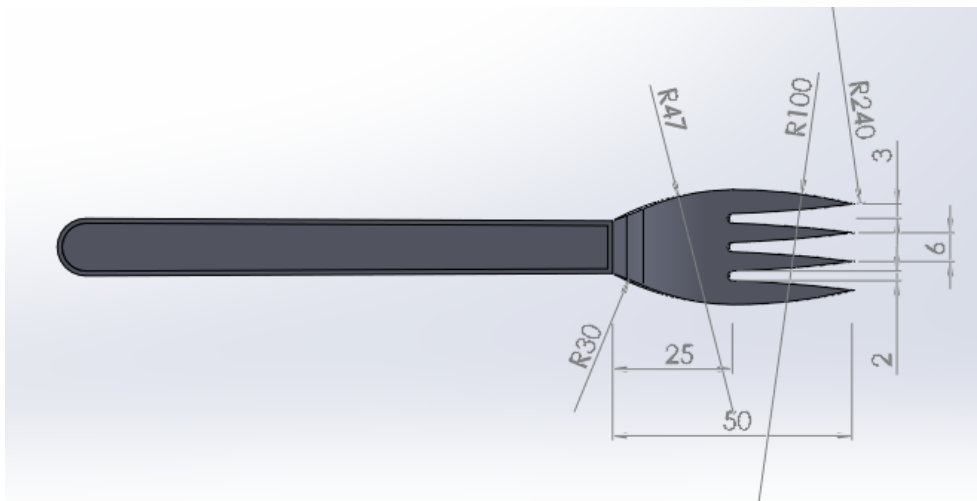


Figura 7.8 Medidas básicas del tenedor

Para finalizar el tenedor se ha realizado un vaciado de 1.5mm en la cara posterior del cabezal para disminuir la cantidad de material del cubierto sin poner en riesgo su resistencia a la presión. El vaciado se puede observar en la Figura [7.9].

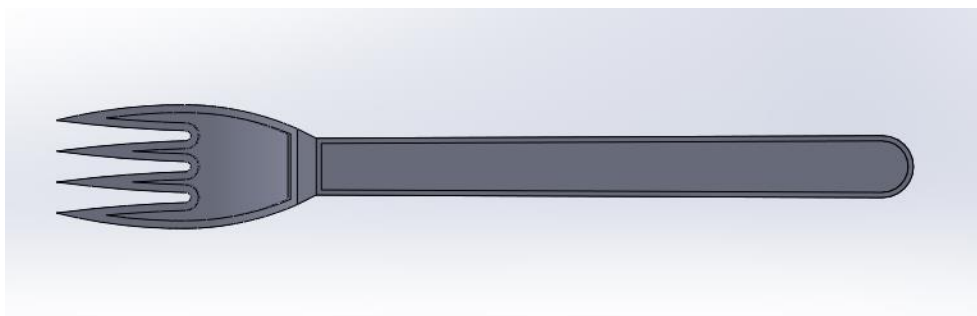


Figura 7.9 Cara posterior del tenedor con vaciado de 1.5mm

Finalmente podemos observar la forma definitiva del tenedor en la Figura [7.10]

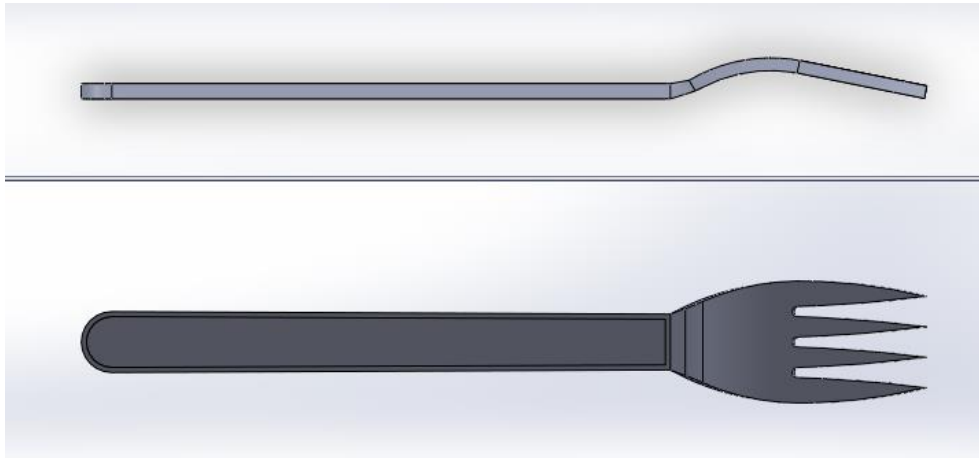


Figura 7.10 Forma definitiva del tenedor

8. Simulación por elementos finitos Ansys

Con el estudio realizado en Ansys se ha podido comprobar si el material soporta los esfuerzos a los que se verá sometido durante su uso.

Con el programa se ha obtenido la deformación máxima y las tensiones máximas a las que se verán sometidos los materiales.

Antes de simular los esfuerzos se han incorporado los datos necesarios de nuestro material a la base de datos del programa:

Módulo de Young (MPa)	2327
Coefficiente de Poisson	0.3
Densidad (g/cm³)	1.15
Límite elástico (MPa)	35
Tensión máxima (MPa)	38

Tabla 8.1 Características principales del PLA 60% + PCL 40%

Con los datos anteriores se ha creado un material en la biblioteca de Ansys que se ha utilizado en la simulación de los tres modelos de cubertería. En este caso se ha creado un material denominado PLA60%/PCL40%.

Para realizar el estudio se siguen unas fases concretas y comunes para todos los materiales:

- 1- **Preparación del modelo:** En esta fase se importa el modelo desde SolidWorks, se selecciona el material que lo compone y por último se malla el modelo para poder realizar las simulaciones.
- 2- **Aplicación de cargas:** En esta fase se aplican al modelo todas las fuerzas externas que actúen sobre él.
- 3- **Análisis de resultados:** El último paso para completar el análisis será calcular y analizar los resultados que se requieran, en este caso se analizan las deformaciones y las tensiones máximas.

Seguidamente se procede a analizar los modelos de cubertería:

8.1. Análisis de esfuerzos del tenedor.

Como se menciona arriba, primero se ha importado el modelo desde SolidWorks, se ha seleccionado el material creado en la base de datos y se malla con una densidad de malla de 2mm.

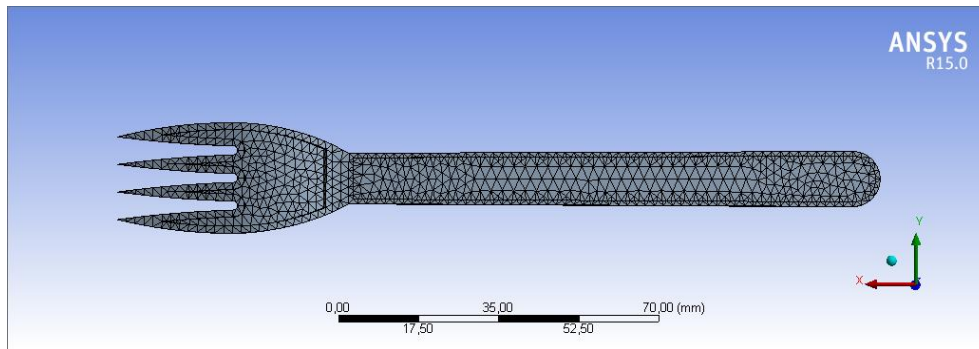


Figura 8.1 Mallado de 2 mm del modelo de tenedor

Seguidamente se han aplicado las cargas al modelo. Se ha seleccionado el mango como elemento de sujeción ya que es en esta parte del cubierto donde la mano realiza el agarre, y para simular los esfuerzos que deberá soportar el tenedor, se ha aplicado una fuerza de 10 N sobre el cabezal del cubierto.

Se ha seleccionado una fuerza de 10 N después de haber comprobado la carga máxima que aguantan diferentes tipos de cubiertos desechables.

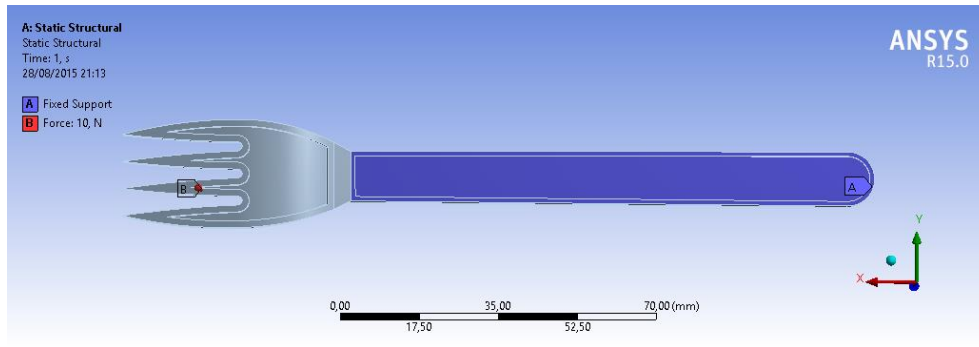


Figura 8.2 Soporte fijo situado en el mango del tenedor

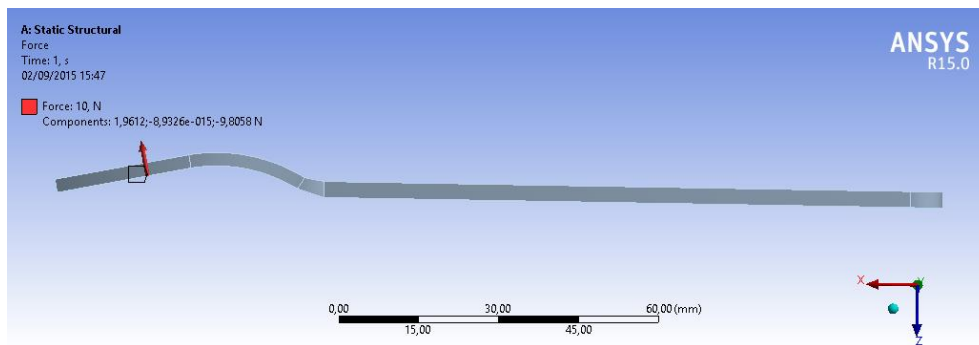


Figura 8.3 Fuerza de 10 N aplicada sobre el cabezal tenedor

Una vez aplicadas las cargas se han analizado los resultados obtenidos en los análisis de tensión y deformación.

Como se puede observar en la Figura [8.4] la máxima tensión alcanzada no supera en ningún caso el límite elástico del material de 35 Mpa, por tanto la pieza sufrirá una deformación correcta y sin causar deformaciones permanentes dentro del límite elástico.

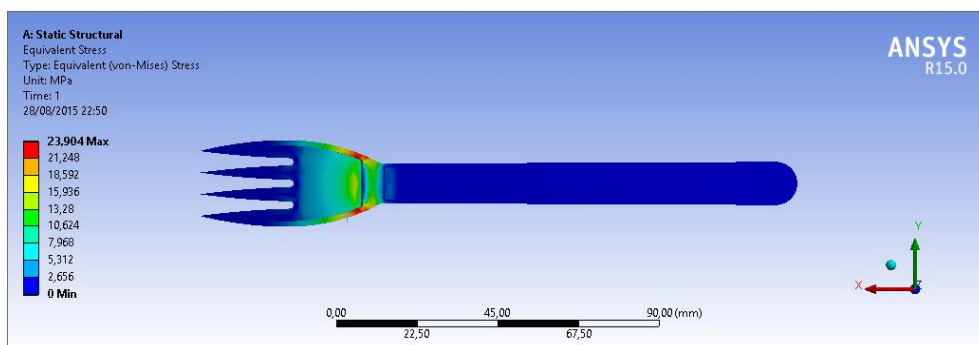


Figura 8.4 Análisis tensión máxima

También se observa que los nervios de unión entre el mango y el cabezal serán las zonas que más tensión sufran de la pieza.

Seguidamente, observamos en la Figura [8.5] que la pieza sufre una deformación máxima de 5.2 mm, una deformación aceptable para tratarse de una pieza de cubertería de plástico desechable.

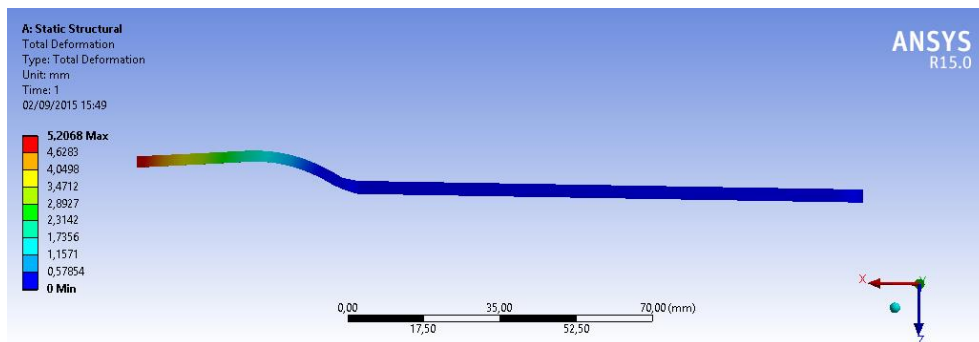


Figura 8.5 Análisis de deformaciones

Podemos añadir que los resultados obtenidos son lógicos, ya que encontramos la máxima deformación en los dientes del tenedor que son la parte más endeble de la pieza y la que está en contacto directo con las fuerzas de aplicación.

8.2. Análisis de esfuerzos de la cuchara

Al igual que hemos hecho con el tenedor, primero se ha importado el modelo de la cuchara desde el SolidWorks.

A continuación, se ha mallado la pieza con una densidad de malla de 2mm y se ha seleccionado el material creado anteriormente como componente principal del cubierto.

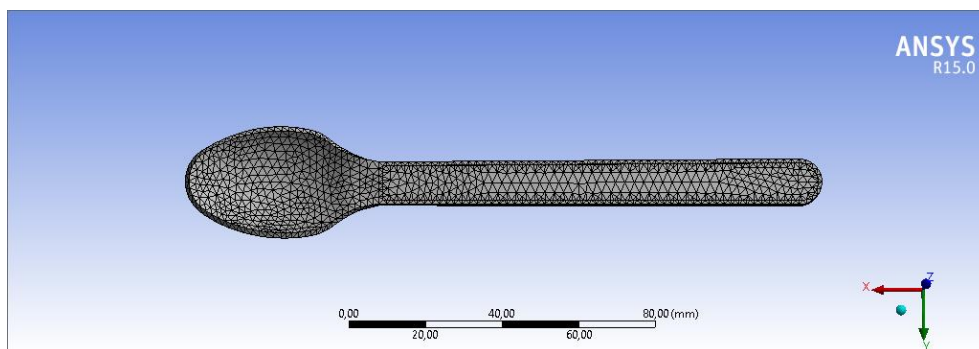


Figura 8.6 Mallado de 2 mm del modelo de la cuchara

Seguidamente, se ha seleccionado el mango como elemento de sujeción y se han aplicado las cargas en el cabezal del cubierto.

En este caso se ha aplicado una fuerza de 7 N sobre el cabezal de la cuchara debido a que por su función y su uso, la cuchara no soporta la misma carga que soporta el tenedor y el cuchillo.

Por su diseño, la cuchara suele ser el elemento más endeble, rompiendo con facilidad cuando se le aplican esfuerzos de flexión elevados.

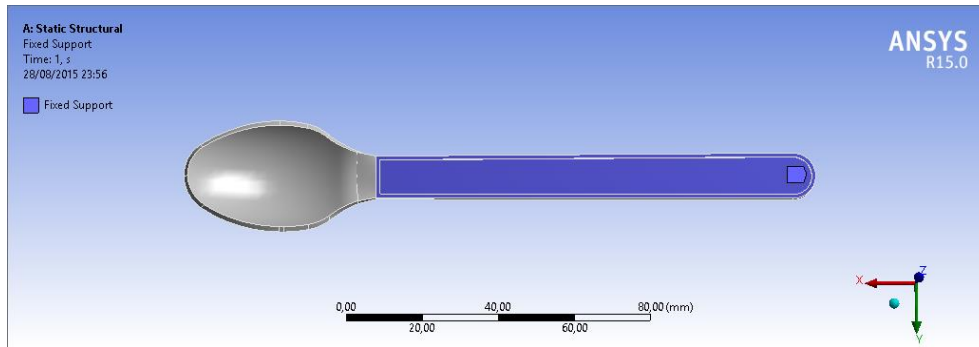


Figura 8.7 Elemento de sujeción situado en el mango de la pieza

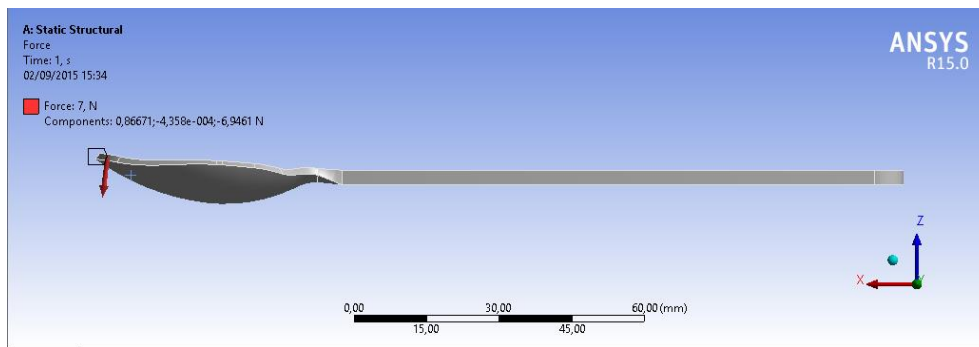


Figura 8.8 Fuerza de 7N aplicada sobre el cabezal de la cuchara

Una vez aplicadas las cargas y las sujeciones a la pieza se ha realizado un análisis de deformaciones y tensiones.

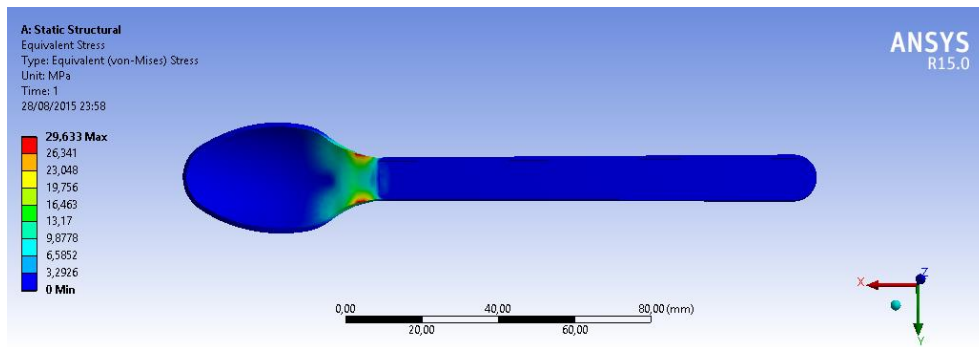


Figura 8.9 Análisis de tensiones

Como se observa en la Figura [8.9] no se supera el límite elástico del material y por tanto la pieza no sufrirá deformaciones permanentes.

Por otra parte, el gráfico muestra que la zona que más tensiones sufre de la pieza es el puente de unión entre el mango y el cabezal, resultado lógico y fácilmente observable en este tipo de piezas de cubertería desechable.

En el apartado de deformaciones, se puede observar que la zona que más se deforma es el cabezal donde se aplica la fuerza de 7 N con una deformación máxima de 3.6mm.

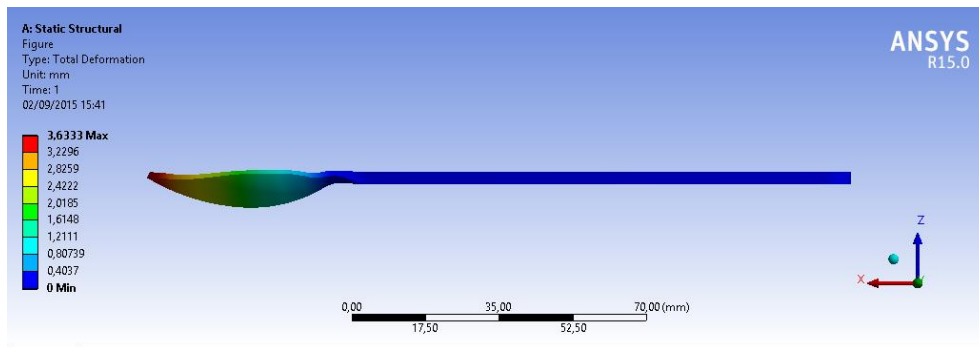


Figura 8.10 Análisis de deformaciones

8.3. Análisis de esfuerzos del cuchillo

Con el cuchillo seguiremos la misma estructura utilizada con las dos piezas de cubertería anteriores.

En primer lugar importamos la pieza desde el SolidWorks al Ansys, seleccionamos el material creado con los datos de nuestro compuesto y mallamos el elemento con una densidad de malla de 2mm.

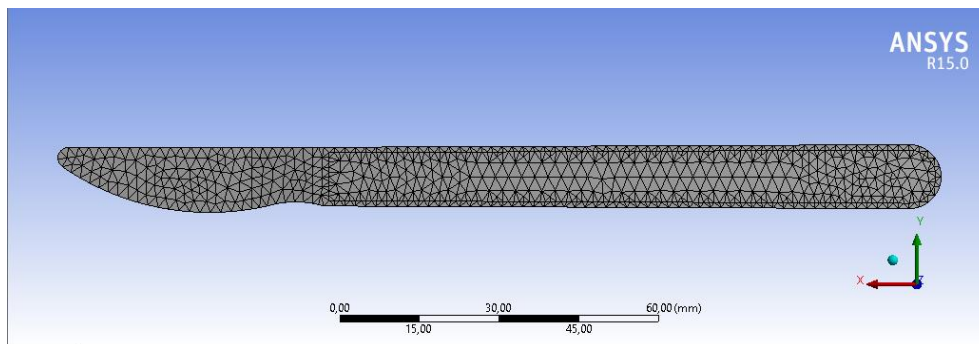


Figura 8.11 Mallado de 2mm del modelo de cuchillo

Como se ha hecho anteriormente, el mango se ha seleccionado como elemento de sujeción y se le ha aplicado una carga de 10 N en el filo del cuchillo con orientación positiva en el eje de las "Y" para simular los esfuerzos producidos en durante el corte.

La razón de utilizar una fuerza de 10 N en el cuchillo es que junto al tenedor, son los dos elementos que más fuerza soportan durante su uso.

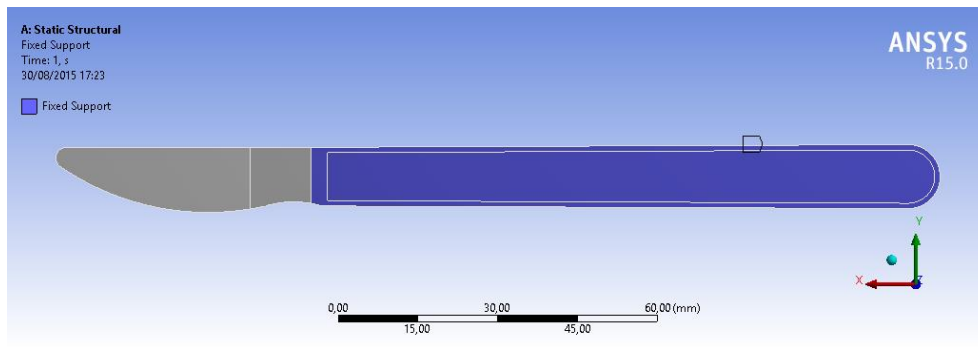


Figura 8.12 Elemento de sujeción situado en el mango de la pieza

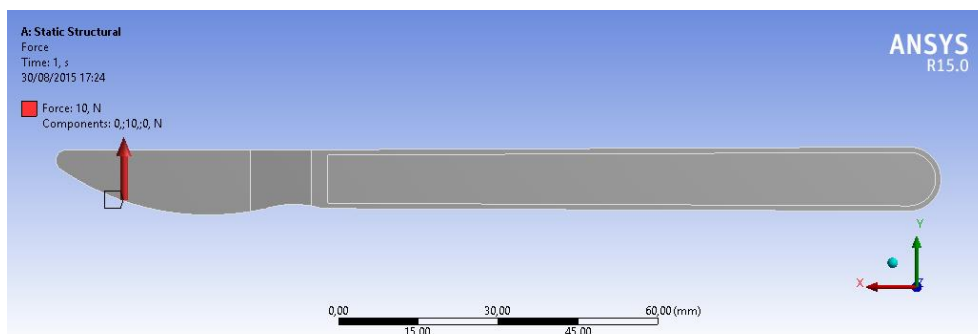


Figura 8.13 Fuerza de 10N situada en el filo del cuchillo

En el análisis de tensiones y deformaciones se obtienen los siguientes resultados:

En la Figura [8.14] referente a las tensiones generadas en la pieza, se observa que en ningún momento se supera el límite elástico de 35Mpa del material, y por tanto el elemento no sufre deformaciones permanentes.

De hecho se observa que las tensiones generadas son más pequeñas que las producidas en el tenedor y la cuchara. Esto es debido al aumento de sección de material en la dirección de las fuerzas ejercidas que provoca que el elemento tenga más resistencia a los esfuerzos y se deforme menos.

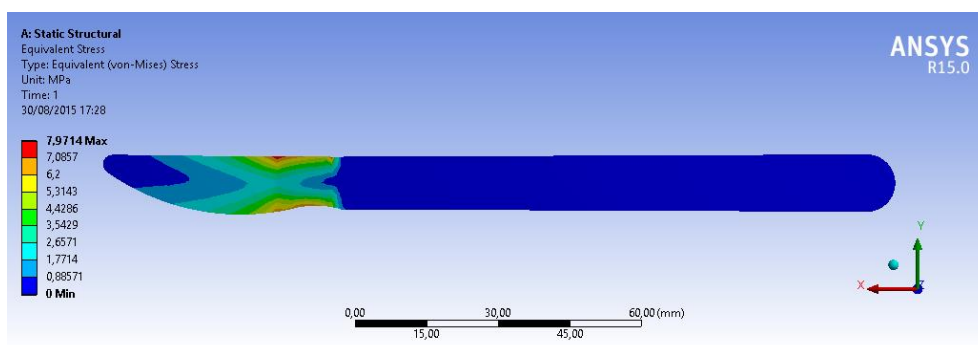


Figura 8.14 Análisis de tensiones

La misma resistencia a los esfuerzos que se observa en la Figura [8.14], se puede observar en la Figura [8.15] que refleja las deformaciones. En esta figura se observa que la deformación en el eje de las fuerzas es menor a la que sufren el tenedor y la cuchara, por la misma razón anterior, al contar con más sección de material la pieza se vuelve más resistente y por tanto se deforma menos.

Como se puede comprobar, en el eje de las “Y” la deformación no alcanzará ni 1mm.

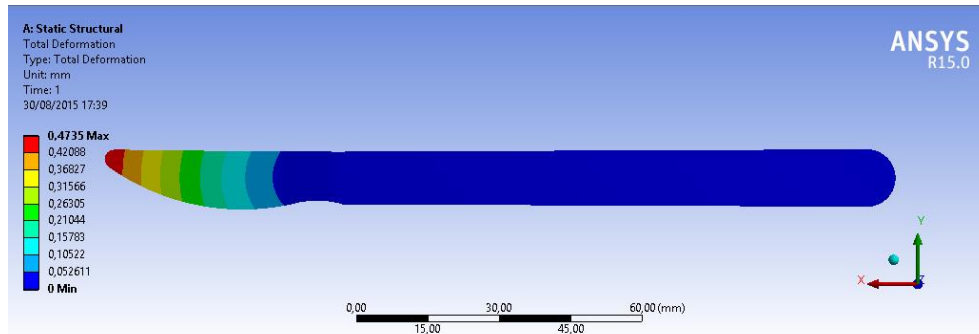


Figura 8.15 Análisis de deformaciones

9. Simulación del proceso de inyección con “MoldFlow”

Con el programa de simulación MoldFlow se ha recreado el flujo de material y el comportamiento que tiene cuando entra en el molde de inyección. Con el software se pueden simular las características del molde y las condiciones de inyección, estos parámetros nos han ayudado a comprender el comportamiento del material cuando se le somete al proceso de inyección.

El objetivo principal que se ha perseguido con la utilización de este programa es encontrar las condiciones óptimas para procesar el material con el mínimo esfuerzo y el menor tiempo posible.

Ajustando estos parámetros al máximo se obtiene un ciclo que aporta el máximo beneficio económico posible para poder crear un producto competitivo en el mercado.

Para poder optimizar el ciclo deberemos seguir una secuenciación de fases concreta:

- 1) **Ventana de Proceso:** Teniendo en cuenta las características del material, del molde y de la máquina de inyección, la ventana mostrará a priori cuales son las mejores condiciones de inyección (tiempo de llenado, temperatura del molde, temperatura de la masa fundida, presión...) para obtener una pieza de máxima calidad.
- 2) **Llenado:** Partiendo de las condiciones obtenidas en la ventana de procesos se ajustará el proceso de llenado para que la pieza se llene correctamente de material en el menor tiempo posible.

- 3) **Compactación:** Se configurará la presión y el tiempo necesarios de compactación para que la pieza una vez extraída del molde no genere contracciones, rechupes ni deformaciones.
- 4) **Refrigeración:** Una vez compactada la pieza se dejará enfriar por el sistema elegido hasta que la temperatura del material este por debajo de su temperatura de reblandecimiento y por tanto se pueda extraer sin miedo a que la pieza se deforme.

Antes de empezar con los análisis, hay que citar que se han realizado dos estudios diferentes con el software "MoldFlow", cada estudio ha utilizado un molde diferente y ambos se han comparado posteriormente para saber cuál de ellos es el más adecuado para realizar el trabajo.

El primer estudio ha utilizado un molde de canales fríos, estos moldes son más económicos y necesitan un ciclo de inyección largo.

En el segundo estudio se ha analizado un molde con cámaras calientes, este tipo de molde produce un ciclo de inyección mucho más corto pero en su contra tiene el factor del precio. Los moldes de cámaras calientes se encarecen mucho debido a que tienen que incorporarse al molde células calefactoras y el diseño se complica bastante más que un molde de canales fríos.

9.1. Molde de canales fríos

El primer paso para realizar el estudio del molde de canales fríos es importar los diseños de los cubiertos en formato STL al programa MoldFlow.

Una vez importados los diseños se han posicionado con la distribución que queramos que tengan en el molde, en este caso se han inyectado doce piezas de cubertería por ciclo de inyección.

El siguiente paso de la fase previa ha sido crear los canales de distribución del material, que tienen las siguientes características:

- Canales: Sección transversal circular, forma no cónica y dimensiones de 5mm de diámetro.
- Bebedero: Forma cónica por ángulo, un diámetro inicial de 4mm y un ángulo de 1.5°
- Ataques: Los ataques cuentan con una sección transversal circular con forma cónica definida por dimensiones finales. Sus medidas son de 5mm de diámetro inicial y 2mm de diámetro final.

Por último, antes de realizar el estudio se ha mallado el conjunto con una densidad de malla de 8mm y una tolerancia de 0.1mm.

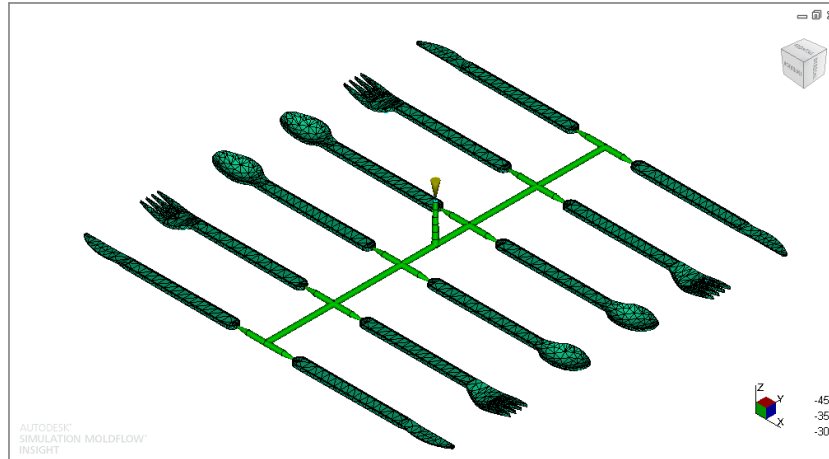


Figura 9.1 Distribución en molde y mallado de 8 mm

Con la distribución de los cubiertos final y los canales de alimentación listos se puede proceder a realizar el estudio siguiendo las fases mencionadas anteriormente.

1- Ventana de procesos

Lo primero que se ha comprobado en la ventana de procesos han sido las condiciones teóricas en las que la pieza inyectada adquiere la máxima calidad.

Para ello se recurre al apartado de “Calidad” de la ventana de procesos.

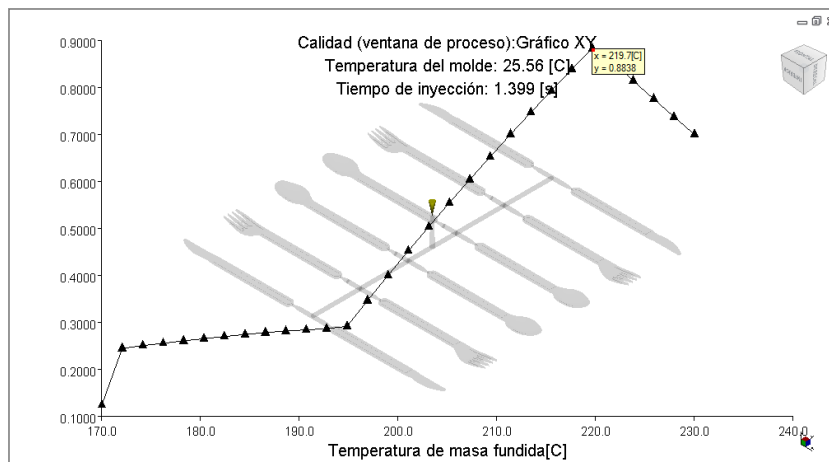


Figura 9.2 Condiciones teóricas para una calidad máxima de la inyección

Como se puede observar en la Figura [9.2] las condiciones de mejor calidad para la pieza son las siguientes:

Calidad	0.88
Temperatura de molde	25.56°C
Tiempo de Inyección	1.399 s
Temperatura de masa fundida	219.7°C

Tabla 9.1 Condiciones de máxima calidad

El siguiente paso que se ha realizado en la ventana de procesos ha sido buscar un intervalo de tiempos de inyección factibles que nos ajuste al máximo el tiempo de llenado real de la pieza con el tiempo de inyección teórico obtenido anteriormente.

Observando la ventana de procesos para una temperatura de molde de 25.56°C y una temperatura de masa fundida de 219.7°C se obtiene un intervalo de tiempos factibles entre 0.9 y 1.9 s.

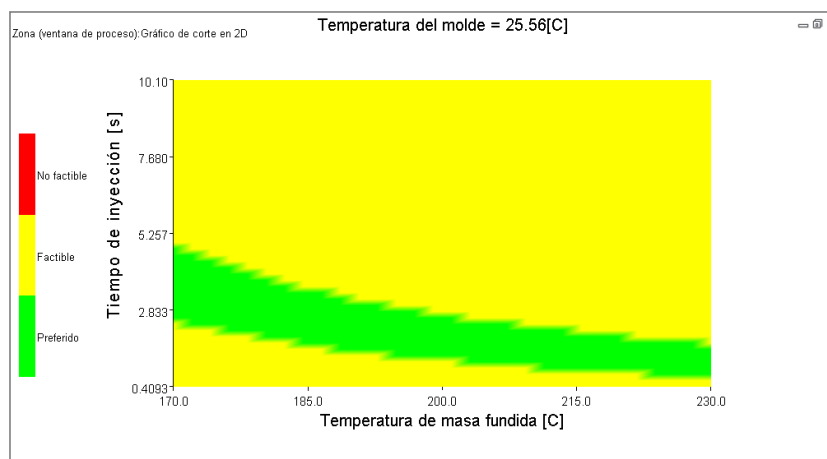


Figura 9.3 Intervalo de tiempo llenado óptimo

2- Llenado

En la fase de llenado se han realizado varias simulaciones de inyección entre 0.9 y 1.9s para comprobar que ciclo de inyección se ajusta mejor a las condiciones óptimas de llenado.

Realizadas todas las simulaciones se obtienen los siguientes resultados:

Tiempo (s)	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.9
Fuerza de cierre (T)	160.24	162.677	161.9295	165.3495	164.7831	165.4627
Presión Inyección (MPa)	90.2667	90.1354	90.32	90.8627	91.1681	91.8748
Tensión de cizalla (MPa)	0.8428	0.8530	0.4136	2.3055	3.4955	6.816
Temperatura de masa fundida (°C)	236.8	235.5	235.8	235.4	235.1	234.9
Diferencia de temperatura en el frente de flujo (°C)	3	3.6	3.8	3.7	3.7	6.1
Tiempo real de llenado (s)	1.178	1.447	1.706	1.97	2.232	2.491

Tabla 9.2 Resultados fase de llenado

Observando los resultados de la Tabla [9.2] se opta por un tiempo de inyección de 1.1 (s), ya que con este tiempo se obtiene la presión de inyección más baja de todas y es la que muestra un tiempo real de llenado más cercano al óptimo mostrado en la ventana de procesos de 1.399 (s).

3- Compactación

En la compactación se ha configurado el tiempo total en el que se le aplicó a la pieza la presión máxima de la máquina para que el producto inyectado coja consistencia, rigidez y la pieza no presente rechupes ni contracciones una vez extraída del molde.

En nuestro caso se le aplicó la máxima presión de la máquina (90.14MPa) para reducir el tiempo de compactación.

Los parámetros que se tuvieron en cuenta para configurar la compactación fueron, además del tiempo y la presión, el porcentaje de rechupes en la pieza, la contracción volumétrica y el % de masa solidificada.

De estos parámetros el más importante y del cual depende el tiempo de compactación es la fracción de masa solidificada, no se puede dejar de compactar hasta que la pieza este totalmente solidificada o hasta que los ataques de los canales se solidifiquen, ya que si los canales solidifican no entrará más material a la cavidad y por tanto la presión ejercida por la máquina no tendría ningún efecto sobre la pieza.

Para optimizar la compactación se han simulado 4 tiempos de compactación distintos (2, 3, 4 y 5s) hasta encontrar el tiempo justo.

En la Tabla [9.3] podemos ver los resultados de la compactación obtenidos por los distintos tiempos:

Tiempo (s)	2	3	4	5
Rechupes (%)	6	4.5	4	4
Contracción volumétrica (%)	8	7	6	6

Tabla 9.3 Resultados de compactación con distintos tiempos

Observando la tabla se ve claramente que el tiempo idóneo de compactación es de 4s.

Se llega a esta conclusión porque tanto los rechupes como la contracción volumétrica van disminuyendo hasta llegar a los 4s. Una vez sobrepasado este tiempo la contracción y los rechupes en las piezas se mantienen estables, esto es un claro signo de que los ataques de los canales se han solidificado y que aunque se alargue el tiempo de compactación ya no habrá ningún cambio en las piezas.

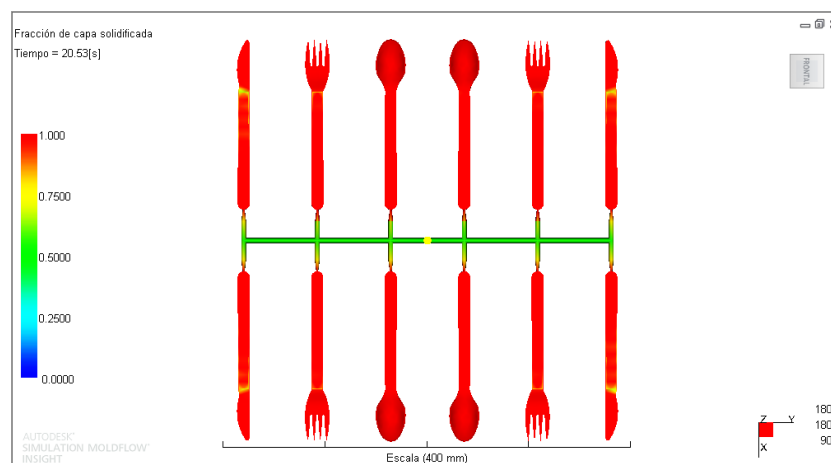


Figura 9.4 Fracción de capa solidificada para 4s

4- Refrigeración

El proceso de refrigeración será la etapa que más tiempo ocupe en el ciclo de inyección, ya que habrá que esperar hasta que las piezas y los canales se solidifiquen.

Una refrigeración incompleta de los canales podría ocasionar que estos se deformaran durante el proceso de expulsión y quedarán enganchados en el molde.

Esta situación provocaría que se tuviera que interrumpir el ciclo de inyección para extraer las piezas deformadas, lo que provocaría que la producción disminuyera y con ella el margen de beneficio.

Teniendo en cuenta los datos anteriores se prueban distintos tiempos de refrigeración hasta que se encuentra el tiempo óptimo. Se empieza con un tiempo de 15 s y se va aumentando progresivamente hasta que los canales estén totalmente solidificados.

Tiempo de Refrigeración (s)	15	20	22	24	25
Grado de solidificación de los canales (%)	50	65	75	85	99

Tabla 9.4 Resultados de la fase de Refrigeración

Como se observa en la Tabla [9.4] y en la Figura [9.5] con un tiempo de refrigeración de 25 s los canales están totalmente solidificados.

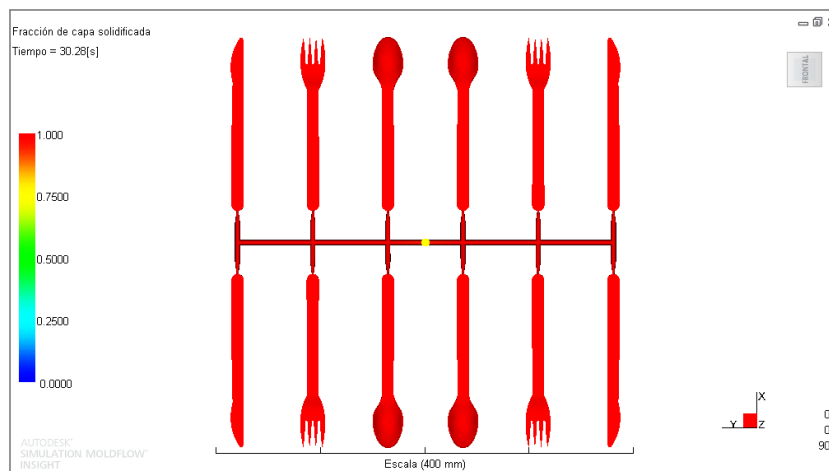


Figura 9.5 Grado de solidificación de la pieza con refrigeración de 25s

9.1.1. Tiempo total de ciclo

	Tiempo Teórico (s)	Tiempo Real (s)
Llenado	1.1	1.45
Compactación	4	3.83
Refrigeración	25	25
Tiempo total de ciclo (s)	30.1	30.28

Tabla 9.5 Tiempos del ciclo de inyección

9.2. Molde de canales calientes

La principal diferencia entre el molde de canales calientes y el molde de canales fríos es que en el molde con cámaras calientes una unidad calefactora mantiene los canales de distribución siempre calientes con el material fundido y listo para inyectar, y unas válvulas evitan que el material fundido salga despedido cuando se extraen las piezas inyectadas del molde.

Con este tipo de molde se reduce el tiempo de inyección ya que no es necesario esperar a que los canales se enfríen para extraer la pieza. También se reduce el material sobrante porque los canales y el bebedero no se expulsan con cada ciclo de inyección, sino que permanecen siempre llenos de material fundido.

Por otra parte el ciclo de refrigeración desaparece y lo sustituye el ciclo de compactación, como los ataques no se solidifican se puede compactar hasta que la pieza este totalmente solidificada.

Los inconvenientes de estos moldes son que la máquina se encuentra más tiempo a máxima presión de inyección porque el tiempo de compactación es mayor, y por otra parte el precio del molde, ya que el sistema de válvulas y cámaras calientes encarece sustancialmente el molde.

Independientemente de las características del molde, los pasos previos al estudio son los mismos que los realizados en el de cámaras frías.

En primer lugar, se importarán los diseños de los cubiertos en formato STL y se dispondrán en el MoldFlow utilizando la misma distribución que la utilizada en los canales fríos.

El siguiente paso será configurar las características de los canales de distribución:

- Canales: Tendrán una sección transversal circular con un diámetro de 5 mm y unos calentadores a temperatura de la masa fundida.
- Bebedero: El bebedero tendrá una sección circular constante de 8 mm. Al no tener que expulsarse no es necesario crear una sección cónica.
- Ataques: Contarán con una sección transversal circular con forma cónica y unas medidas de 2 mm de diámetro inicial con un ángulo cónico de 5 grad.

Al igual que se ha hecho anteriormente, una vez creados los canales se mallarán las piezas con una densidad de 8 mm y una tolerancia de 0.1 mm.

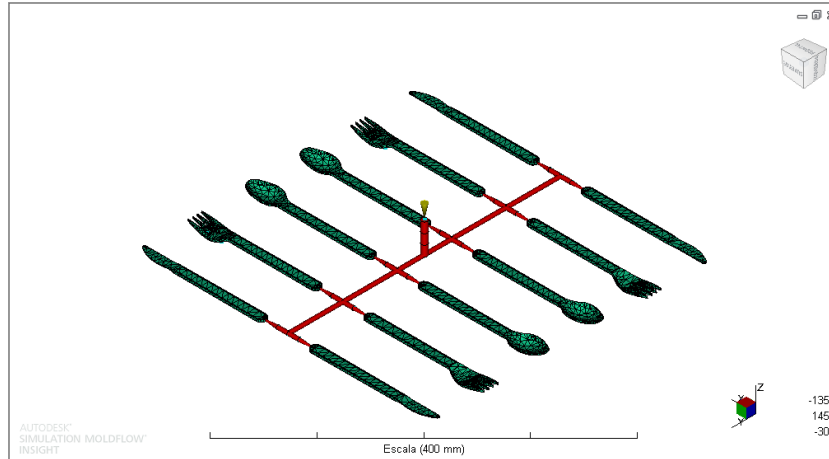


Figura 9.6 Disposición en molde, canales calientes y mallado de la pieza

Una vez configurados todos los elementos se procederá a iniciar el análisis.

1- Ventana de Proceso

Lo primero que se ha realizado en la ventana de procesos ha sido comprobar las condiciones óptimas del ciclo de inyección para obtener la máxima calidad posible en las piezas. Para ello se recurrió al apartado de “calidad” de la ventana de procesos donde se analizó la gráfica.

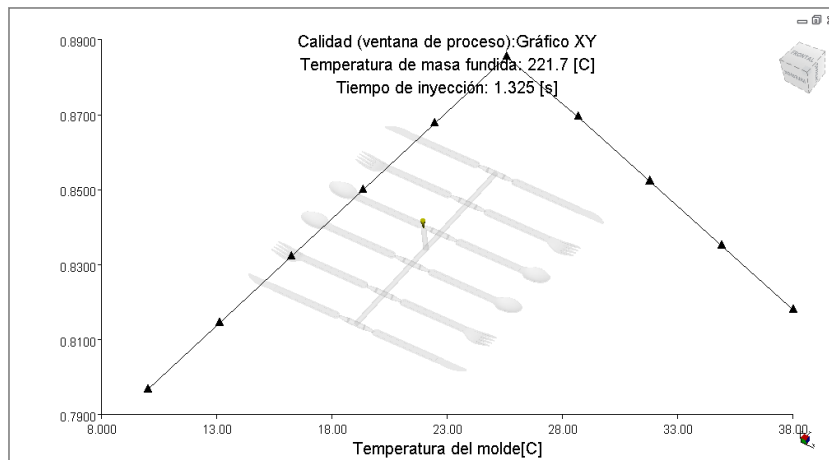


Figura 9.7 Condiciones teóricas para una calidad máxima en la inyección

Como se observa en la Figura [9.7] las condiciones óptimas para el proceso de inyección son las siguientes:

Calidad	0.88
Temperatura del molde	25.56 °C
Tiempo de inyección	1.325 s
Temperatura de la masa fundida	221.7 °C

Tabla 9.6 Condiciones óptimas de inyección

El siguiente paso, como se ha realizado en el molde con canales fríos, ha sido buscar un intervalo de tiempos de inyección factibles que ajusten al máximo el tiempo de llenado real con el tiempo de llenado teórico.

Observando la ventana de procesos para una temperatura de molde de 25.56°C y una temperatura de masa fundida de 221.7°C se obtiene un intervalo de tiempos factibles entre 0.8 y 1.8 s.

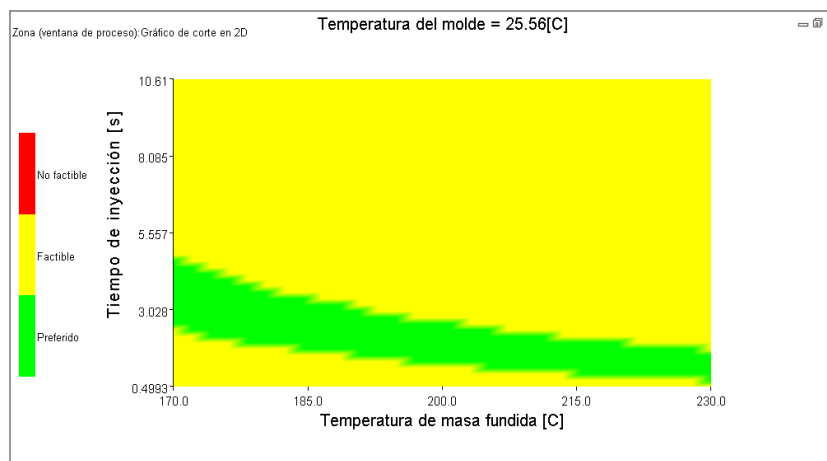


Figura 9.8 Intervalo de tiempo de llenado óptimo

2- Llenado

En la fase de llenado se han realizado varias simulaciones de inyección entre 0.8 y 1.8s para comprobar que ciclo de inyección se ajusta mejor a las condiciones óptimas de llenado.

Realizadas todas las simulaciones se obtienen los siguientes resultados:

Tiempo (s)	0.8	1	1.05	1.3	1.5
Fuerza de cierre (T)	97.3	96.24	95.31	103.57	112.6
Presión de Inyección (MPa)	62.39	62.65	60.18	64	63.09
Tensión de cizalla (MPa)	1.46	1.3547	1.66	5.04	12.3
Temperatura de masa fundida (°C)	232.9	232.8	233	232.7	231.2
Diferencia de temperatura en el frente de flujo (°C)	1.5	1.5	1.7	4.5	7.3
Tiempo real de llenado(s)	1.042	1.301	1.366	1.71	2

Tabla 9.7 Resultados fase de llenado

Observando la Tabla [9.7] se opta por un tiempo de inyección de 1.05 s ya que es el tiempo que menor presión de inyección presenta y muestra un tiempo real de inyección muy ajustado al tiempo teórico de 1.325 s. Aunque el tiempo real de llenado no se ajusta tanto como el del ciclo de 1 s, el dato que nos hace decantarnos por el ciclo de 1.05 s es la presión de inyección.

3- Compactación

Como se realizó en el molde de canales fríos, en el proceso de compactación se ha configurado el tiempo total de aplicación de la presión máxima de la máquina para conseguir un producto inyectado con la mejor consistencia, rigidez y con el menor número posible de contracciones y rechupes.

En este caso la presión máxima aplicada a la pieza es de 73.53 MPa.

Siguiendo la misma dinámica anterior, los parámetros a tener en cuenta para configurar la compactación han sido el tiempo, la presión, el porcentaje de rechupes, la contracción volumétrica y el % de masa solidificada.

Hay que tener en cuenta que para este tipo de molde el tiempo de compactación depende del porcentaje de masa solidificada, como se ha mencionado anteriormente los ataques del molde no solidificarán y por tanto se podrá compactar la pieza hasta que este solidificada al 100%.

Para obtener el tiempo de compactación óptimo para este tipo de molde se han simulado 4 tiempos distintos (15, 19, 20 y 21 s) con las siguientes características:

Tiempo (s)	15	19	20	21
Rechupes (%)	4.3	4.2	4	4
Contracción volumétrica (%)	6.5	6	5.5	5.5

Tabla 9.8 Resultados de la compactación con distintos tiempos

Como se puede ver en la Tabla [9.8] los tiempos de 20 y 21s tienen los mismos índices de rechupes y contracción volumétrica, lo que nos indica que la pieza ya está solidificada totalmente y la compactación ya no afecta a los productos inyectados, por tanto optaremos por el tiempo de 20s para realizar la compactación, ya que es innecesario alargar más el ciclo pues los resultados obtenidos serían los mismos.

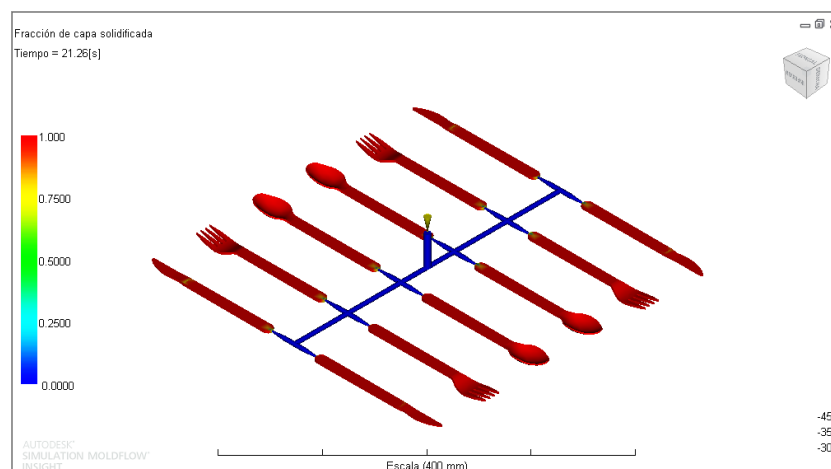


Figura 9.9 Resultado de la compactación a los 20s

9.2.1. Tiempo total de ciclo

	Tiempo Teórico (s)	Tiempo Real (s)
Llenado	1.05	1.41
Compactación	20	19.85
Tiempo total de ciclo (s)	21.05	21.26

Tabla 9.9 Tiempo final del ciclo de inyección con cámara caliente

10. Estudio económico

La finalidad del estudio económico es calcular el coste final de producción de un paquete de cubertería compuesto por un cuchillo, un tenedor y una cuchara biodegradables.

Para ello se ha realizado un estudio comparativo entre el coste final del paquete producido con un molde frío y su coste al fabricarse en un molde caliente.

Con este estudio se ha decidido además que tipo de molde es más interesante para la fabricación de los cubiertos.

10.1. Estudio económico molde de canales fríos.

10.1.1. Coste de la mano de obra y material

Para poder realizar un cálculo estimado del coste de inyección y del precio final de los cubiertos, se han tenido en cuenta los siguientes datos mostrados en la tabla.

Datos Iniciales	
Paquetes por ciclo	4
Tiempo de ciclo (s)	30.28
Precio hora inyectora + operario (€/hora)	80
Precio del PLA (€/Kg)	4.5
Precio del PCL (€/Kg)	7.6

Tabla 10.1 Datos iniciales para un molde de canales fríos

Primero se ha calculado el precio del material por Pack de cubertería.

Se sabe que el material a utilizar es PLA 60% + PCL 40% y que la masa del conjunto en una inyectada excluyendo los canales es de 65g. Cada inyectada produce 12 unidades de cubertería que corresponden a 4 paquetes.

	Precio/Kg (€)	Masa pieza	Precio material/Pieza (€)
PLA	4.5	9.75	0.044
PCL	7.6	6.5	0.05
Precio Total			0.094

Tabla 10.2 Coste del material por set de cubiertos

Sabiendo que el tiempo de ciclo en este molde es de 30,28 segundos y en cada ciclo de inyección se inyectan 4 paquetes de cubiertos, en 1 hora se produce la siguiente cantidad:

Mano de obra + máquina (€/hora)	Paquetes/hora	Precio por Paquete (€)
80	472	0.17

Tabla 10.3 Coste de mano de obra y material por paquete de cubiertos

10.1.2. Coste total de un paquete de cubiertos producido en un molde de canales fríos.

El coste total de producción de un Pack de cubiertos biodegradables teniendo en cuenta el coste de material y de procesado es el siguiente:

	Cubiertos
Precio Material (€/Kg)	0.094
Mano de obra + Máquina (€/hora)	0.17
Coste total del Paquete de cubiertos	0.264 €

Tabla 10.4 Coste total de producción de un paquete de cubiertos en un molde de canales fríos

10.2. Estudio económico molde de canales calientes

10.2.1. Coste mano de obra y material

En este caso se ha modificado el tiempo de ciclo para este tipo de molde, ya que el precio de los materiales y de la máquina será el mismo.

Datos Iniciales	
Paquetes por ciclo	4
Tiempo de ciclo (s)	21.26
Precio hora inyectora + operario (€/hora)	80
Precio del PLA (€/Kg)	4.5
Precio del PCL (€/Kg)	7.6

Tabla 10.5 Datos iniciales para un molde de canales calientes

Al igual que en el molde de canales fríos, primero se calculará el precio de material por Pack de cubertería.

El material a utilizar será el mismo, PLA 60% + PCL 40% y la masa del conjunto en una inyectada excluyendo los canales es de 65.7g. Cada inyectada produce 12 unidades de cubertería que corresponden a 4 paquetes.

	Precio/Kg (€)	Masa pieza	Precio material/Pieza (€)
PLA	4.5	9.86	0.044
PCL	7.6	6.565	0.05
Precio Total			0.094

Tabla 10.6 Coste del material por set de cubiertos

En este caso el tiempo de ciclo es de 21.26 segundos, en cada inyectada se producen 4 paquetes de cubiertos, por tanto en una hora de funcionamiento se producirá la siguiente cantidad de producto:

Mano de obra + máquina (€/hora)	Paquetes/hora	Precio por Paquete (€)
80	677	0.12

Tabla 10.7 Coste de mano de obra y material por paquete de cubiertos

10.2.2. Coste total de un paquete de cubiertos producido en un molde de canales calientes.

Con los precios obtenidos en los apartados anteriores, el precio final del paquete de cubiertos será el siguiente:

	Cubiertos
Precio Material (€/Kg)	0.094
Mano de obra + Máquina (€/hora)	0.12
Coste total del Paquete de cubiertos	0.214

Tabla 10.8 Coste total de producción de un paquete de cubiertos en un molde de canales calientes

10.4. Comparativa general del coste de producción de la pieza según el tipo de molde

Tipo de Molde	Canales calientes	Canales fríos
Precio Material (€/Kg)	0.094	0.094
Mano de obra + Máquina (€/hora)	0.12	0.17
Coste total del Paquete de cubiertos	0.214	0.264 €

Tabla 10.9 Comparativa del coste

10.3. Amortización del molde

Con el coste de producción calculado para cada tipo de molde, era necesario saber el margen de beneficio que obtendríamos con cada molde para poder calcular el tiempo de amortización.

Consultando con los principales productores de cubertería desechable fabricada con blends y el precio de mercado de sus productos, se llegó a la conclusión que para poder competir en el mercado con los principales competidores se debía lanzar el producto final (Paquete de cubiertos desechables) con un precio de 0.4€.

Con el precio de venta definido, se calculó el margen de beneficio y la cantidad de producto que se tenía que vender para amortizar cada molde.

	Molde Canales Fríos	Molde Canales Calientes
Coste de Producción (€)	0.264	0.214
Precio de venta (€)	0.4	0.4
Beneficio total (€)	0.136	0.186

Una vez calculado el beneficio que se obtiene por cada paquete vendido y según el molde con el que se ha fabricado, se ha calculado la cantidad de piezas que se tendrán que vender para amortizar cada uno de los dos moldes.

Para poder calcular la amortización del molde, primero se necesitó elaborar un presupuesto aproximativo del coste de estos dos tipos de molde.

Para ello se recurrió a una empresa especializada en el sector de la matricería, “Talleres Pardo”, a la que se le expuso el problema y las características del molde.

Dicha empresa, basándose en los modelos de distribución en molde del MoldFlow, las dimensiones y espesores de cada uno de los cubiertos, y la geometría de los canales, elaboró dos presupuestos aproximativos para cada uno de los dos moldes utilizados para la producción de los cubiertos.

En primer lugar, para un molde de canales fríos de 12 cavidades, con bebedero e inyección submarina fabricado en acero, el coste aproximado es de 20000€.

Por otro lugar, para un molde de cámaras calientes, al precio del molde de canales fríos se le sumaría 12 puntos de inyección de cámara caliente. Estas cámaras encarecerán el precio del molde a más del doble, ya que cada punto de inyección en caliente añadiría un precio de 2500€ al coste total del molde.

Por tanto, sumándole los 12 puntos de inyección en caliente (30000€) al coste de producción del molde de cámaras frías en acero (20000€) nos daría un coste total del molde de cámaras calientes aproximativo de 50000€.

Seguidamente, sabiendo el precio aproximativo de cada tipo de molde, se pudo elaborar un presupuesto para saber la cantidad de unidades que habría que vender para poder amortizar el precio de cada tipo de molde.

	Molde Canales Fríos	Molde Canales Calientes
Coste de fabricación (€)	20000	50000
Beneficio por paquete (€)	0.136	0.186
Unidades para amortizar el molde	147059	268817

Realizado el estudio, se llega a la conclusión que es más rentable producir el producto en un molde de cámaras frías, ya que aunque el tiempo de ciclo es más largo y el coste de producción es mayor, la amortización del molde y por tanto la generación de beneficios netos se produce antes que con el molde de cámaras calientes.

11. Conclusiones

Del trabajo se ha aprendido que realizando mezclas físicas con materiales que posean una buena miscibilidad se pueden obtener materiales que combinen las propiedades de los diferentes compuestos sin necesidad de realizar ningún cambio en la química de los materiales. Procesando correctamente estos materiales se obtienen mezclas con acabados muy homogéneos.

Haciendo referencia al PLA que hemos estudiado, se llega a la conclusión de que realizando mezclas físicas con materiales más plásticos que el propio PLA se mejora la elasticidad y la plasticidad del material sin necesidad de añadir al compuesto ningún tipo de plastificante adicional.

Del mismo modo se ha aprendido que variando los porcentajes de cada material en el blend se obtienen características físicas y térmicas diferentes, así que para conseguir las propiedades que mejor se adapten a nuestras necesidades solo habrá que variar los porcentajes de cada material hasta que demos con la mezcla óptima de compuestos.

La versatilidad que tienen los blends permitirá realizar mezclas con múltiples compuestos y con una amplia gama de propiedades con una gran facilidad y de manera económica, ya que la realización de mezclas físicas no requiere de grandes inversiones económicas ni de maquinaria muy compleja.

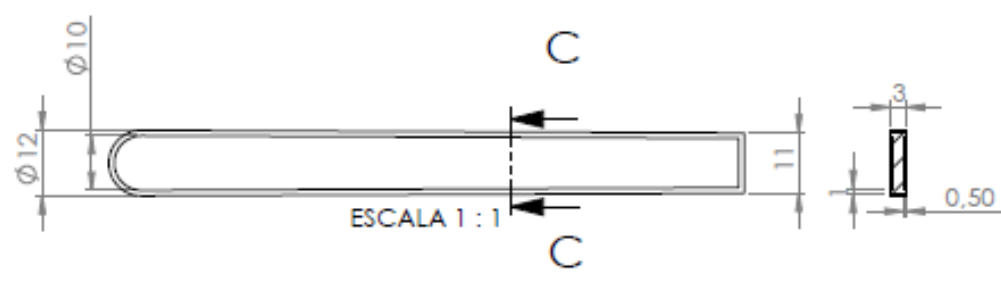
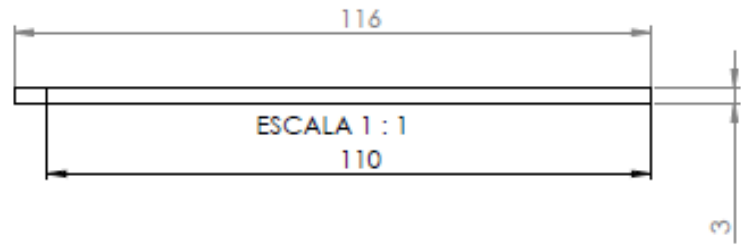
Por tanto, se considerará la técnica de mezclas físicas como un recurso importante y económico para la obtención de nuevos materiales.

En relación a su procesado, podemos decir que lo más complicado de su manipulación será encontrar un punto óptimo en el que se pueda procesar el material sin que ninguno de sus componentes se degrade y en el que todos lleguen al punto de fusión. Una vez encontrado este punto de manipulación, su procesado se realizará como el de cualquier termoplástico.

En el aspecto económico, se puede decir que actualmente los materiales biodegradables al igual que sus blends resultan más caros que los commodities termoplásticos más habituales en el mercado, pero que esta tendencia está cambiando en los últimos años debido al aumento de la demanda y al incremento de su producción. Sus propiedades similares a los commodities y sobre todo sus características biodegradables respetuosas con el medio ambiente son lo que hacen que el uso de estos materiales se encuentre al alza y que el sector comercial apueste por estos compuestos, multiplicando la oferta de productos en el mercado y disminuyendo su precio progresivamente.

Finalmente, se puede afirmar que los blends biodegradables con los que se ha trabajado nos dan una opción perfectamente válida y económica para la fabricación de cubertería desechable.

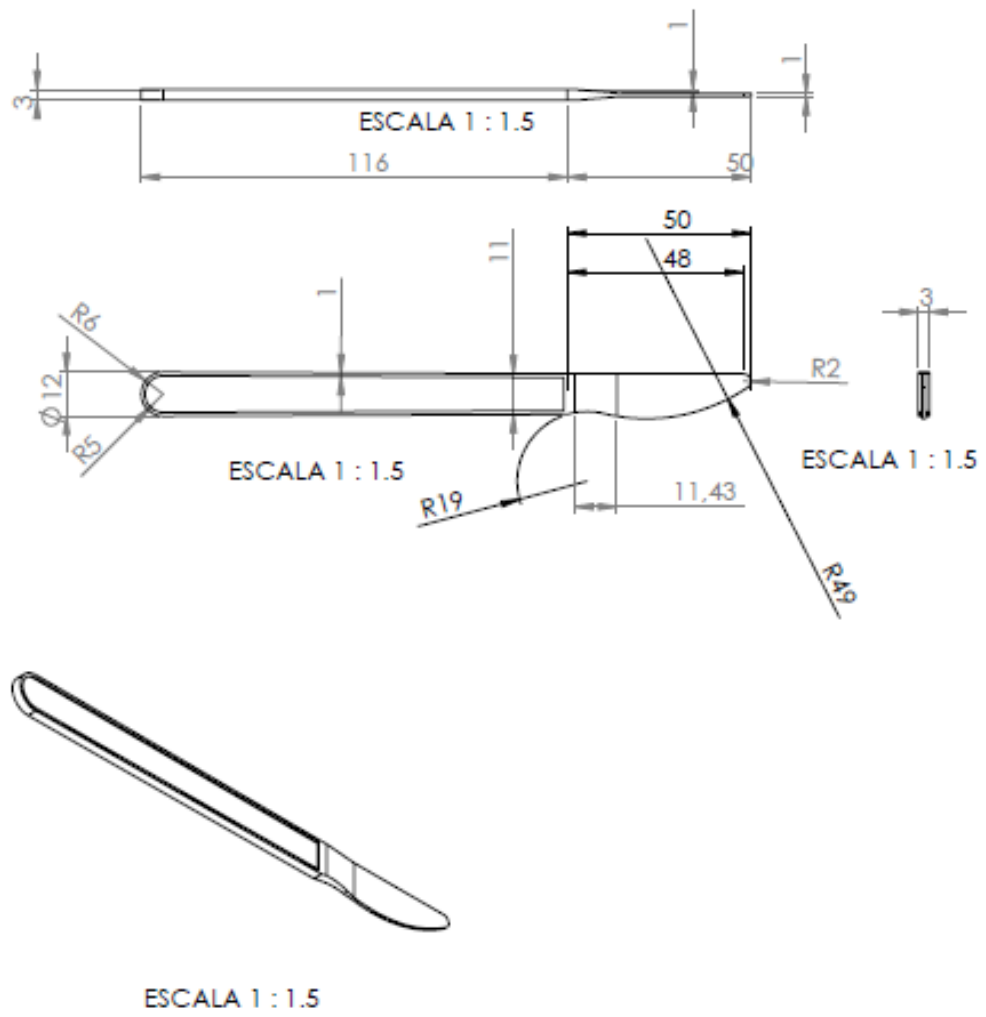
12. Planos y esquemas técnicos



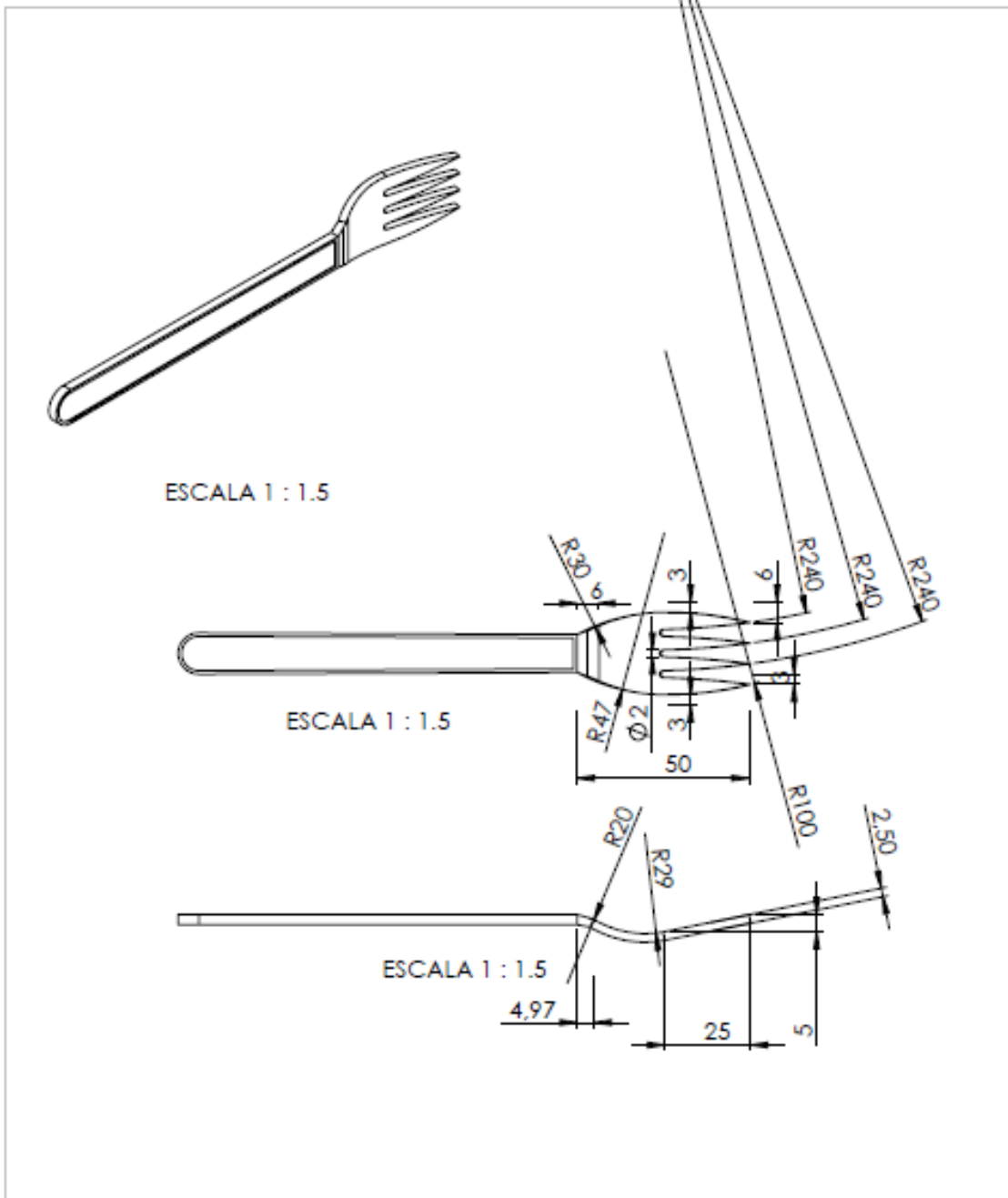
SECCIÓN c-c
ESCALA 1 : 1



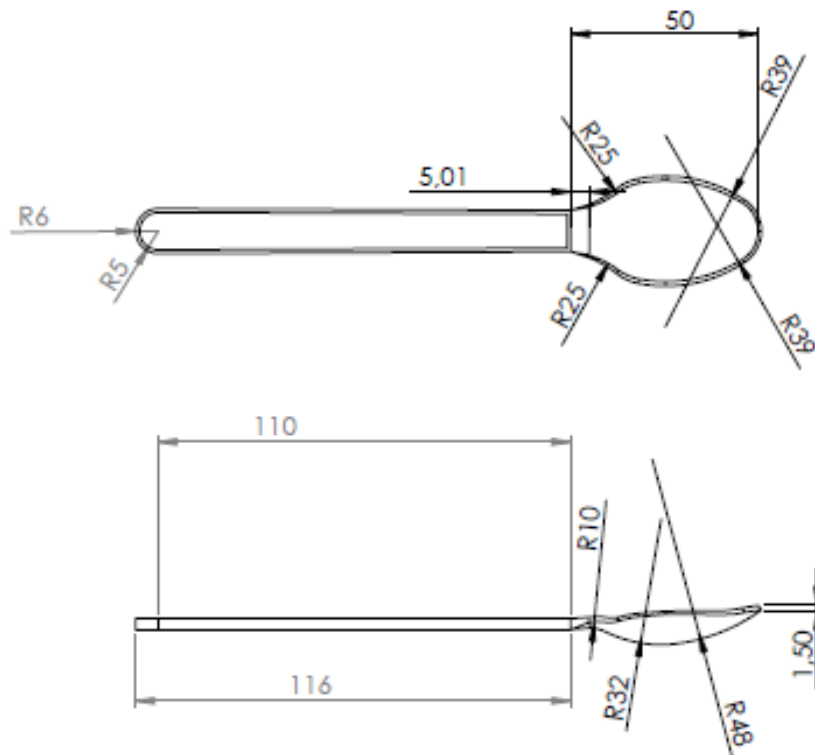
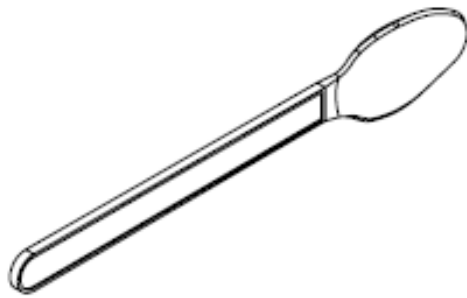
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE DIBujan EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBE LA ESCALA	REVISION
DISEÑ.				HOMBRE	PRIMA	FECHA	TITULO:
VERIF.							
APROB.							
FABR.							
CALID.							
				MATERIAL:		Nº DE DIBUJO	
				PESO:		Manec base.espesor ⁴	
						ESCALA:1:1	
						HOJA 1 DE 1	



	NOMBRE	FIRMA	FECHA		TÍTULO:
DBLU.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CAUD.					
				MATERIAL:	Nº DE DIBUJO
				PLA60% / PCL 40%	Ganivet
				PESO:	A4
				ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERIOR: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
HOMBRE				FECHA		TÍTULO: Forquilla	
FIRMA						Nº DE DIBUJO	
DIBUJ.						A4	
VERIF.						ESCALA: 1:1.5	
APROB.						HOJA 1 DE 1	
FABR.						MATERIAL: PLA60% / PCL 40%	
CAUD.						PSO:	



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISION
				TITULO: Cullera			
				MATERIAL: PLA 60% / PCL 40%			
				Nº DE DIBUJO A4			
				ESCALA: 1:1.5		HOJA 1 DE 1	
				PESO:			

13. Pliego de condiciones

13.1. Normativa Exigible

13.1.1. Probetas Normalizadas

Como el material inyectado se utilizará para hacer ensayos normalizados, se dispondrá un molde con unas cavidades con forma de probeta normalizada para realizar ensayos de tracción como marca la norma **UNE-EN ISO 5272:2012**

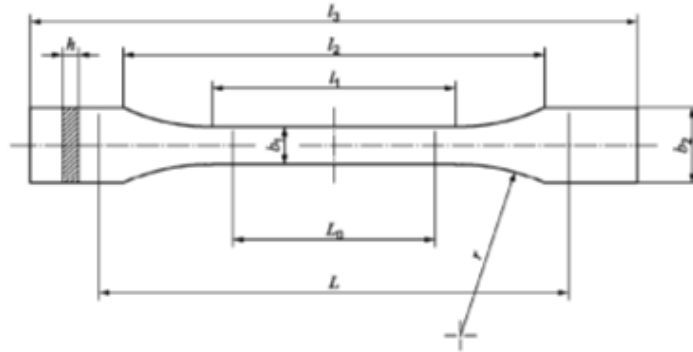


Figura 13.10 Diagrama Probeta de Tracción Normalizada

Siguiendo la Figura [13.10] las probetas normalizadas para el ensayo de tracción cuentan con las siguientes medidas:

	Tipo de Probeta	1a	1b
l_3	Longitud total ^a	170	≥ 150
l_1	Longitud de las caras paralelas	80 ± 2	60 ± 0.5
r	Radio	24 ± 1	60 ± 0.5
l_2	Distancia entre las partes anchas de las caras paralelas ^b	109.3 ± 3.2	108 ± 1.6
b_2	Ancho en los extremos	20 ± 0.2	
b_1	Ancho en la parte derecha	10 ± 0.2	
h	Espesor recomendado	4 ± 0.2	
L_0	Longitud de referencia	75 ± 0.5	50 ± 0.5
L_0	Longitud de referencia (aceptable si se requiere para control de calidad)	50 ± 0.5	
L	Distancia inicial entre mordazas	115 ± 1	115 ± 1

^a La longitud total recomendada de 170 mm para el tipo de probeta 1^a concuerda con las Normas ISO 294-1 e ISO 10724-1. Para algunos materiales, puede ser necesario alargar la longitud de los extremos para evitar la rotura o el deslizamiento en las mordazas de la máquina.

^b $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$, que resulta de l_1 , r , b_2 , pero dentro de las tolerancias indicadas.

Tabla 13.5 Características probeta de Tracción

En el molde de inyección también se obtendrán probetas normalizadas para realizar los ensayos de Flexión y de impacto Charpy siguiendo la normativa **UNE-EN ISO 527-2:2012**:

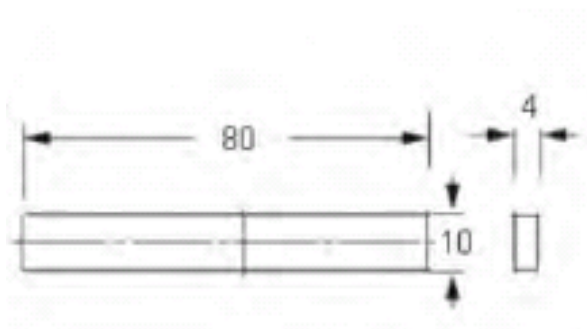


Figura 13.11 Diagrama Probeta de Flexión e Impacto

Material	Longitud de la probeta (l)	Distancia exterior entre apoyos (L)	Ancho (b)	Espesor (h)
Clase1 Termoplásticos Reforzados	80 mm	64 mm	10 mm	4 mm

Tabla 13.6 Características Probeta de Flexión

13.2. Materiales

- Características PLA utilizado
 - Fabricante: NatureWorks LLC
 - Grado comercial: IngeoTM Biopolymer 6201D

Typical Material & Application Properties		
Physical Properties	Igeo 6201D	ASTM Method
Specific Gravity	1.24	D792
Relative Viscosity	3.1	CD Internal Viscotek Method
Melt Index, g/10 min (210°C)	15 – 30	D1238
Melt Density (230°C)	1.08	
Glass Transition Temperature (°C)	55 – 60	D3417
Crystalline Melt Temperature (°C)	155 – 170	D3418

Typical Fiber Properties		
Denier per Filament	≥ 0.5 dpf	g/9000m
Tenacity (g/d)	2.5 - 5	D2256/D3822
Elongation (%)	10 - 70	D2256/D3822
Modulus (g/d)	30 - 40	D2256 – D3822
Boiling Water Shrinkage (%)	5 - 15	D2102
Hot Air Shrinkage (%)	5 - 15	D2102
Other Properties		
Melt Spinning Temperatures	220°C - 240°C	
Drying Capabilities	<0.040%	

Tabla 13.7 Características PLA Ingeo™ Biopolymer 6201D

- Principales productores de PLA

Empresa	Ubicación	Producto comercial
Cargill LCC	EE.UU.	NatureWorks
Mitsubishi	Japón	Ecolaju
Chronopol	EE.UU.	Heplon
Hycail	Holanda	Hycail HM, LM
Toyota	Japón	Toyota Eco-Plastic
Purac Biomaterials	Holanda	Purasorb
Durect	EE.UU.	Lactel
Shimadzu	Japón	Lacty
Total & Galactic	Bélgica	Futtero
Treofan	Holanda	Treofan
Mitsui Chem	Japón	Lacea

14. Bibliografía

Libros:

- P.Groover, Mikell: *Fundamentos de manufactura moderna*
- S.Kalpajian, S.R.Schmid: *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*
- Hans-Josef Endres, Andrea Siebert-Raths; (Munich): *Engineering Biopolymers: markets, manufacturing, properties and applications*
- L.Sors, L.Bardocz, I.Radnoti: *Plástico Moldes y Matrices*
- Israel Hernández Romero, Gabriela Morales: *Biopolímeros naturales extraídos de la biomasa*
- Emmanuel O.Rodríguez: *Biopolímeros*
- José R. Lerma Valero (2005): *Transformación de termoplásticos por inyección*

Webs visitadas:

- <http://www.makeitfrom.com/material-properties/Polycaprolactone-PCL>
- <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2012/11/policaprolactona-pcl.html>
- <http://www.matbase.com/material-categories/natural-and-synthetic-polymers/thermoplastics/agro-based-polymers/material-properties-of-thermoplastic-starch-tps.html#general>
- <http://www.biotec.de/sustainability/biodegradability/>
- http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~pl_PL/portal/show/content/products/biodegradable_plastics/ecovio_properties
- http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU/portal/show/content/products/biodegradable_plastics/ecoflex
- http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm02/fcm2_2.html
- http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm02/fcm2_2.html
- http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm02/ptrb2_2_6.html
- <http://www.easyfairs.com/fileadmin/groups/10/MIRIAM%20GALLUR.pdf>

Catálogos:

- Bayer
- Basf
- NatureWorks
- Mettler Toledo
- Perstorp
- Novamont

- Biotec

Bases de Datos:

- Web of Science
- Scopus