



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Estudio y caracterización de materiales para un prototipo de impresora 3D basada en la tecnología DLP

Autor

Raquel Biota Torrecilla

Director y codirectora

Jesús Velázquez Sancho
María Esther Cascarosa Salillas

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (Universidad de Zaragoza)
2015



DECLARACIÓN DE
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Raquel Biota Torrecilla

con nº de DNI 77135409-X en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado _____, (Título del Trabajo)

Estudio y caracterización de materiales para un prototipo de impresora 3D
basada en la tecnología DLP

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada
debidamente.

Zaragoza, 15 de noviembre de 2015

Raquel Biota

Fdo: Raquel Biota Torrecilla



Estudio y caracterización de materiales para un prototipo de impresora 3D basada en la tecnología DLP

RESUMEN

Desde la aparición de las primeras impresoras de tinta, el concepto de impresión ha ido evolucionando hasta la actualidad, donde es posible fabricar gran diversidad de objetos con distintos materiales, gracias al desarrollo de las impresoras en tres dimensiones.

La información existente sobre este tipo de impresión es limitada dado que se trata de un campo de estudio en expansión. Aunque sus bases están claras y bien definidas, las posibles vías de innovación son inmensas.

En este Trabajo Fin de Grado se ha propuesto realizar la caracterización de distintos materiales sobre un prototipo de impresora 3D, basada en la tecnología de procesamiento digital de luz (DLP).

El fundamento de esta tecnología consiste en crear objetos por capas en un baño de resina líquida sensible a la luz ultravioleta. Dicha resina consta de dos componentes principales: un monómero y un fotoiniciador, el cual desencadena una reacción de polimerización. Combinando la reacción química con una proyección de luz, se consigue solidificar el compuesto e ir creando la pieza.

Como punto de partida se toman distintos monómeros y fotoiniciadores y se analizan todas las combinaciones resultantes posibles. Una vez elegidas las mezclas de compuestos que ofrecen los mejores resultados, este estudio trata de caracterizar dichas mezclas y compararlas con materiales que se encuentran en el mercado.

Para ello se construyen por un lado las curvas características de las distintas mezclas analizadas, en las que se indica el espesor de capa que se puede llegar a obtener (dependiendo del tiempo que han estado expuestas a la luz); por otro lado, se realizan algunos ensayos a las piezas obtenidas para determinar ciertas propiedades mecánicas de los materiales estudiados.





TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	IMPRESIÓN 3D	1
1.2	CAMPOS DE APLICACIÓN	2
1.3	TIPOS DE IMPRESIÓN 3D	3
1.4	TECNOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE LUZ	5
1.5	SISTEMAS DE CURACIÓN POR ENERGÍA	7
1.6	CURADO POR RADIACIÓN ULTRAVIOLETA	7
1.7	MECANISMOS DE CURACIÓN POR LUZ ULTRAVIOLETA	8
1.8	OBJETIVOS Y ALCANCE	10
2	DESARROLLO	11
2.1	TECNOLOGÍA A UTILIZAR	11
2.2	SISTEMA DE CURACIÓN POR LUZ ULTRAVIOLETA	12
2.3	ETAPAS DE LA POLIMERIZACIÓN RADICAL POR UV	15
2.4	MATERIALES	16
	2.4.1 <i>Materiales comerciales</i>	16
	2.4.2 <i>Materiales propios</i>	17
	2.4.2.1 Resinas	17
	2.4.2.2 Fotoiniciadores	18
	2.4.3 <i>Selección de materiales</i>	19
2.5	PREPARACIÓN DE MEZCLAS	19
	2.5.1 <i>Toma de muestras</i>	20
	2.5.2 <i>Seguridad</i>	20
	2.5.3 <i>Material a utilizar</i>	20
	2.5.4 <i>Desarrollo experimental</i>	21
2.6	CONOCIMIENTOS PREVIOS	21
2.7	INICIACIÓN	22



TABLA DE CONTENIDO

2.8	METODOLOGÍA	22
2.9	PRIMERA FASE	23
2.10	SEGUNDA FASE	24
2.11	ELECCIÓN DE LAS MEJORES MEZCLAS	24
2.11.1	<i>Materiales propios</i>	25
2.11.2	<i>Materiales comerciales</i>	26
2.12	ENSAYOS DE REPETIBILIDAD	26
2.12.1	<i>Factores influyentes</i>	27
2.12.2	<i>Ensayos aclaratorios</i>	27
2.13	CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS	28
2.14	IMPRESIÓN EN 3D	29
2.14.1	<i>Metodología</i>	30
2.14.2	<i>Pirámides</i>	32
2.14.3	<i>Probetas</i>	32
3	CONCLUSIONES	35
4	BIBLIOGRAFÍA	37
	ANEXOS	39
A.1	TIPOS DE IMPRESIÓN 3D	41
A.1.1	TECNOLOGÍAS DE DEPOSICIÓN DE MATERIAL PLÁSTICO	41
A.1.1.1	<i>FDM (Fusion Deposition Modeling)</i>	41
A.1.1.2	<i>FFF (Fused Filament Fabrication)</i>	42
A.1.2	TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D CON LÁSER	43
A.1.2.1	<i>SLA (Stereolithography)</i>	43
A.1.2.2	<i>SLS (Selective Laser Sintering)</i>	44
A.1.3	OTRAS TÉCNICAS	44
A.1.3.1	<i>Digital Light Processing (DLP)</i>	44
A.1.3.2	<i>PolyJet photopolymer</i>	44
A.1.3.3	<i>Syringe Extrusion</i>	45



A.1.3.4	<i>Selective Laser Melting (SLM)</i>	45
A.1.3.5	<i>Laminated Object Manufacturing (LOM)</i>	45
A.2	REACCIONES DE POLIMERIZACIÓN	47
A.2.1	POLIMERIZACIÓN EN CADENA	47
A.2.1.1	<i>Polimerización por radicales libres</i>	48
A.2.1.2	<i>Polimerización iónica</i>	48
A.2.1.3	<i>Polimerización catalítica</i>	49
A.3	MATERIALES COMERCIALES	51
A.3.1	<i>B9 CREATIONS</i>	51
A.3.2	<i>MADESOLID</i>	51
A.3.2.1	<i>VOREX RESIN</i>	51
A.3.2.2	<i>CASTSOLID RESIN</i>	52
A.3.2.3	<i>MS RESIN</i>	52
A.3.3	<i>SPOT-A MATERIALS</i>	53
A.3.3.1	<i>Spot-GP</i>	53
A.3.3.2	<i>Spot-HT</i>	53
A.3.3.3	<i>Spot-LV</i>	53
A.4	DOCUMENTOS DE LOS MATERIALES PROPIOS	55
A.4.1	DIACRILATO DE POLIETILENGLICOL (R.I)	55
A.4.2	DIACRILATO DE BISFENOL A (R.II)	55
A.4.3	DIACRILATO DE HEXANODIOL - 1, 6 (R.III)	56
A.4.4	ACRILATO DE ISODECILO (R.IV)	56
A.4.5	TRIACRILATO DE TRIMETILOLPROPANO (R.V)	57
A.4.6	ÓXIDO DE FENIL BIS (2, 4, 6-TRIMETILBENZOIL) FOSFINA (BAPO)	57
A.4.7	BENZOFENONA (BPH)	58
A.4.8	HNU-470 IL (IL)	58
A.4.9	HNU-470 LT (LT)	58



A.5	PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE LA IMPRESORA 3D	59
A.5.1	PREPARACIÓN DE LAS PIEZAS PARA LA IMPRESIÓN	59
A.5.2	MAGICS 19.01	59
A.5.3	PARÁMETROS DE IMPRESIÓN	66
A.6	PRUEBAS DE INICIACIÓN	69
A.7	MEZCLAS PREPARADAS AL 5 % EN PESO DE FOTOINICIADOR	83
A.8	MEZCLAS PREPARADAS AL 2 - 8 % EN PESO DE FOTOINICIADOR	93
A.9	MATERIALES COMERCIALES	103
A.10	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE REPETIBILIDAD	107
A.11	ENSAYOS ACLARATORIOS	113
A.12	CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS	115
A.13	PIRÁMIDES (CAPAS DE 4 MILÍMETROS)	129
A.14	PIRÁMIDES (CAPAS DE 1 MILÍMETRO)	143
A.15	ENSAYOS MECÁNICOS	161
A.16	ENSAYOS DE TRACCIÓN	163
A.17	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN	165

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Impresión 3D

La impresión 3D consiste en la reproducción de objetos con volumen a partir de un prototipo diseñado por medio de cualquier programa CAD (*Computer-Aided Design*) o de diseño asistido por ordenador (Area Tecnología, 2012).

Tradicionalmente, esto se conseguía a través de los diferentes procesos de mecanizado donde, a partir de un bloque macizo, se van quitando capas hasta obtener la pieza deseada.

En cambio, las impresoras 3D constituyen un proceso de fabricación aditiva. La máquina va añadiendo sucesivamente capas muy finas de material que, tras la impresión, se solidificarán hasta crear la pieza final. De esta forma es posible generar geometrías complejas de forma muy rápida.

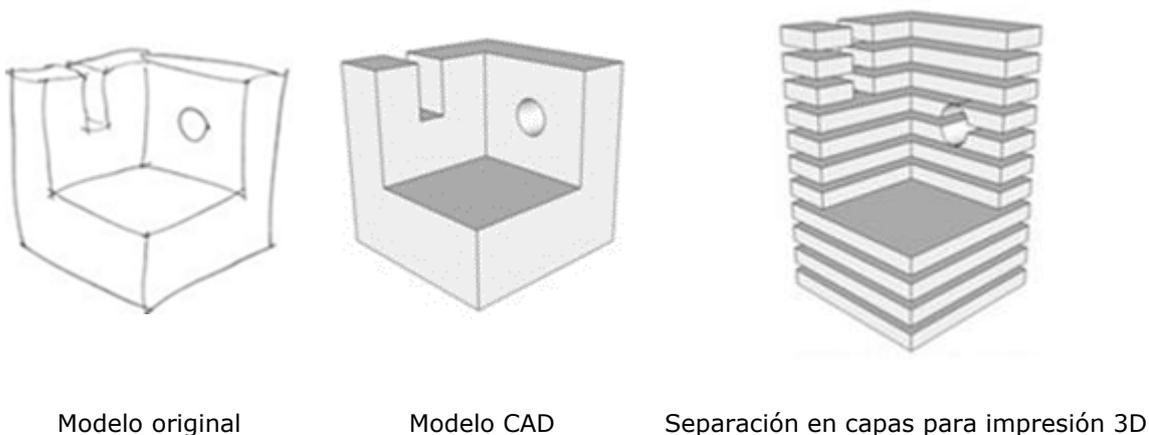


Figura 1 Evolución de un diseño en 3D

En la Figura 1 (Area Tecnología, 2012) se observan las tres etapas de las que consta un proceso de diseño en tres dimensiones. La primera consiste en dibujar, en un papel, por ejemplo, el objeto que se quiere imprimir. Después, con un programa de CAD se diseña dicho objeto en el ordenador. Por último, se separa el objeto en capas para ir imprimiendo capa por capa.

El mayor inconveniente de este tipo de impresión es su precio. Actualmente, el precio depende fundamentalmente del tipo de impresora: se comercializan impresoras

industriales por unos cien mil euros (3Dilla, 2014), y otras profesionales por pocos miles de euros (3Dilla, 2014).

La forma más económica de conseguir una impresora 3D es montar alguno de los modelos que van por piezas. De esta forma, el coste puede estar actualmente en torno a los 500 euros (BQ, 2014), aunque la calidad de las piezas finales no sea comparable con las anteriormente mencionadas.

1.2 Campos de aplicación

Desde que se empezaron a comercializar las primeras máquinas de impresión estereolitográficas (1988) hasta hoy, se ha observado un cambio en el campo de aplicación de la impresión en tres dimensiones (Impresoras 3D, 2013).

En un primer momento, las impresoras 3D servían para crear maquetas usadas en ingeniería, diseño industrial y arquitectura. Más tarde, una vez concebida la impresión 3D por inyección (1993-1995), su uso se amplió a la generación de moldes utilizados en la fabricación final de productos. En la actualidad, las impresoras 3D forman parte del proceso final de producción y con ellas se obtiene el propio producto (Impresoras 3D, 2013).

En este campo se pueden encontrar desde objetos tan cotidianos como una silla, una mesa o una lámpara; hasta órganos obtenidos con las llamadas bio-impresoras (2009), que utilizan células madre como material de impresión. También se ha introducido esta tecnología en otras disciplinas como la ortopedia, e incluso la moda o la cocina. En la Figura 2 se muestran algunos ejemplos (Impresoras 3D, 2013).



Figura 2 Fotografías de diferentes impresiones en 3D

Sin embargo, su uso no está limitado a objetos simples, se pueden crear objetos muy complejos si se imprimen por partes. Siguiendo esta línea, también se especula con la posibilidad de crear puentes y edificios.



En 2005 (Impresoras 3D, 2013), el desarrollo de las impresoras autorreplicantes, supone un salto adelante en la normalización y acceso a las impresoras tridimensionales. También es previsible a corto plazo la presencia de una amplia gama de oferta de equipos de impresión 3D para el hogar, que crecerá a medida que se reduzcan los costes de fabricación de las impresoras y esta reducción se traslade al precio a ofrecer a los consumidores.

1.3 Tipos de impresión 3D

Durante los últimos 20 años, han surgido diferentes tecnologías que permiten generar un objeto en tres dimensiones. Sin embargo fue en 2009, con la creación del comité F42 para las tecnologías de fabricación aditiva de la ASTM (*American Society for Testing and Materials*) cuando los organismos normativos empezaron a clasificar y estandarizar dichas tecnologías.

Posteriormente, en 2011, la organización ISO (*International Standard Organization*) lanzó su propio comité ISO/TC 261 en fabricación aditiva, y actualmente colabora con su equivalente ASTM para la generación de nuevas normas como por ejemplo:

- ISO/ASTM 52921:2013 *Standard terminology for additive manufacturing - coordinate systems and test methodologies* (ISO/ASTM, 2013), originalmente publicada como ASTM F2921-11.

- ISO/ASTM 52915:2013 *Standard specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.1* (ISO/ASTM, 2013), originalmente publicada como ASTM F2915-11.

Así, de acuerdo a estos organismos normativos, actualmente se reconocen siete grandes familias independientes de procesos de fabricación aditiva: fusión por haz de electrones, sinterización láser, estereolitografía, deposición de material extruido, impresión 3D, tecnología Polyjet y apilado de láminas de material. Estas pueden observarse en la Figura 3 (ASTM, 2010).

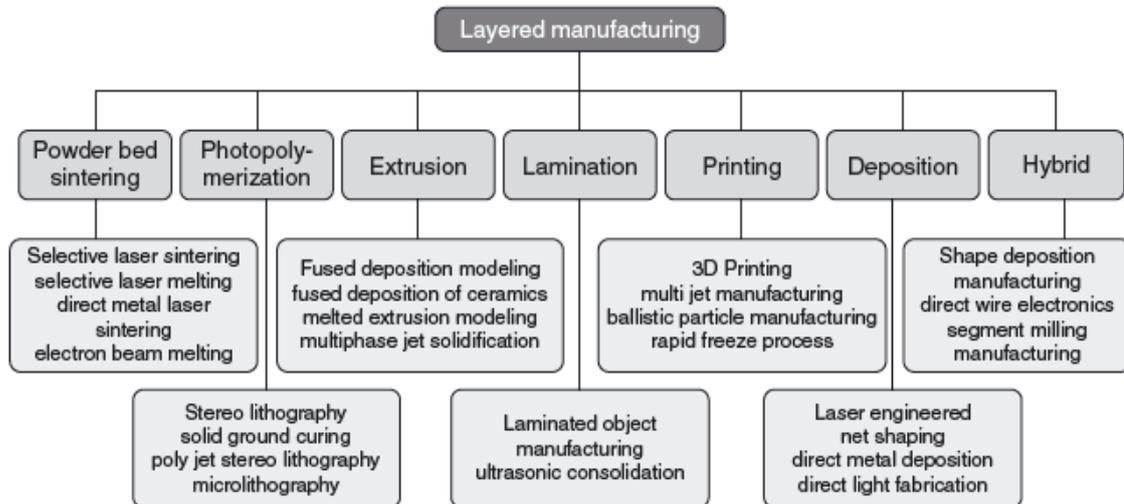


Figura 3 Tipos de impresión 3D

Otra posible clasificación más sencilla y simplificada, atendiendo al estado de los materiales de fabricación empleados, es la que se puede ver en la Tabla 1 (Albajez García, 2013).

Tabla 1 Clasificación alternativa de los tipos de impresión 3D

Lecho en polvos	Lecho líquido	Lecho sólido
<i>Selective Laser Sintering</i> (SLS)		
<i>Selective Mask Sintering</i> (SMS)	<i>Stereolithography</i> (SLA)	<i>Laminated Object Manufacturing</i> (LOM)
<i>Selective Laser Melting</i> (SLM)	<i>Direct Light Processing</i> (DLP)	<i>Fused Deposition Modelling</i> (FDM)
<i>Electron Beam Melting</i> (EBM)		
<i>3D Printers</i> (3DP)		

Algunas de las tecnologías anteriores aparecen descritas en el anexo A.1.

1.4 Tecnología de procesamiento digital de luz

Esta técnica, también conocida como DLP (*Digital Light Processing*) se utiliza sobre materiales líquidos, de la misma forma que la tan extendida estereolitografía (anexo A.1.2.1). El fundamento de ambas es similar, pero en este caso la imagen es proyectada de forma continua sobre un polímero líquido fotocurable (resina líquida sensible a la luz ultravioleta) durante un cierto periodo de tiempo.

Lo más importante de un sistema DLP es el funcionamiento del chip DMD (*Digital Micromirror Device*), compuesto por una matriz sobre la que se encuentran miles de microespejos (Figura 4) que pivotan para reflejar la luz incidente con mayor o menor intensidad (Vicente Martínez, 2013).

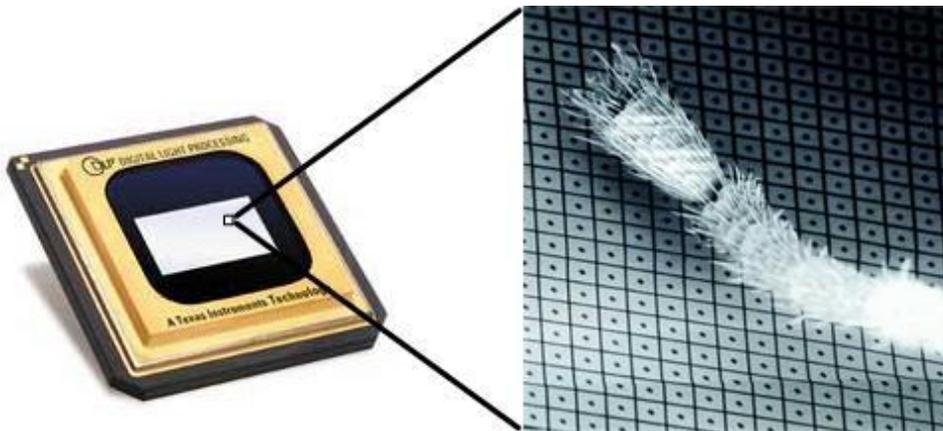


Figura 4 Imagen del chip DMD y de los microespejos que lo componen

Si dichos microespejos se inclinan hacia la fuente de luz de un sistema de proyección DLP, estarán encendidos; en cambio, si se alejan de ella permanecerán apagados. Este movimiento crea un píxel claro u oscuro en la superficie de proyección, generando diferentes escalas de grises y llegando a alcanzar 1024 grises diferentes (Texas Instruments, 2014).

Para agregar el color, se utiliza una rueda de color (Figura 5) que filtra la luz blanca generada por la fuente. Los colores a filtrar son tres: rojo, verde y azul. A partir de ellos se consigue completar el resto del espectro, llegando a obtenerse 16,7 millones de colores (Texas Instruments, 2014).

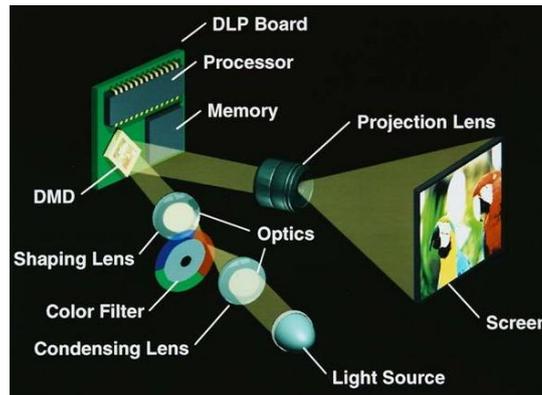


Figura 5 Esquema de un sistema DLP con rueda de color

Los estados de encendido y apagado de cada microespejo están coordinados con estos componentes básicos de color. Por ejemplo, un espejo responsable de proyectar un píxel de color púrpura solo reflejará la luz roja y azul a la superficie de proyección; luego, esos colores se mezclan para ver el matiz deseado en una imagen proyectada (Texas Instruments, 2014).

En algunos sistemas DLP, se utiliza una arquitectura de 3 chips (Figura 6), donde cada chip corresponde a un color. En estos casos, la luz se divide en los tres colores utilizando prismas y enviando cada haz al chip correspondiente, produciéndose la imagen en cada uno. Por último se vuelve a unir para conseguir la tonalidad deseada. Con este sistema se evita incluir la rueda de color y se consigue más brillo en la imagen (Vicente Martínez, 2013).

Este sistema se encuentra particularmente en proyectores de alta luminosidad que requieren aplicaciones de lugares grandes, como conciertos y cines. Estos sistemas son capaces de producir unos 35 trillones de colores (Texas Instruments, 2014).

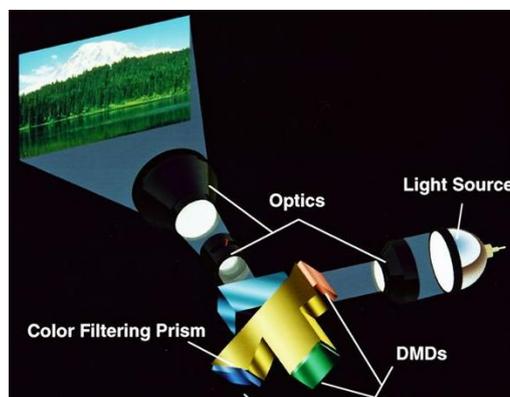


Figura 6 Esquema de un sistema DLP de tres chips



1.5 Sistemas de curación por energía

Los sistemas de curación por energía (Idacavage, 2012) hacen uso de la luz ultravioleta (entre 10 y 380 nm), visible (entre 380 y 780 nm), o electrones de alta energía para crear un recubrimiento, película o tinta. El tratamiento complementario consiste en una curación térmica, por evaporación o por oxidación.

Este tipo de curación supone grandes ventajas:

- Mayor productividad dado que el proceso se puede llevar a cabo en pocos segundos.
- Menores costes debido a la alta velocidad de curación y a la posibilidad de reciclaje de los recubrimientos formados.
- No se emiten compuestos orgánicos volátiles ya que no se usan disolventes en el proceso.
- El espacio requerido para llevar a cabo el proceso es menor que en los otros casos.
- Operatividad a temperatura ambiente en presencia de aire.
- Control preciso del comienzo de la polimerización (simplemente conectando la luz) y de su posterior desarrollo (controlando la intensidad de la luz).
- Menores costes energéticos (especialmente ahora con los altos precios del petróleo).

1.6 Curado por radiación ultravioleta

Esta tecnología por curado con luz ultravioleta (UV), sobrepasa ampliamente el tradicional curado térmico en lo que a rendimiento, coste, calidad del producto e impacto medioambiental se refiere (Interempresas, 2009).

Actualmente, este sistema en el que la luz induce a la polimerización de monómeros multifuncionales, está reconocido como el más efectivo para transformar una resina líquida en un producto polimérico altamente resistente de forma rápida y a temperatura ambiente (Interempresas, 2009).

El cambio de fase líquido-sólido puede seguirse por el método convencional a tiempo real por espectroscopia infrarroja (RTIR: *Real Time Infra-Red*), ya que permite seguir la desaparición del monómero reactivo al ser expuesto a la luz UV. Esta técnica



relaciona directamente por medio de curvas y en milisegundos, la conversión respecto al tiempo, en recubrimientos expuestos a radiación visible o UV (Interempresas, 2009).

Debido a sus notables ventajas, tanto en lo referente al proceso de fabricación como al producto en sí, esta tecnología ha encontrado una amplia aplicación, como el secado rápido de tintas y barnices o la utilización inmediata de adhesivos y materiales compuestos (Interempresas, 2009).

Las propiedades viscoelásticas y mecánicas de los polímeros curados por UV, pueden ser controladas con precisión a través de la estructura química y la funcionalidad del monómero utilizado (Interempresas, 2009).

1.7 Mecanismos de curación por luz ultravioleta

El endurecimiento de recubrimientos orgánicos por medio de luz se consigue, generalmente, por una reacción de polimerización llevada a cabo por distintos mecanismos (anexo A.2). Los que se utilizan a lo largo de este trabajo son los que utilizan radicales libres y los catiónicos (Idacavage, 2012).

- Polimerización por radicales libres. Tiene lugar a través de dobles enlaces (resinas acrílicas). El fotoiniciador absorbe luz ultravioleta y genera radicales libres con los dobles enlaces, causando una reacción en cadena y la consiguiente polimerización.
- Polimerización catiónica. Tiene lugar a través de grupos epoxy (resinas epoxy). El fotoiniciador absorbe luz ultravioleta y genera un ácido de Lewis que reacciona con grupos epoxy y se produce la polimerización.

La diferencia entre ambos mecanismos puede consultarse en la Tabla 2 (Idacavage, 2012).



Tabla 2 Diferencia entre fotopolimerización radical y catiónica

FOTOPOLIMERIZACIÓN	RADICAL	CATIÓNICA
Materias primas	Amplia variedad	Limitadas
Inhibición por oxígeno	Sí	No
Inhibición por humedad	No	Sí
Curación completa	En segundos	En horas
Contracción	Mayor	Menor
Adherencia	Menor	Mayor
Profundidad de curado	Mayor	Menor
Coste	Menor	Mayor
Cuota de mercado	92-94 %	6-8 %

Los primeros sistemas de fotopolimerización usados para la estereolitografía estaban basados en monómeros acrílicos, que polimerizaban a través de un mecanismo de radicales libres. Estos polímeros se caracterizan generalmente por su alta reactividad, aunque el oxígeno tiende a inhibir la reacción y eso conlleva una pérdida (Döhler, 2002).

La polimerización catiónica no está influenciada por la presencia de oxígeno y la falta de curación está limitada. Por ello, en estos momentos se utilizan monómeros fotopoliméricos de tipo catiónico en estereolitografía. Éstos suelen presentar una curación continua denominada "reacción oscura" ("*dark reaction*") que se da incluso una vez retirada la fuente de luz. En resinas basadas en componentes acrílicos, este efecto es insignificante (Esposito Corcione, et al., 2003).

A pesar de todas las ventajas que conlleva la fotopolimerización catiónica, casi todos los estudios realizados sobre la polimerización iniciada por radiación UV se han centrado en las reacciones llevadas a cabo por radicales libres. Posiblemente, esto es



debido a la falta de fotoiniciadores para dicho tipo de proceso que se conocen. La cinética de las reacciones que se llevan a cabo en una polimerización catiónica es muy compleja, y está muy afectada por la formulación de la resina que se vaya a utilizar (Esposito Corcione, et al., 2003).

1.8 Objetivos y alcance

El presente trabajo consiste en el estudio y caracterización de materiales susceptibles de ser utilizados en máquinas de fabricación aditiva basadas en tecnología DLP o procesamiento digital de luz. Este análisis se realiza tanto con materiales o resinas existentes en el mercado como con materiales de elaboración propia. Se analizan diferentes variables asociadas al proceso de impresión con los diferentes materiales, así como ciertas características mecánicas de las piezas finales fabricadas.

Las impresoras 3D con tecnología DLP utilizan un proyector para curar la resina, que se endurece a la exposición de la luz y va formando las capas que componen la pieza a fabricar. Para la realización del proceso de impresión 3D, se utiliza una impresora desarrollada en un proyecto anterior (López Pérez, 2014). El trabajo tiene un marcado carácter experimental puesto que se analizan diferentes variables del proceso y de comportamiento de los diferentes materiales objeto de estudio.

Una vez adquiridos ciertos conocimientos sobre diferentes programas necesarios para el manejo de la impresora 3D, se definen los materiales a utilizar y se realizan unas primeras pruebas para descartar las peores combinaciones. Se diseña la pieza o probeta a desarrollar y se fabrica tanto con los materiales propios seleccionados como con materiales comerciales. En este punto, se analizan diversos parámetros a controlar en la impresión de las piezas. Dichos parámetros se miden, y se estudia su dependencia con las variables configurables del proceso. Con esto se consigue obtener la relación que presenta mejor resultado en la pieza final. Finalmente, se analizan diferentes propiedades sobre las piezas fabricadas para poder realizar una comparación entre ellas.

2 DESARROLLO

En este apartado se detallan todos los aspectos relacionados con el proceso experimental llevado a cabo. Por un lado, se exponen algunas características propias de dicho proceso; por otro lado, se detallan los pasos seguidos durante la realización del estudio.

2.1 Tecnología a utilizar

Durante el desarrollo de este trabajo, se va a hacer uso de la tecnología DLP dado que, para la realización de los experimentos, se va a emplear una impresora desarrollada en un proyecto anterior (López Pérez, 2014) basada en dicha tecnología.

El problema en los dispositivos DLP es que poseen filtros ultravioleta para proteger el chip DMD, ya que esta radiación acorta su vida útil. En la Figura 7 se puede observar uno de esos filtros, tras la ruleta de color.

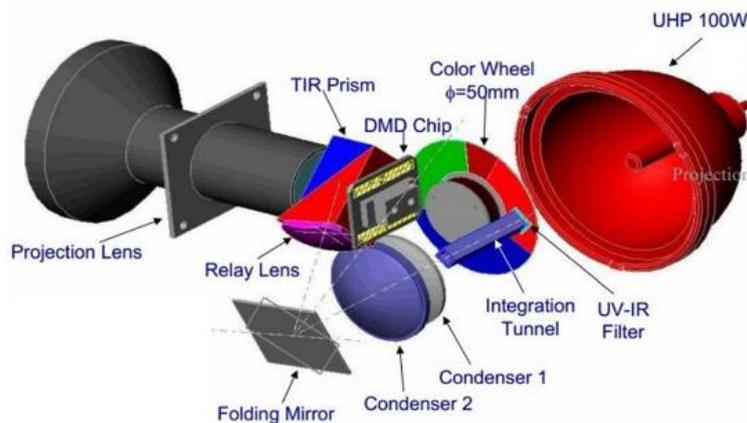


Figura 7 Esquema del interior de un proyector DLP

Aparte del filtro mostrado en la Figura 7, las lámparas suelen llevar otro filtro incorporado para asegurar la protección de los usuarios y del propio sistema DLP.

Durante el procedimiento experimental, se utiliza un proyector DLP de la marca *acer x1311kw*, que utilizan fuente de luz LED. Esto supone un problema, dado que estos proyectores tienen un espectro de emisión muy limitado. La emisión se produce en tres colores para evitar tener que separarlos. Estos tres colores están distribuidos en rojo (625 nm), verde (530 nm) y azul (470 nm). Todos ellos se encuentran distanciados de la radiación ultravioleta (380 nm), por lo que según el fotoiniciador utilizado, se podrán observar cambios en el proceso de curación (López Pérez, 2014).



2.2 Sistema de curación por luz ultravioleta

Una formulación típica de una resina de curado por UV (Idacavage, 2012) se puede esquematizar tal como se muestra en la Figura 8.

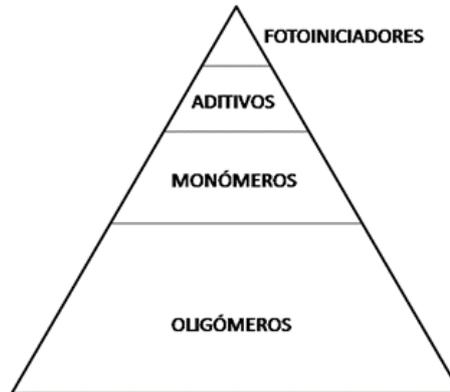


Figura 8 Componentes de un sistema de curación

A continuación se definen cada uno de los componentes que se observan en la figura anterior:

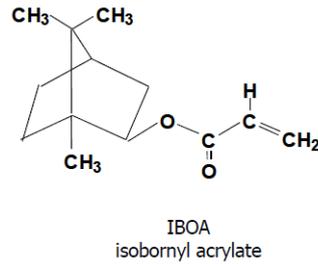
- Oligómeros. Son moléculas cuyos radicales asociados son distintos entre sí (tienen un número finito de monómeros). Los polímeros, en cambio, son moléculas con dos o más radicales de una misma especie (con un número ilimitado de monómeros). Se observan algunos ejemplos en la Tabla 3 (Idacavage, 2012).

Tabla 3 Tipos de oligómeros

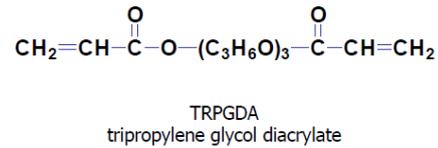
Metacrilatos	Características
Epoxis	Curación rápida, duro, resistente a los disolventes, menor coste
Uretanos alifáticos	Flexible, duro, mejores propiedades a la intemperie
Uretanos aromáticos	Flexible, duro, más baratos que los alifáticos
Poliéster	Baja viscosidad, buenas propiedades en contacto con el agua
Acrílicos	Buenas propiedades a la intemperie
Resinas especiales	Adherencia, aplicaciones especiales

- Monómeros. Son moléculas relativamente simples, capaces de reaccionar con ellas mismas o con sustancias semejantes para construir polímeros o macromoléculas. Existen gran cantidad de monómeros según el número de grupos funcionales que poseen (Figura 9) (Idacavage, 2012).

Monofunctional Monomer



Difunctional Monomer



Trifunctional Monomer

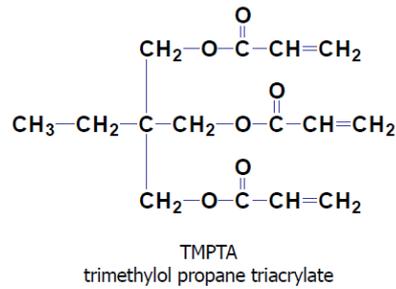


Figura 9 Ejemplos de diferentes monómeros

En función de las propiedades que se deseen alcanzar en la pieza final, se considerarán monómeros distintos (Figura 10) (Idacavage, 2012).

	Velocidad de curación	Reducción de viscosidad	Flexibilidad	Adherencia	Material sin curar
Monofuncionales	↓	↑	↑	↑	↑
Difuncionales					
Trifuncionales y siguientes					

Figura 10 Selección de monómeros según las propiedades requeridas

Si, en la elección del monómero, la velocidad de curación se toma como factor determinante, se ha de tener en cuenta que usando monómeros monofuncionales como diluyente, se conseguirá una curación más completa pero más lenta, respecto a los di- o trifuncionales. Esto es debido al aumento de movilidad molecular en el polímero blando producido.

- Aditivos. En este grupo entran componentes como pigmentos, rellenos, ayudantes de deslizamiento, agentes humectantes o mateantes...
- Fotoiniciadores. El fotoiniciador juega un papel clave, controlando por una parte el grado de iniciación de la reacción así como la penetración de la luz incidente y, por consiguiente, la profundidad de curado. El grado de polimerización depende de la reactividad del grupo funcional, de la viscosidad de la resina y naturalmente de la intensidad de la radiación UV. Algunas de sus características son (Idacavage, 2012):
 - Absorbe luz UV para formar especies activas (radicales o ácidos).
 - Se añade a un monómero u oligómero para empezar el proceso de curación (reacción de polimerización en la que se obtiene una red polimérica).
 - Sólo reacciona con energía ultravioleta-visible, no con calor.
 - Cada fotoiniciador absorbe luz a diferentes longitudes de onda. Por ello, lo ideal es conseguir que la lámpara UV emita lo más cerca posible de la longitud de onda máxima ($\lambda_{\text{máx}}$) propia del fotoiniciador (longitud de onda a la que el fotoiniciador absorbe la mayor cantidad de energía) para obtener el mayor rendimiento posible (Figura 11).

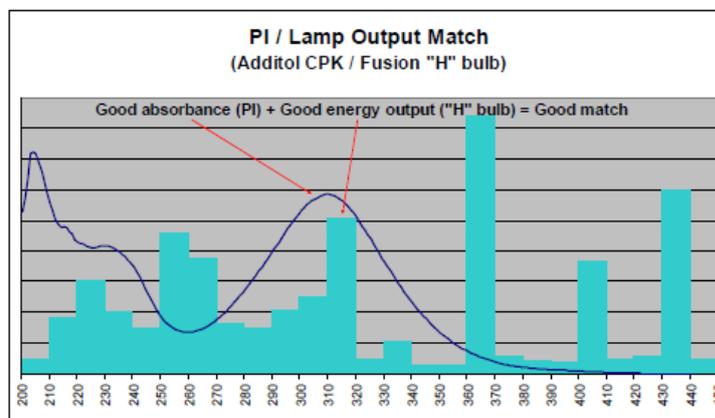


Figura 11 Representación de la intensidad de emisión de la lámpara y absorbancia del fotoiniciador a diferentes longitudes de onda

Existen diferentes criterios para seleccionar el fotoiniciador adecuado en cada caso: sus características de absorción y el sistema con el que se está trabajando, pigmentación, espectro de la lámpara UV, inhibición de oxígeno, resistencia a la intemperie (color amarillo), manejo (líquido contra sólido), toxicidad, coste (Idacavage, 2012).

2.3 Etapas de la polimerización radical por UV

Durante el proceso de polimerización por radicales libres iniciado por luz ultravioleta, se pueden distinguir tres etapas tal y como se observa en la Figura 12 (Idacavage, 2012):

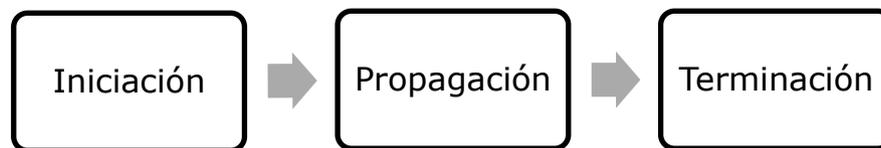


Figura 12 Esquema del proceso de polimerización por UV

- **Iniciación:** se aporta energía al sistema y se crean especies reactivas. El fotoiniciador absorbe parte de dicha energía y forma uno o más radicales libres (fase de disociación). Después, uno de ellos se combina con un monómero para formar un nuevo radical que será la especie activa en el polímero que se está creando (fase de reacción). La polimerización por UV se da sólo en las áreas que permanecen iluminadas (es muy difícil curar en zonas de sombra).
- **Propagación:** oligómeros y monómeros se combinan creando una red polimérica de mayor peso molecular a través de una reacción en cadena. Durante esta etapa no hay cambio en el número de radicales: se forman en la etapa de iniciación y desaparecen en la etapa de terminación (Figura 13).

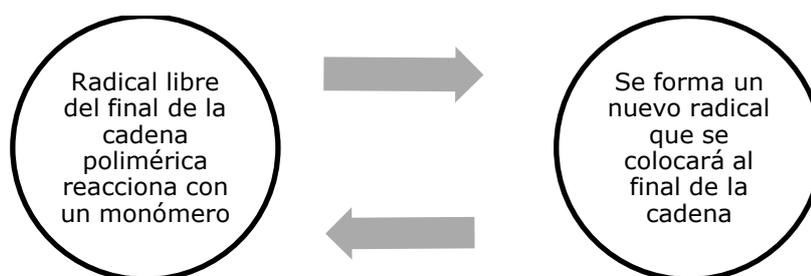


Figura 13 Esquema de la etapa de propagación en la polimerización por UV

- Terminación: dos radicales (especies activas, cadenas en crecimiento o fragmentos de fotoiniciador) se combinan para detener la reacción en cadena. Si la concentración de fotoiniciador es demasiado alta, puede suponer mayor cantidad de material sin reaccionar o con unas propiedades físicas inferiores a las requeridas.

2.4 Materiales

En este apartado se recogen todos los materiales que van a ser utilizados a lo largo del proceso experimental.

2.4.1 *Materiales comerciales*

Tras una amplia búsqueda en la red sobre los materiales que se comercializan en el ámbito de la tecnología DLP, se encontraron tres fabricantes principales: *B9Creations* (B9 Creations, 2015), *MadeSolid* (MadeSolid, 2015) y *Spot-A Materials* (Spot-A Materials, 2013). Las características de dichos productos se pueden consultar en el anexo A.3.

Teniendo en cuenta tanto sus características como su precio, se ha decidido adquirir y hacer pruebas con las tres resinas de *Spot-A Materials* que aparecen en la Figura 14. Todas sus fichas de datos de seguridad se pueden encontrar en la página web del fabricante (<http://spotamaterials.com/technical-docs/>).



Figura 14 Fotografías de los envases de las resinas comerciales seleccionadas

2.4.2 *Materiales propios*

Para llevar a cabo el proceso de fotopolimerización deseado hacen falta, tal y como se ha visto, dos elementos principales: monómeros (o resinas) y fotoiniciadores (Pandey, 2014).

A la hora de decidir qué materiales se iban a estudiar, se decidió partir de los elegidos en el proyecto existente (Vicente Martínez, 2013) y, tras buscar en bibliografía, añadir algún otro componente a la lista.

2.4.2.1 *Resinas*

Los monómeros son pequeñas moléculas que, al juntarse con otros monómeros, oligómeros o polímeros, forman nuevos polímeros.

Normalmente, los fotopolímeros contienen monómeros en su estructura basados en acrilatos o metacrilato. En el proceso de polimerización, se pueden encontrar dos tipos de monómeros: monofuncionales o multifuncionales (Tabla 4) (Pandey, 2014). Los multifuncionales pueden actuar como diluyentes y como agentes de entrecruzamiento; mientras que los monómeros monofuncionales pueden ser, o bien diluyentes, o bien agentes de entrecruzamiento.

Tabla 4 Ejemplos de monómeros

Monómeros monofuncionales	Monómeros multifuncionales
Ácido acrílico (<i>Acrylic acid</i>)	Triacrilato de trimetilolpropano (<i>Trimethylopropane triacrylate</i>)
Ácido metacrílico (<i>Methacrylic acid</i>)	Triacrilato de trimetilolpropano etoxilado (<i>Ethoxylated trimethylopropane triacrylate</i>)
Acrilato de isodecilo (<i>Isodecyl acrylate</i>)	Trimetacrilato de trimetilolpropano (<i>Trimethylepropane trimethacrylate</i>)
N-vinilpirrolidona (<i>N-vinyl pyrrolidone</i>)	Diacrilato de hexanodiol (<i>Hexanediol diacrylate</i>)

Aunque en algunos casos se apunta que la fotopolimerización se lleva a cabo con monómeros multifuncionales, se ha querido comprobar qué resultados supone el uso de monómeros monofuncionales. Por esta razón, se incluirán en el estudio tanto el acrilato de isodecilo (*Isodecyl acrylate*) como el triacrilato de trimetilolpropano (*Trimethylolpropane triacrylate*).

2.4.2.2 Fotoiniciadores

Los fotoiniciadores convierten la energía de la luz en energía química formando radicales libres o cationes tras exponerlos a luz ultravioleta. Por acción de dicha radiación, se rompen en varias partes, y por lo menos una de ellas reacciona con los monómeros u oligómeros existentes en la mezcla.

Pueden encontrarse en la naturaleza o pueden ser sintetizados químicamente, y son sensibles a una cierta longitud de onda (Tabla 5) (Pandey, 2014).

Tabla 5 Ejemplos de fotoiniciadores

Fotoiniciadores que dan radicales libres	Fotoiniciadores catiónicos
Isopropil tioxantona (<i>Isopropylthioxanthone</i>)	Sales de diariliodonio (<i>Diaryliodonium salts</i>)
Benzofenona (<i>Benzophenone</i>)	Sales de triarilsulfonio (<i>Triarylsulfonium salts</i>)
Azobis isobutil nitrilo-2,2 (<i>2,2-azobisisobutyronitrile</i>)	

Dentro de los procesos de curación por luz, el componente más importante es el fotoiniciador de la reacción de polimerización que se lleva a cabo por radicales libres (Meereis, et al., 2014). Tras estudiar las ventajas de dicha reacción, se ha decidido optar por el estudio de un fotoiniciador que da radicales libres como es la benzofenona (*benzophenone*).



2.4.3 Selección de materiales

Tras todas las consideraciones realizadas en los apartados anteriores, se tienen cinco resinas y cuatro fotoiniciadores (Tabla 6) que se combinan para crear las distintas mezclas que serán expuestas a la luz.

En el anexo A.4 se pueden encontrar los enlaces web tanto a las hojas técnicas como a las fichas de seguridad de todos los compuestos elegidos.

Tabla 6 Compuestos seleccionados

Resinas		Fotoiniciadores	
Compuesto	Denominación	Compuesto	Denominación
Diacrilato de polietilenglicol	Resina I (R.I)	Óxido de fenil bis (2,4,6-trimetilbenzoil) fosfina	BAPO
Diacrilato de bisfenol A	Resina II (R.II)	HNU-470 IL	IL
Diacrilato de hexanodiol - 1, 6	Resina III (R.III)	HNU-470 LT	LT
Acrilato de isodecilo	Resina IV (R.IV)	Benzofenona	BPH
Triacrilato de trimetilolpropano	Resina V (R.V)		

2.5 Preparación de mezclas

En este apartado se describe todo el proceso llevado a cabo para preparar las diferentes mezclas que se utilizarán como material de impresión.



2.5.1 Toma de muestras

Para la preparación de las mezclas, basta con aplicar la [Ec. 1]:

$$\frac{\text{Concentración de resina}}{\text{Concentración de fotoiniciador}} = \frac{\text{Masa de resina}}{\text{Masa de fotoiniciador}} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Ambas concentraciones van a venir dadas de antemano por lo que, conociendo la cantidad de fotoiniciador (preferiblemente, dado que es el componente más sensible de la mezcla) se tendrá la cantidad necesaria de resina que se ha de tomar.

2.5.2 Seguridad

En las hojas de seguridad de los compuestos a tratar, aparecen ciertos rasgos de toxicidad o irritabilidad. Por esta razón, las mezclas se realizarán en una campana extractora y se deberán llevar guantes durante dicho proceso. Como en cualquier trabajo en laboratorio, será necesario el uso de bata y gafas de seguridad.

2.5.3 Material a utilizar

- Balanza de precisión, dado que los porcentajes vienen dados en peso.
- Botes de vidrio color ámbar.
- Embudo de vidrio.
- Espátula.
- Jeringuillas desechables.
- Vaso de precipitados.
- Vidrio de reloj.

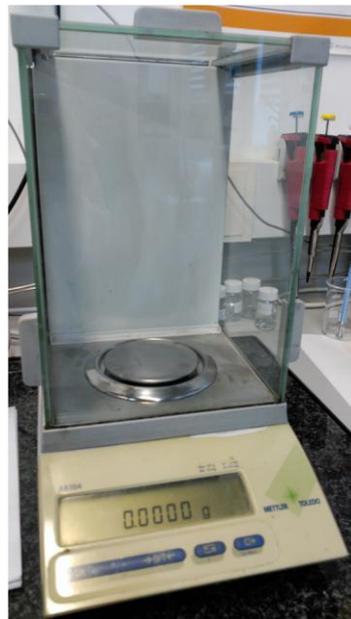
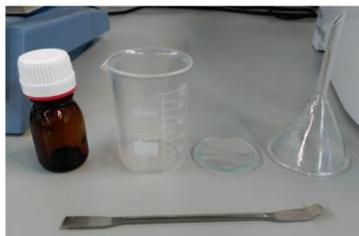


Figura 15 Fotografías del material utilizado en el laboratorio



2.5.4 Desarrollo experimental

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, se van a tratar compuestos que necesitan una fuente de radiación para iniciar la reacción química. Por esta razón, durante este proceso de preparación de muestras, se utilizan botes de vidrio color ámbar para evitar que cualquier radiación externa afecte al contenido de los mismos.

Se tienen dos fotoiniciadores líquidos y otros dos en forma de polvo, por lo que deberán tratarse de forma distinta:

- Sólidos. Primero se debe tarar la balanza con un vidrio de reloj en su interior. Con ayuda de una espátula, se pesa una determinada cantidad de fotoiniciador que posteriormente se añade, usando un embudo de vidrio, al bote ámbar que contendrá la mezcla final.
- Líquidos. Dado que la cantidad de fotoiniciador a emplear suele ser pequeña, se puede tarar la balanza con el bote ámbar y añadir dicho material directamente utilizando para ello una jeringuilla.

Una vez se tiene la cantidad de fotoiniciador, se calcula la masa de resina necesaria según la [Ec. 1]. Se pone un vaso de precipitados sobre la báscula y se vuelve a tarar, añadiendo posteriormente resina hasta tener la cantidad deseada. En este paso se puede hacer uso de una jeringuilla desechable. Finalmente, sólo queda transferir la resina al bote ámbar que ya contiene el fotoiniciador y mezclar los componentes. Para ello, basta con agitar la mezcla con ayuda de una varilla de vidrio.

2.6 Conocimientos previos

Como ya se ha indicado, la impresión 3D consiste en la reproducción de objetos con volumen a partir de un prototipo diseñado por ordenador. En este proceso de fabricación, se van añadiendo capas muy finas de material que se solidificarán hasta formar la pieza final. Por ello, una vez que se tiene la pieza diseñada en un programa de CAD, se debe separar en capas con otro programa para que éstas se emitan sucesivamente.

En este caso, todas las piezas realizadas se han diseñado con *Solid Edge* y después se ha utilizado *Magics 19.01* para dividirla en capas y obtener de esta manera un archivo con la extensión `".stl"`.

Una vez se tiene dicho archivo, se ha de convertir a una extensión `".mat"` dado que el código de impresión está escrito en *Matlab*.

En el anexo A.5 se detalla el tanto el funcionamiento de los distintos programas nombrados como un ejemplo del proceso que se ha seguido hasta proceder a la impresión de piezas.

2.7 Iniciación

En el lugar de trabajo se encontraron mezclas que sobraron del proyecto anterior (Vicente Martínez, 2013). Se decidió trabajar con ellas en un primer momento para comprender así el programa del que se disponía, a base de hacer pruebas modificando los diversos parámetros existentes. Estos datos se pueden encontrar en el anexo A.6.

2.8 Metodología

Para la obtención de las piezas, en primer lugar se delimita el área de trabajo (Figura 16) según las dimensiones de las mismas para no desperdiciar material. Después, se llena la cuba con la mezcla a utilizar y se proyecta la forma deseada durante un cierto periodo de tiempo. Una vez que cesa la proyección, se extrae la pieza solidificada del baño líquido con ayuda de unas pinzas, y se deja secar sobre papel absorbente. Este proceso se repite varias veces hasta que se agote el líquido de la cuba. Una vez que la pieza está seca, se puede medir su espesor con ayuda de un pie de rey (Figura 17).

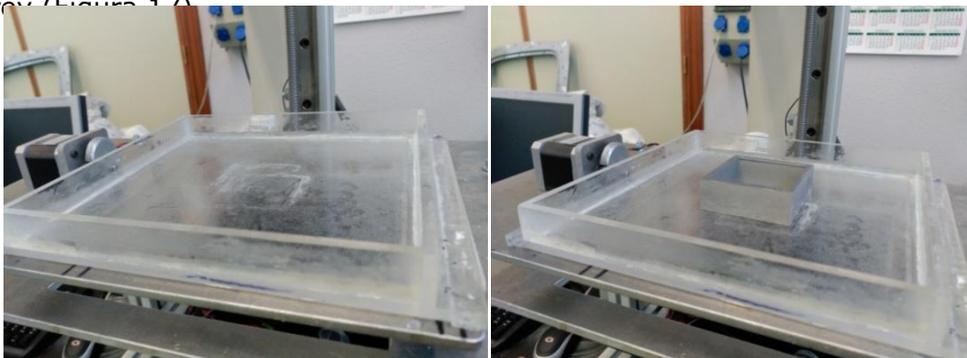


Figura 16 Fotografías de la cuba en la se depositará la resina líquida fotocurable



Figura 17 Fotografía del pie de rey utilizado para medir espesores



2.9 Primera fase

Una vez definido el funcionamiento y comportamiento del sistema, se iniciaron los ensayos con las nuevas mezclas y con los materiales comerciales.

En esta ocasión se pretendía analizar los tiempos de curación de cada una de las mezclas disponibles, determinando para cada una de ellas el tiempo mínimo de exposición de luz necesario para la solidificación de una única capa.

Para este primer contacto, y siguiendo las hojas técnicas de los fotoiniciadores seleccionados (anexo A.4), se fijó una concentración en peso del 5 % de los mismos en las mezclas a realizar. Este dato no se pudo obtener en el caso de la benzofenona, pero se optó por extrapolarlo en un principio y observar el comportamiento de las mezclas pertinentes.

En un primer momento se fijó un tiempo de exposición en torno a 20 segundos. Según el comportamiento de la mezcla, dicho tiempo se aumentaba o disminuía.

Una vez obtenidas unas cuatro o cinco piezas según el caso, tras dejarlas secar midió el espesor de las mismas. De esta forma se podría conseguir una primera relación entre el tiempo de exposición y el espesor de capa obtenido. Todos estos datos quedan recogidos en el anexo A.7.

Tras analizar los resultados, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Ninguna de las cuatro mezclas preparadas con la resina IV lograban curar tras estar 400 segundos expuestas a la luz. Por esta razón, en la siguiente fase se optó por aumentar el porcentaje de fotoiniciador en la mezcla hasta un 8 %.
- De la misma forma, las cinco mezclas que contenían benzofenona como fotoiniciador tampoco curaban tras 400 segundos, por lo que también se aumentó el porcentaje de dicha sustancia a un 8 %.
- Con las mezclas realizadas que contenían el fotoiniciador HNU-470 IL, se obtuvieron piezas tras un tiempo mínimo de exposición de luz de un minuto. Para intentar disminuir este tiempo, se prepararon mezclas al 8 %. Se dio la misma situación con el fotoiniciador HNU-470 LT. La diferencia entre ambos radicaba en el aspecto final de las piezas pero aún así, estas mezclas no se descartaron y se siguió con su estudio.
- Las mezclas que mejor resultado generaron fueron las que contenían el fotoiniciador BAPO. A parte de obtener piezas en un corto periodo de tiempo (entre 10 y 20 segundos), el aspecto final se acercaba al deseado. En este



caso, para la siguiente fase se decidió disminuir el porcentaje de fotoiniciador hasta un 2 % para intentar disminuir tanto el tiempo de exposición como la cantidad de fotoiniciador, intentando mantener la calidad de la pieza final.

2.10 Segunda fase

Vistas las conclusiones sacadas de los primeros ensayos, el siguiente paso consistió en aumentar o disminuir la cantidad de fotoiniciador presente en las mezclas, según el caso.

La metodología de trabajo a seguir fue exactamente la misma que en el apartado anterior, y los datos de espesor respecto al tiempo obtenidos quedan reflejados en el anexo A.1.

Tras llevar a cabo estos ensayos se sacaron las siguientes conclusiones:

- Ni las mezclas preparadas con la resina IV ni las que contenían benzofenona como fotoiniciador al 8 % curaron tras 400 segundos de exposición, por lo que ambos componentes fueron descartados definitivamente.
- En el caso de los fotoiniciadores HNU-470 IL y HNU-470 LT, se consiguió disminuir el tiempo mínimo al que curaban las mezclas al 8 %.
- Sin embargo, las mezclas realizadas con BAPO al 2 % no implicaban que disminuyera el tiempo mínimo de exposición, y el aspecto final de las piezas era similar al obtenido con las mezclas al 5 %.

2.11 Elección de las mejores mezclas

Una vez que se tenían todas las piezas fabricadas, se hizo una primera selección de las que resultaban mejores a simple vista. En este caso, los factores a tener en cuenta fueron la propia opinión del alumno y la fragilidad de las piezas.

De esta forma, se escogieron once mezclas que quedan reflejadas en la Tabla 7.

Tabla 7 Resultados obtenidos con las mejores mezclas

Mezcla	Tiempo de exposición
IL + R.II 5 %	180 s
IL + R.V 5 %	150-180 s
BAPO + R.II 5 %	20-40 s
BAPO + R.V 5 %	10 s
LT + R.II 5 %	60 s
LT + R.V 5 %	30-60 s
BAPO + R.V 2 %	15 s
IL + R.V 8 %	120-115 s
IL + R.II 8 %	100-120 s
LT + R.I 8 %	20-40 s
LT + R.V 8 %	30-25 s

2.11.1 *Materiales propios*

Dado que todavía se tenían demasiadas mezclas para analizar, se introdujo un criterio de selección adicional: el tiempo de curación. Dado que las pruebas que se estaban llevando a cabo eran sólo a una capa, el tiempo necesario para obtenerla no podía ser muy alto. Por esta razón, se eliminaron aquellas mezclas que precisaran un tiempo de más de 60 segundos.

De esta forma, sólo seis de todas las combinaciones preparadas tenían posibilidades para formar parte de la impresión de una pieza completa en tres dimensiones (Tabla 8).



Tabla 8 Resultados obtenidos con las mezclas elegidas

Mezcla	Tiempo de exposición
BAPO + R.II 5 %	20-40 s
BAPO + R.V 5 %	10 s
LT + R.V 5 %	30-60 s
BAPO + R.V 2 %	15 s
LT + R.I 8 %	20-40 s
LT + R.V 8 %	30-25 s

2.11.2 *Materiales comerciales*

Respecto a las resinas comerciales (Tabla 9), sólo una de las tres adquiridas proporcionaba un tiempo de exposición menor a 60 segundos. Por lo tanto, a partir de ahora la resina Spot-LV se denominará "resina comercial".

Los datos sobre estos ensayos se encuentran en el anexo A.9.

Tabla 9 Resultados obtenidos con las resinas comerciales

Resina	Tiempo de exposición
Spot-GP	60-100 s
Spot-HT	120-150 s
Spot-LV	8-60 s

2.12 Ensayos de repetibilidad

Con las seis mezclas propias elegidas, se realizan nuevas pruebas de repetibilidad, por si se tuviera que descartar alguna otra antes de la impresión de piezas formadas por varias capas.



Todas las mezclas se van a someter a los mismos tiempos de exposición de luz, y este proceso se repite varias veces. Después se mide el espesor de las distintas piezas obtenidas.

Se realizaron piezas en tres días distintos y, tal y como puede observarse en los datos recogidos en el anexo A.10, no existe una relación entre ellos.

Este hecho hizo que se considerase la influencia de nuevos factores y se planteara otro método de trabajo. En cualquier caso, esto no afectaría al aspecto final de las piezas, por lo que la elección de las mezclas no se ve afectada.

2.12.1 Factores influyentes

Dado que se trata de una curación por luz, se consideró la posibilidad de que la propia iluminación de la zona de trabajo pudiera afectar a la reacción de polimerización. Por ello, se realizaron ensayos tapando la cuba en la que se estaba imprimiendo la pieza, y después dejándola expuesta a la luz para ver las diferencias.

Otro factor, probablemente el más influyente, era el tiempo que la mezcla líquida estaba expuesta a la luz. En algunos casos, esta no solidificaba, pero con esto no era posible afirmar que no hubiera comenzado el proceso de curación, aunque no hubiera concluido. De esta forma, al realizar varias piezas en el mismo baño, una vez curada la primera, parte del líquido ya habría empezado a curar, y la reacción finalizaría cuando se emitiera la segunda capa creando, además, esta segunda.

Este hecho implica que el espesor de la segunda capa (y siguientes) no se crea en el tiempo indicado por el usuario en el programa, sino que el tiempo de exposición es mayor; pero es imposible controlar esa variable. Por ello se optó por depositar menor cantidad de mezcla sobre la cuba y limpiarla cada vez que se obtuviera una pieza para comprobar este efecto.

2.12.2 Ensayos aclaratorios

Con los ensayos indicados en el apartado anterior se busca caracterizar la influencia de factores externos, por lo que las conclusiones resultantes de los mismos se cumplen independientemente de la mezcla que se esté utilizando. Debido a una abundante cantidad de mezcla disponible, se decidió usar la mezcla R.II + BAPO 5 %.

Para poder comparar resultados, todas las pruebas se realizaron durante un tiempo de exposición de luz intermedio (30 segundos).



Los resultados de estos ensayos se pueden consultar en el anexo A.11 y las conclusiones obtenidas fueron las siguientes:

- Las piezas expuestas a la luz de la zona de trabajo presentan un espesor algo menor (-0,0175 y -0,0200 mm) respecto a las que se les niega dicho foco.
- Tal y como se esperaba, al cambiar la metodología de trabajo y realizar una única pieza cada vez, los datos pasan a ser repetibles y el problema quedaba resuelto.

2.13 Caracterización de mezclas

Una vez modificado el método de trabajo, se volvieron a realizar los anteriormente comentados "ensayos de repetibilidad" para definir completamente la relación entre el tiempo de exposición y el espesor de capa obtenido con cada una de las mezclas seleccionadas.

Tras unas pruebas, además de con la resina comercial, se decidió trabajar finalmente con las siguientes combinaciones obtenidas:

- R.I + HNU LT 8 %
- R.V + HNU LT 8 %
- R.V + BAPO 5 %
- R.II + BAPO 5 %

De esta forma se espera obtener las siguientes diferencias entre las piezas que se imprimirán en tres dimensiones:

- Comportamiento del fotoiniciador LT al 8 % con R.I y R.V
- Comportamiento del fotoiniciador BAPO al 5 % con R.II y R.V
- Comportamiento de R.V con cada uno de los fotoiniciadores

Todos los datos y gráficos obtenidos para cada mezcla se muestran en el anexo A.12. En la Figura 18 se pueden observar las curvas características obtenidas para cada una de las mezclas analizadas.

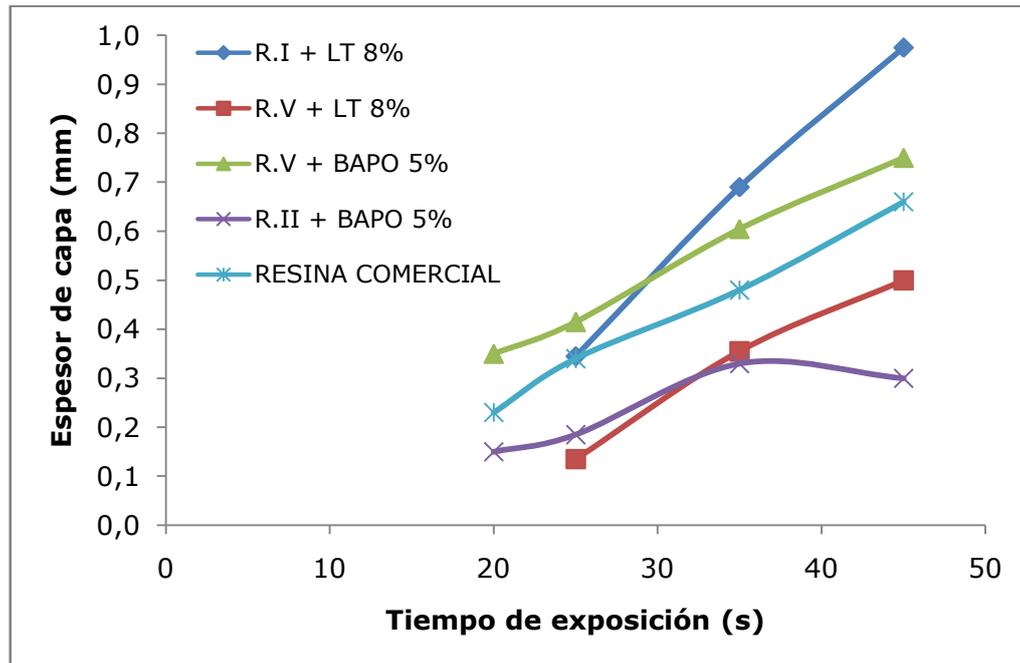


Figura 18 Gráficas características de todas las mezclas analizadas

Tomando como referencia la curva característica de la resina comercial, se observa que tiene gran similitud con las de las mezclas que contienen la resina V. Por esta razón, se espera que estas dos mezclas sean las que mejores resultados den una vez se impriman piezas en tres dimensiones.

Observando dichas gráficas se observa que, ante una misma resina (R.V), al utilizar el fotoiniciador HNU-470 LT, se obtienen espesores de capa menores. Esto puede suponer un problema según el diseño de la pieza que se desee imprimir. Sería necesario dividir el modelo en más capas y, por tanto, el tiempo total de la impresión aumentaría.

Sólo una de las mezclas no sigue la tendencia lineal que sería característica en este tipo de impresión 3D. Con la mezcla R.II + BAPO 5 % se alcanza un espesor de capa máximo de 0,3 mm. Esto, como ya se ha comentado, puede dar problemas.

2.14 Impresión en 3D

Una vez definido el comportamiento de cada una de las mezclas propias capa a capa, se procede a la impresión de dos figuras diferentes en tres dimensiones para poder compararlas con el material comercial disponible. Se han elegido dos diseños:



- Pirámides: permitirá comprobar que todas las capas se crean de acuerdo a lo establecido tanto en los parámetros de impresión como en el diseño original de la pieza.
- Probetas: permitirá el posterior ensayo de las piezas para poder determinar ciertas propiedades mecánicas de las mismas.

2.14.1 Metodología

En primer lugar se realiza una puesta a punto de la impresora (Figura 19). En este caso se quieren averiguar los parámetros para los cuales la impresora funciona proporcionando piezas de las dimensiones deseadas. Este proceso se realiza mediante ensayos prueba-error, dando valores aproximados hasta encontrar el correcto que nos permite imprimir.



Figura 19 Impresora 3D con tecnología DLP

En la primera prueba realizada se busca que la pieza quede adherida a la placa superior con la fuerza suficiente para mantener el peso de la misma. Por ello, se deberá asignar un tiempo de exposición mayor a la primera capa.

También se debe determinar la posición inicial de la bandeja, según el espesor de capa deseado. Se comienza por comprobar la altura de la bandeja, para ello se asignan valores de modo que no colisione con la cuba. El valor obtenido tras diversas pruebas es de 150 mm (aunque el programa permite modificarlo, este es el valor aconsejado).

Para determinar el resto de parámetros comunes a todas las impresiones se hicieron pruebas con el material comercial, modificando tanto el tiempo de exposición adicional de la primera capa, como el de las capas posteriores.

El tiempo de proyección de la primera capa es independiente de las demás; esto es debido a que buscamos que la resina se cure sobre el aluminio con fuerza suficiente para soportar el peso de la pieza. Este viene definido en el programa y hay que meterse en el código del mismo para poder cambiarlo.

De entre todas las combinaciones posibles, la que mejores resultados mostró con la resina comercial fue la siguiente:

- Tiempo por capa: 25 segundos
- Tiempo extra primera capa: 15 segundos
- Espesor de capa: 0,5 mm

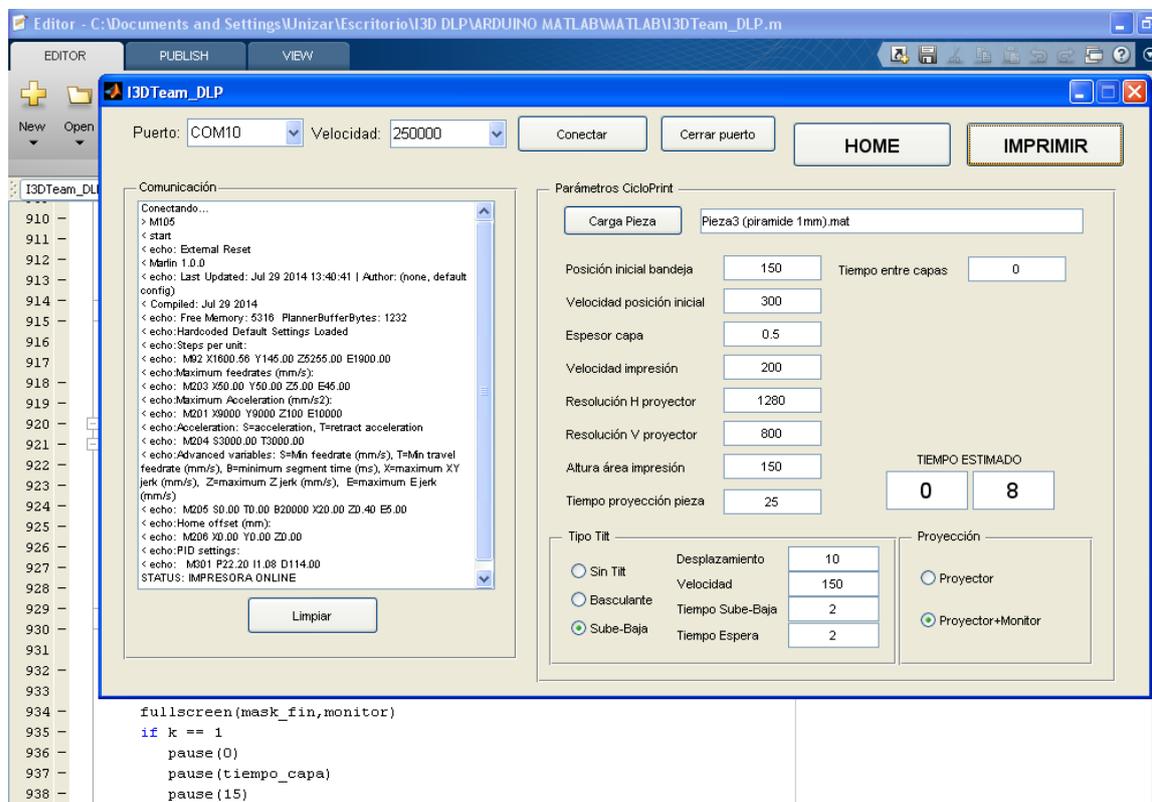


Figura 20 Parámetros de impresión

Una vez definidos dichos parámetros (Figura 20), se procede a la impresión de diferentes piezas en tres dimensiones con el resto de mezclas que siguen siendo objeto de estudio.

2.14.2 Pirámides

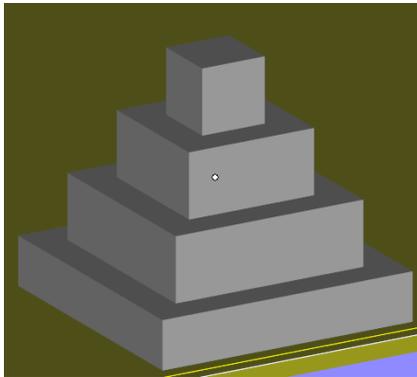


Figura 21 Diseño CAD de una pirámide en 3D

En un principio se decidió dividir la pieza de la Figura 21, en cuatro únicas capas para agilizar el proceso.

Este ensayo no se pudo realizar con una de ellas: BAPO + R II 5 %. En este caso, la segunda capa no quedaba fijada a la primera, por lo que descartó dicha mezcla dado que no permitía construir piezas en tres dimensiones. El resto de resultados obtenidos se pueden consultar en el anexo A.13.

Con este mismo diseño, se propuso dividir la pieza inicial en capas de 1 mm para comprobar si todas las capas se seguían imprimiendo con el espesor indicado. Tal y como indicaba el diseño original de la pieza, su base medía 3 mm de alto y el resto de escalones, 4 mm. De esta forma, se debía proyectar tres veces la forma de mayores dimensiones y cuatro veces cada una de las sucesivas.

En el anexo A.14 se encuentran todas las medidas realizadas. Se puede comprobar que, efectivamente, todas las capas creadas tienen el espesor requerido (0,5 mm) si la impresión se realiza con las mezclas propias. En cambio, en el caso del material comercial depende de la pieza realizada, los resultados no son repetibles.

2.14.3 Probetas

En primer lugar, se diseñaron las probetas que se iban a ensayar según la norma UNE-EN ISO 527-2:2012 (AENOR, 2012). De todas las que se nombran en dicho documento, se ha escogido el tipo 1BA por las dimensiones de la cubeta de la impresora. Para aprovechar tanto el material como el tiempo de impresión, se ha decidido imprimir varias probetas al mismo tiempo.

Los parámetros de impresión a configurar serán los mismos que en pruebas anteriores, ya que en este caso también se va a dividir la pieza en capas de 0,5 mm cada una.

Una vez se tienen las probetas, se procede a su ensayo (anexo A.15). Se va a realizar un tipo de ensayo mecánico estático: ensayos de tracción (Figura 22). Todos los datos obtenidos pueden consultarse en el anexo A.17.

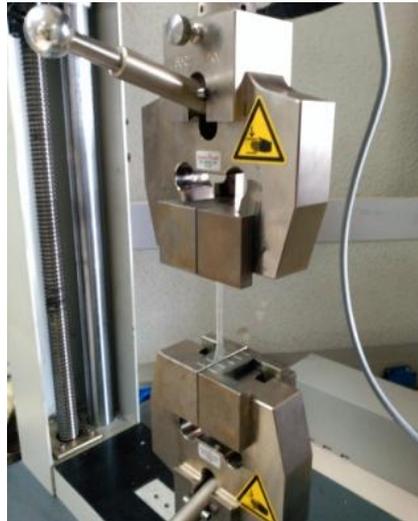


Figura 22 Fotografía de la máquina utilizada para realizar los ensayos de tracción

Una vez ensayadas todas las probetas, se determinan distintas propiedades mecánicas de cada una de las mezclas analizadas (Tabla 10).

Tabla 10 Resultados de los ensayos de tracción

TRACCIÓN	R.V + BAPO	R.V + LT	R.I + LT	RESINA
	5 %	8 %	8 %	COMERCIAL
h (mm)	1,88	1,25	1,66	1,94
b (mm)	6,53	6,66	6,39	6,29
A_o (mm²)	12,26	8,37	11,09	12,24
F_{máx} (N)	54,35	59,38	9,36	73,12
σ^M (MPa)	4,45	7,28	0,80	6,01
ε^M (%)	0,77	1,41	1,14	1,06
E (kPa)	5,44	5,72	1,01	5,76



Ante unas probetas de sección similar, la única que quedaría descartada sería la fabricada con la mezcla R.I + LT 8% dado que mucho más frágil que las demás. Esto limita notablemente el campo de aplicación de dicha mezcla.

La mezcla R.V + BAPO 5 %, aunque tiene propiedades semejantes a las que ofrece la resina comercial, tiene una menor resistencia a la tracción.

Basándose únicamente en los resultados obtenidos, no cabe duda de que la mezcla que mejores resultados da es la formada por R.V + LT 8 % (mejores incluso que el material comercial). Aunque la diferencia no es muy grande, el material de creación propia tiene una mayor resistencia a la tracción y sufre una mayor deformación antes de romperse.



3 CONCLUSIONES

Hoy en día, los fabricantes de impresoras 3D poseen sus propios materiales de impresión. En principio, esto puede considerarse una ventaja dado que dicho producto no va a ocasionar ningún problema durante el proceso de fabricación de piezas.

Cuando se utilizan dichos materiales en impresoras que no son comerciales, tal y como se estudia en este trabajo, pueden surgir algunas complicaciones. No se puede asegurar que un material diseñado para un modelo concreto de impresora, ofrezca las mismas propiedades en otros dispositivos con características similares.

Por ello, el objetivo de este Trabajo Fin de Grado consiste en estudiar y caracterizar distintos materiales que pudieran ser utilizados en un prototipo de máquina de fabricación aditiva basada en la tecnología de procesamiento digital de luz (DLP).

Considerando que las resinas fotocurables utilizadas en este tipo de impresión 3D constan de dos elementos básicos (monómero y fotoiniciador), se decide obtener compuestos de elaboración propia, y comparar los resultados obtenidos con una resina disponible en el mercado.

Los factores que afectan a este tipo de impresión en tres dimensiones son muy diversos. El principal es la fuente de radiación, dado que en este caso no es sencillo ajustar la absorbancia máxima del fotoiniciador con la intensidad de la fuente de luz ultravioleta empleada. Además, es complicado controlar que la radiación proporcionada por el proyector sea la única que interviene en la reacción de polimerización. Aunque no se pueden considerar tan relevantes, también se han de tener en cuenta factores como la temperatura o la iluminación de la zona de trabajo.

Tras unas primeras pruebas de iniciación para conocer el funcionamiento de la impresora, se prepararon en el laboratorio todas las mezclas posibles con los materiales seleccionados disponibles. Inicialmente, la cantidad de fotoiniciador presente en todas las mezclas fue de un 5 % en peso (según recomendaciones de los fabricantes). Una vez obtenidos los resultados, se modificó la proporción de fotoiniciador a un 2 % o a un 8 % (según el caso), con el objetivo de descartar todas aquellas mezclas que no solidificaran en un corto periodo de tiempo.

Tras realizar unos ensayos de repetibilidad con las seis combinaciones elegidas y cambiar la metodología de trabajo, se procedió a la caracterización de cuatro de ellas. Estas permitirían comparar el comportamiento de un fotoiniciador frente a dos resinas distintas, y viceversa.



Una vez que se empezaron a imprimir piezas en tres dimensiones, debido a las diferentes características de los distintos materiales, fue complicado encontrar una configuración común para todos los ensayos y obtener resultados que permitiesen la comparación.

Se realizaron pruebas para comprobar que el espesor de capa generado coincidía con el especificado en el programa. Tres de las mezclas propias analizadas (R.I + LT 8 %, R.V + LT 8 % y R.V + BAPO 5 %) dieron excelentes resultados, al contrario que la resina comercial, con la que no se pudieron obtener datos repetibles. La mezcla R.II + BAPO 5 % fue descartada por no alcanzar el espesor requerido en el tiempo estimado, impidiendo la superposición de capas.

Con el objetivo de averiguar alguna característica mecánica de los materiales, se decidió realizar ensayos de tracción a probetas fabricadas con las mezclas que seguían siendo objeto de estudio.

En esta fase, solo una de las mezclas propias fue descartada por generar piezas mucho más frágiles que el resto de materiales. Cualquiera de las otras podría aceptarse como material válido para impresión. Incluso una de ellas R.V + LT 8 % posee mayor resistencia a la tracción que la resina comercial.

Dado que existen gran cantidad de materiales susceptibles de ser utilizados en este tipo de impresoras, las combinaciones que podrían estudiarse en un futuro serían infinitas; pero se debe considerar la posibilidad de que el proceso de caracterización de las mismas puede llegar a resultar complejo y laborioso.



4 BIBLIOGRAFÍA

3Dilla. 2014. [En línea] 9 de marzo de 2014. [Citado el: 2 de noviembre de 2015.] <http://es.3dilla.com/impresora-3d/>.

AENOR. 2012. *Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión (ISO 527-2:2012)*. Madrid : Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2012.

Albajez García, José Antonio. 2013. *Desarrollo, optimización, modelado y compensación de un sistema de impresión 3D basado en el uso de materiales fotopolimerizables*. Zaragoza : s.n., 2013.

Area Tecnología. 2012. [En línea] 24 de septiembre de 2012. [Citado el: 2 de noviembre de 2015.] <http://www.areatecnologia.com/informatica/impresoras-3d.html>.

ASTM. 2010. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. West Conshohocken : ASTM International, 2010. ASTM F2792-10.

B9 Creations. 2015. [En línea] 29 de mayo de 2015. [Citado el: 2 de noviembre de 2015.] <http://www.b9c.com/shop/materials>.

BQ. 2014. [En línea] 14 de julio de 2014. [Citado el: 2 de noviembre de 2015.] <http://store.bq.com/es/kit-prusai3>.

Döhler, Hardi. 2002. *Improved Cure Speed and Efficiency of UV Curing Systems Using Silicone Acrylates*. Goldschmidt, Alemania : s.n., octubre de 2002.

Esposito Corcione, C., Greco, A. and Maffezzoli, A. 2003. *PHOTOPOLYMERIZATION KINETICS OF AN EPOXY BASED RESIN FOR STEREOLITHOGRAPHY* Calorimetric analysis : s.n., 2003, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 72, pp. 687-693.

Idacavage, Mike J. 2012. *Introduction to the Basics of UV/EB Chemistry and Formulations*. 27 de September de 2012.

Impresoras 3D. 2013. [En línea] 18 de marzo de 2013. [Citado el: 2 de noviembre de 2015.] <http://www.impresoras-3d.info/>.

Impresoras 3D. 2013. *Historia*. [En línea] 19 de marzo de 2013. [Citado el: 2 de noviembre de 2015.] <http://www.impresoras-3d.info/historia-de-las-impresoras-3d/>.

Interempresas. 2009. [En línea] 1 de julio de 2009. [Citado el: 2 de noviembre de 2015.] <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/32435-Curado-ultrarrapido-por-radiacion-UV.html>.



ISO/ASTM. 2013. *Standard specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.1.* Ginebra : International Standard, 2013. ISO/ASTM 52915:2013 (E).

ISO/ASTM. 2013. *Standard terminology for additive manufacturing—Coordinate systems and test methodologies.* Ginebra : International Standard, 2013. ISO/ASTM 52921:2013 (E).

López Pérez, Javier. 2014. *Diseño de una impresora 3D con tecnología DLP.* Zaragoza : Escuela de Ingeniería y Arquitectura, 2014.

MadeSolid. 2015. [En línea] 3 de mayo de 2015. [Citado el: 2 de noviembre de 2015.] <http://shop.madesolid.com/pages/printer-settings#2generalresin>.

Meereis, Carine T.W., et al. 2014. BAPO as an alternative photoinitiator for the radical polymerization of dental resins : s.n., 2014, Dental materials , pp. 945–953.

Pandey, Ramji. 2014. Photopolymers in 3D printing applications. Helsinki : s.n., 2014.

Spot-A Materials. 2013. [En línea] 31 de agosto de 2013. [Citado el: 2 de noviembre de 2015.] <http://spotamaterials.com/product-category/photo-resins/>.

Texas Instruments. 2014. [En línea] 16 de octubre de 2014. [Citado el: 2 de noviembre de 2015.] <http://www.ti.com/dlp-technology/es/technology/how-dlp-works/default.htm>.

Vicente Martínez, José Juan. 2013. *Diseño de sistema de fabricación aditiva y caracterización del proceso de fotocurado de resina mediante tecnología DLP.* Zaragoza : Escuela de Ingeniería y Arquitectura, 2013.



ANEXOS





A.1 TIPOS DE IMPRESIÓN 3D

Existen varias formas de conseguir generar un objeto en tres dimensiones, pero lo más común es separar el modelo 3D en capas muy delgadas que se imprimirán una a una encima de la otra.

Siguiendo este modelo de capas, se pueden distinguir diversos métodos en función de los materiales (plástico, polvo...) que se utilizan o el principio por el cual se solidifican dichas capas.

A.1.1 Tecnologías de deposición de material plástico

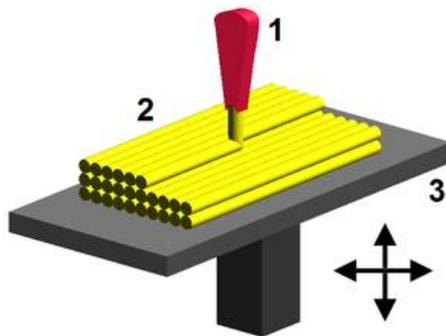
En este grupo se describen dos técnicas de modelado por fusión y deposición de material plástico. Ambas son equivalentes, la diferencia radica en el término utilizado para denominarlas.

A.1.1.1 FDM (*Fusion Deposition Modeling*)

Esta técnica aditiva fue fundada y patentada a finales de los años 80, y permite generar piezas utilizando comúnmente materiales termoplásticos como el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) o bien PLA (poliácido láctico).

El modelado por deposición de material fundido, tal y como indica su nombre, consiste en depositar polímero fundido sobre una base plana, capa a capa. La impresión comienza desde la capa inferior, creando la base para poder separar la pieza.

El material, que inicialmente se encuentra en estado sólido almacenado en bobinas, es calentado en el extrusor hasta su punto de fusión y expulsado dando lugar a hilos muy finos que se van enfriando y solidificando conforme van tomando la forma de cada capa (Figura 23).



1. Extrusor
2. Material depositado
3. Ejes de movimiento

Figura 23 Deposición de material fundido

El movimiento del cabezal extrusor va dando forma a cada una de las capas, y para realizar la siguiente capa, éste se ha de desplazar verticalmente una determinada distancia según el espesor de capa requerido (cuanto más finas sean las capas, mejor será la calidad final de la impresión).

Según la complejidad de la pieza final, en ocasiones es necesario crear varios soportes que serán eliminados a posteriori.

A.1.1.2 FFF (Fused Filament Fabrication)

Debido a la patente de la tecnología anterior, nació la denominada FFF (fabricación con filamento fundido). Este término fue acuñado por la comunidad de miembros del proyecto RepRap para disponer de una terminología que pudieran utilizar legalmente sin limitaciones. El fundamento es exactamente el mismo que en el caso de la FDM.

La ventaja principal es que esta tecnología ha permitido poner la impresión 3D al alcance de cualquier persona. Aunque los resultados pueden ser muy buenos, no suelen ser comparables con los que ofrecen las impresoras 3D por estereolitografía, por ejemplo.

Estos objetos se suelen medir en centímetros (no pueden ser muy grandes) pero algunas impresoras llegan a varios metros. Además es un proceso lento: para un objeto de 100 gramos algo complejo, pueden ser necesarias varias horas. También se ha de tener en cuenta que los materiales que usan no son baratos.

A.1.2 Tecnologías de impresión 3D con láser

En este grupo entran la estereolitografía y el sinterizado selectivo por láser. Con ellas se consigue una mayor precisión de las piezas impresas y requieren menor tiempo de impresión (mayor velocidad).

A.1.2.1 SLA (Stereolithography)

La estereolitografía fue la primera en utilizarse, nació antes que las de deposición de material plástico (FDM y FFF).

En esta ocasión, se parte de una base que se va sumergiendo capa a capa en un baño de un polímero líquido fotocurable (resina líquida sensible a la luz). Un láser de luz ultravioleta activa la curación de la resina líquida, y la solidifica. Después, la base se desplaza hacia abajo para que el láser vuelva a ejercer su acción, así hasta que el objeto alcance la forma deseada (Figura 24). De esta forma se consiguen piezas con gran detalle aunque, igual que en el caso anterior, se desperdicia material si es necesario hacer soportes que posteriormente serán eliminados.

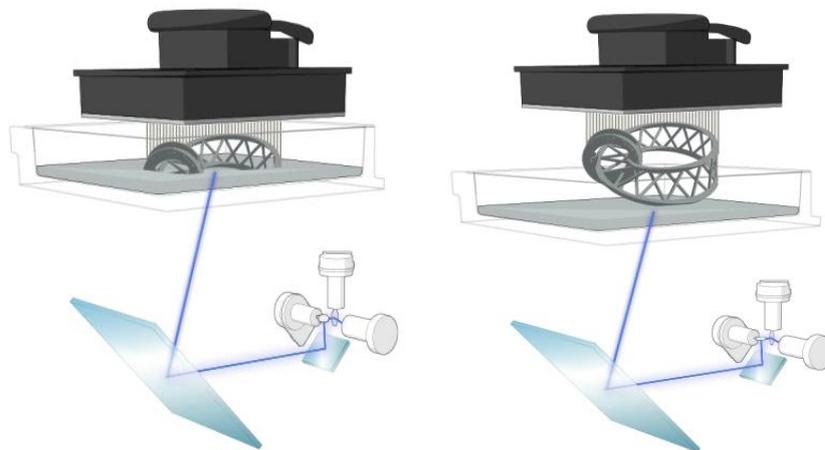


Figura 24 Impresión mediante estereolitografía

La estereolitografía es el proceso de prototipado rápido más extendido para la fabricación de objetos a partir de modelos CAD en tres dimensiones. El análisis de la cinética de la reacción de polimerización inducida por el haz de luz será la clave para determinar los tiempos de curación necesarios para las capas que formarán la pieza final.



A.1.2.2 SLS (Selective Laser Sintering)

El sinterizado selectivo por láser comparte fundamento con la SLA, pero permite utilizar un gran número de materiales en forma de polvo (poliestireno, cristal, nylon, materiales cerámicos o metálicos).

En este caso el láser impacta en el polvo, funde el material y se solidifica (sinterizado). El material que no se utiliza, se almacena en el mismo lugar donde inició la impresión, por lo que sirve de soporte. Una vez retirados, este material puede ser reutilizado y no se desperdicia nada. Esta es una ventaja respecto al resto de tecnologías nombradas.

A.1.3 Otras técnicas

A.1.3.1 Digital Light Processing (DLP)

De la misma forma que la estereolitografía, esta técnica se utiliza sobre materiales líquidos. El fundamento de ambas es similar, pero en este caso la imagen es proyectada de forma continua sobre la resina fotocurable durante un cierto periodo de tiempo.

A.1.3.2 PolyJet photopolymer

Se trata de un sistema parecido a una impresora habitual, pero en lugar de inyectar gotas de tinta en el papel, inyectan capas de fotopolímero líquido que se pueden curar en la bandeja de construcción (Figura 25). Fue desarrollado por Objet.

Un fotopolímero líquido se expulsa y entonces se solidifica gracias a una luz ultravioleta creando la pieza capa a capa. En teoría, esta tecnología permitiría hacer uso de distintos materiales y colores de manera simultánea capa a capa.



Figura 25 Impresora Objet de la zona de trabajo

A.1.3.3 Syringe Extrusion

Hace uso de cualquier tipo de material en formato cremoso o viscoso y se hace uso de un extrusor (caliente o no según el material a utilizar), situando el material en la posición adecuada.

A.1.3.4 Selective Laser Melting (SLM)

Similar a SLS, pero derrite el material en polvo en lugar de sólo fundirlo a baja temperatura. Es equivalente a Electron Beam Melting (EBM) que utiliza un haz de electrones en lugar de un láser UV para derretir el polvo.

A.1.3.5 Laminated Object Manufacturing (LOM)

Distintas capas de material (papel adhesivo, plástico o láminas de metal) son situadas una encima de otra, se pegan con resina/pegamento y son cortadas con la forma apropiada con ayuda de un láser.





A.2 REACCIONES DE POLIMERIZACIÓN

Se denomina polimerización a la reacción química por la cual compuestos de bajo peso molecular (monómeros), forman enlaces químicos entre sí dando lugar a una macromolécula lineal o tridimensional, denominada polímero.

Se pueden distinguir dos tipos de polimerización:

- En cadena: la molécula entera de monómero pasa a formar parte del polímero, por lo que no se forman subproductos.
- Escalonada: se parte de monómeros que contienen grupos funcionales ($-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$), y se unirán a través de ellos.

En el proceso estudiado se llevan a cabo reacciones de polimerización en cadena, por lo que se va a proceder a explicar con más detalle en qué consiste dicho mecanismo.

A.2.1 Polimerización en cadena

Como ya se ha indicado, en la polimerización en cadena, la molécula entera de monómero pasa a formar parte del polímero, evitando así la formación de subproductos.

Lo habitual, son los monómeros mono-sustituidos, pero también es posible partir de monómeros di, tri, e incluso tetra-sustituidos. El monómero suele tener un doble enlace, casi siempre $\text{C}=\text{C}$, también puede ser $\text{C}=\text{O}$ aunque no es tan normal. Estos monómeros pueden reaccionar individualmente o en presencia de otros monómeros (co-polimerización).

La polimerización en cadena consta de una secuencia de reacciones (iniciación, propagación y terminación) distintas y bien definidas.

En la etapa de iniciación es necesario añadir una sustancia llamada iniciador que genera una especie reactiva (radical, anión o catión), la cual reacciona con el monómero, abriendo su doble enlace y formando una nueva especie reactiva (radical o ion), que a su vez es capaz de transmitir su reactividad a otras unidades monoméricas mediante reacciones sucesivas y que constituye la etapa de propagación. Consecuentemente, se alcanzan rápidamente altos pesos moleculares, las especies



propagantes terminan por destrucción de esa reactividad mediante diferentes procesos que constituyen la etapa de terminación.

Hay diferentes tipos de iniciadores, en función de la especie reactiva que se genera en la etapa de disociación:

- Iniciadores que dan radicales libres
- Iniciadores iónicos (catiónicos y aniónico)
- Iniciadores catalíticos

A.2.1.1 Polimerización por radicales libres

Se hace uso de iniciadores que dan radicales libres. Éstos pueden obtenerse por tres métodos distintos:

- Método térmico: por efecto de la temperatura se rompen los enlaces del iniciador y se generan dos radicales por cada molécula de iniciador. La energía de activación (E_a) para la reacción de disociación del iniciador es alta, para bajas temperaturas de operación la reacción de disociación será lenta.
- Método redox: producen radicales mediante procesos de oxidación-reducción.
- Método fotoquímico: la radiación visible y ultravioleta ($\lambda=200-800$ nm) se utiliza para producir radicales a baja temperatura.

La cinética de estas reacciones de polimerización en cadena por radicales libres depende principalmente de: la concentración de monómero, iniciador, la temperatura, y esta a su vez de la constante cinética global.

A.2.1.2 Polimerización iónica

Es también una polimerización en cadena, pero la especie reactiva es un ion. Se usa menos porque es una polimerización más selectiva. En función del tipo de ion, la polimerización iónica puede ser catiónica o aniónica.

- Polimerización catiónica. El iniciador es un ácido que en la disociación da como especie reactiva cationes. Esta polimerización tiene una energía de activación negativa, es decir, está favorecida a muy bajas temperaturas.
- Polimerización aniónica. El iniciador es de tipo básico que en la disociación da como especie reactiva aniones. Normalmente se lleva a cabo en disolución.

Este proceso no está muy afectado por la temperatura, por lo que se suele trabajar a temperatura ambiente.

A.2.1.3 Polimerización catalítica

La polimerización catalítica se desarrolla como una solución a las dificultades que había en la obtención del poliolefinas isotácticas. Conlleva simultáneamente el desarrollo de catalizadores estereoespecíficos como los Ziegler-Natta basados en $(C_2H_5)_3Al$ mezclados con cloruros de titanio ($TiCl_4$, $TiCl_3$). En la actualidad se están desarrollando nuevos catalizadores basados en Zr y Ti (metallocenos) y otros basados en Fe y Co.

El proceso se puede llevar a cabo de tres formas:

1) Proceso homogéneo: En disolución, utilizando catalizadores líquidos.

2) Proceso heterogéneo: Con catalizadores sólidos de muy pequeño tamaño de partícula. La polimerización tiene lugar en la superficie de la partícula de catalizador que queda ocluido dentro de la partícula de polímero que se está formando. Normalmente son catalizadores muy activos y la cinética no es importante. No es necesario separar el polímero del catalizador.

3) Proceso en fase gas. Es el caso de la obtención del polietileno, el reactor es un lecho fluidizado (como muestra la Figura 26), el agente fluidizante es el propio monómero que se recircula de forma continua, y el sólido que fluidiza es el polímero (polietileno) que se está formando y en su interior queda ocluido el catalizador, por ello hay que alimentarlo también en continuo.

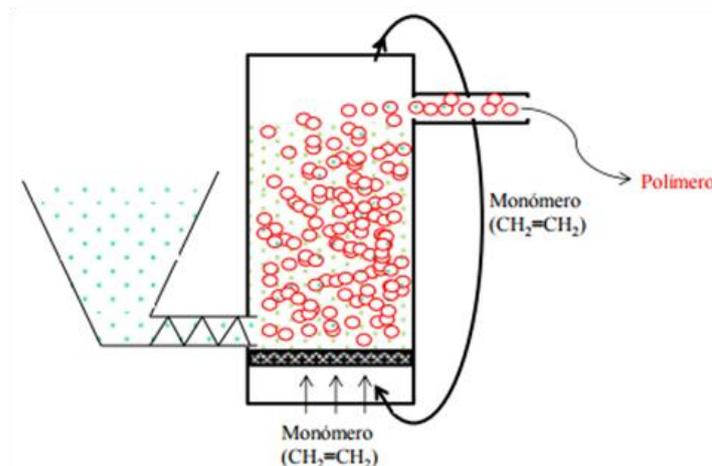


Figura 26 Proceso de obtención del polietileno en fase gas





A.3 MATERIALES COMERCIALES

Tras una amplia búsqueda en la red sobre los materiales que se comercializaban en el ámbito de la tecnología DLP, se encontraron tres fabricantes principales.

A.3.1 *B9 Creations*

Estas resinas moldeables (Tabla 11) tienen como característica común y principal que las piezas fabricadas aceptan una posterior fase de pintado y se pueden usar para crear moldes de caucho vulcanizado.

Tabla 11 Características de los productos de *B9 Creations*

	<i>B9R-1-Cherry Resin</i>	<i>B9R-1-Red Resin</i>	<i>B9R-2-Black Resin</i>
Resolución XY	30 µm	50-100 µm	30-100 µm
Espesor de capa	30-50 µm	70-100 µm	30-204 µm
Precio (1 kg)	117 €	107 €	189 €
Características	Ideal para crear capas finas y conseguir detalles más nítidos	Ideal para crear capas más gruesas y ofrecer impresiones más rápidas	Permite imprimir capas gruesas para obtener resultados rápidos y otras más finas para los detalles.

A.3.2 *MadeSolid*

A.3.2.1 *VOREX RESIN*

- Aumento de la dureza, mayor flexión y resistencia al impacto.



- La combinación de flexibilidad y durabilidad hace esta resina ideal para prototipos de joyas (pulseras, anillos...).
- Compatible con variedad de impresoras SLA/DLP, incluyendo *Form1* + y *B9 Creator*.
- Negro o translúcido naranja en botellas de 1 litro (135 \$).

A.3.2.2 CASTSOLID RESIN

Este tipo de resina está diseñado específicamente para ser utilizada en procesos de fundición. Se pueden distinguir dos etapas durante el proceso de impresión: la primera etapa es la combustión inicial de la resina (donde se elimina la mayoría de material), y la segunda etapa sirve para eliminar cualquier carbono residual de la primera.

- Fiabilidad probada en capas de 25 a 100 micras.
- Su baja viscosidad permite un manejo más fácil y una mejor limpieza de las piezas impresas.
- Formulado para no dejar ceniza o residuo después de la quemadura.
- Compatible con una gran variedad de impresoras SLA/DLP, incluyendo *Form1*, *Spark*, *LittleRP*, *B9 Creator*, *Kudo* (sin recubrimiento de teflón) y *Asiga*.
- Tamaño: 1 Litro (275 \$), 500 ml (150 \$), 250 ml (89 \$).
- Si la impresión se queda blanda o esponjosa, se debe exponer a más luz ultravioleta para endurecerla.

A.3.2.3 MS RESIN

- Tamaño: 1 botella de un litro (100 \$) | Botella de 500 ml (59 \$)
- Menos viscosa que la mayoría de otras resinas y más fácil de trabajar y limpiar.
- Colores disponibles: azul, rojo, negro y blanco. Se ha de tener en cuenta que tanto el blanco como el azul son difíciles de afinar en las impresoras DLP, pero son perfectos para SLA. Por ello, se recomienda el uso de negro o rojo para impresoras que utilicen la tecnología DLP.
- Compatible con un gran número de impresoras SLA/DLP, incluyendo el *Form1*, *B9 Creator* y *Little SLA*.



A.3.3 *Spot-A Materials*

Estas resinas líquidas que se endurecen tras su exposición a una ventana dada de luz, visible o ultravioleta. Estas resinas se curan rápidamente dando lugar a polímeros con una amplia gama de propiedades disponibles.

A.3.3.1 *Spot-GP*

Ideal para imprimir grandes cantidades de piezas u objetos grandes a un precio razonable, manteniendo otras propiedades como la velocidad de curado, dureza y claridad. Además posee una baja viscosidad y tensión superficial, y es posible elegir entre una paleta de colores limitada.

Esta es la resina permite la impresión con un producto asequible (68 €/kg) sin necesidad de actuaciones específicas. También es ideal para configuraciones de impresora que necesitan grandes cantidades de resina, por lo que una baja viscosidad es un factor clave.

A.3.3.2 *Spot-HT*

Este es el producto idóneo si se busca mayor dureza, resistencia al impacto, resistencia a la abrasión, resistencia a la intemperie, resistencia química e incluso al agua.

Por un precio razonable (72 €/kg), se aumenta la velocidad de curado (minimizando los riesgos para la salud) y se, mantiene una baja viscosidad.

A.3.3.3 *Spot-LV*

Este producto mantiene la misma reactividad y propiedades similares a la resina Spot- GP (así como su precio: 72 €/kg) pero con una viscosidad mucho más baja (por debajo de 50 MPa·s o cps).

Además, esta resina tiene una coloración muy clara, que, junto con un fotoiniciador específico se puede utilizar para crear impresiones claras de vidrio.





A.4 DOCUMENTOS DE LOS MATERIALES PROPIOS

A.4.1 Diacrilato de polietilenglicol (R.I)

- Enlace a hoja técnica:

http://www.sigmaaldrich.com/Graphics/COFAInfo/SigmaSAPQM/SPEC/43/437444/437441-BULK_____ALDRICH__.pdf

- Enlace a fichas de seguridad:

<http://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=ES&language=es&productNumber=437441&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=http%20%3A%20%2F%20%2Fwww.sigmaaldrich.com%20%2Fcatalog%20%2Fsearch%20%3Finterface%20%3DAI%20%26term%20%3D437441%20%26N%20%3D0%20%26focus%20%3Dproduct%20%26lang%20%3Des%20%26region%20%3DES>

A.4.2 Diacrilato de bisfenol A (R.II)

- Enlace a hoja técnica:

http://www.sigmaaldrich.com/Graphics/COFAInfo/SigmaSAPQM/SPEC/41/413550/413550-BULK_____ALDRICH__.pdf

- Enlace a fichas de seguridad:

<http://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=ES&language=es&productNumber=413550&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=http%20%3A%20%2F%20%2Fwww.sigmaaldrich.com%20%2Fcatalog%20%2Fsearch%20%3Fterm%20%3D413550%20%26interface%20%3DAI%20%26N%20%3D0%20%26mode%20%3Dmatch%20%2520partialmax%20%26lang%20%3Des%20%26region%20%3DES%20%26focus%20%3Dproduct>



A.4.3 Diacrilato de hexanodiol - 1, 6 (R.III)

- Enlace a hoja técnica:

https://www.sigmaaldrich.com/Graphics/COFAInfo/SigmaSAPQM/SPEC/24/246816/246816-BULK_____ALDRICH__.pdf

- Enlace a fichas de seguridad:

<https://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=ES&language=es&productNumber=246816&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=https%20%3A%20%2F%20%2Fwww.sigmaaldrich.com%20%2Fcatalog%20%2Fsearch%20%3Fterm%20%3D246816%20%26interface%20%3DAI%20%26N%20%3D0%20%26mode%20%3Dmatch%20%2520partialmax%20%26lang%20%3Des%20%26region%20%3DES%20%26focus%20%3Dproduct>

A.4.4 Acrilato de isodecilo (R.IV)

- Enlace a hoja técnica:

https://www.sigmaaldrich.com/Graphics/COFAInfo/SigmaSAPQM/SPEC/40/408956/408956-BULK_____ALDRICH__.pdf

- Enlace a fichas de seguridad:

<https://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=ES&language=es&productNumber=408956&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=https%20%3A%20%2F%20%2Fwww.sigmaaldrich.com%20%2Fcatalog%20%2Fsearch%20%3Fterm%20%3D408956%20%26interface%20%3DAI%20%26N%20%3D0%20%26mode%20%3Dmatch%20%2520partialmax%20%26lang%20%3Des%20%26region%20%3DES%20%26focus%20%3Dproduct>



A.4.5 Triacrilato de trimetilolpropano (R.V)

- Enlace a hoja técnica:

https://www.sigmaaldrich.com/Graphics/COFAInfo/SigmaSAPQM/SPEC/24/246808/246808-BULK_____ALDRICH__.pdf

- Enlace a fichas de seguridad:

<https://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=ES&language=es&productNumber=246808&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=https%20%3A%20%2F%20%2Fwww.sigmaaldrich.com%20%2Fcatalog%20%2Fsearch%20%3Fterm%20%3D246808%20%26interface%20%3DAI%20%26N%20%3D0%20%26mode%20%3Dmatch%20%2520partialmax%20%26lang%20%3Des%20%26region%20%3DES%20%26focus%20%3Dproduct>

A.4.6 Óxido de fenil bis (2, 4, 6-trimetilbenzoil) fosfina (BAPO)

- Enlace a hoja técnica:

http://www.sigmaaldrich.com/Graphics/COFAInfo/SigmaSAPQM/SPEC/51/511447/511447-BULK_____ALDRICH__.pdf

- Enlace a fichas de seguridad:

<http://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=ES&language=es&productNumber=511447&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=http%20%3A%20%2F%20%2Fwww.sigmaaldrich.com%20%2Fcatalog%20%2Fsearch%20%3Finterface%20%3DAI%20%26term%20%3Dphenylbis%20%2520phosphine%20%26N%20%3D0%20%26focus%20%3Dproduct%20%26lang%20%3Des%20%26region%20%3DES>



A.4.7 Benzofenona (BPH)

- Enlace a hoja técnica:

http://www.sigmaaldrich.com/Graphics/COFAInfo/SigmaSAPQM/SPEC/42/427551/427551-BULK_____ALDRICH_.pdf

- Enlace a fichas de seguridad:

<http://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=ES&language=es&productNumber=427551&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=http%20%3A%20%2F%20%2Fwww.sigmaaldrich.com%20%2Fcatalog%20%2Fsearch%20%3Fterm%20%3D427551%20%26interface%20%3DAll%20%26N%20%3D0%20%26mode%20%3Dmatch%20%2520partialmax%20%26lang%20%3Des%20%26region%20%3DES%20%26focus%20%3Dproduct>

A.4.8 HNU-470 IL (IL)

- Enlace a información:

<http://www.sglinc.com/Portals/0/Images/limited/PDFS/photoinitiators/H-Nu%20470%20IL%20TDS.pdf>

A.4.9 HNU-470 LT (LT)

- Enlace a información:

<http://www.sglinc.com/Portals/0/Images/limited/PDFS/photoinitiators/TDS%20May%202014/H-Nu%20470%20LT%20and%20LT5%20TDS%20May%202014.pdf>



A.5 PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE LA IMPRESORA 3D

En este apartado se detallan los pasos que se deben seguir antes de proceder a la impresión de piezas en tres dimensiones como tal.

A.5.1 Preparación de las piezas para la impresión

Antes de poder imprimir una pieza, se debe crear un archivo de modo que el ordenador pueda interpretar el diseño realizado y mandar las imágenes necesarias al proyector.

En primer lugar, se diseña la pieza desde un programa CAD como *Solid Edge*, *Solid Works* u otros similares. También se puede optar por descargar de internet archivos ya subidos por otros usuarios que comparten de forma gratuita.

Una vez que se tiene el diseño se debe guardar en un formato ".stl", para ello es necesario especificar esta extensión en el programa correspondiente. Antes de guardar, es importante acudir a las propiedades del archivo que se va a realizar y especificar que queremos un archivo binario y no ASCII. También se puede variar la tolerancia de conversión y el ángulo del plano de la superficie.

El siguiente paso consiste en convertir el archivo ".stl" en un archivo ".ssl". En este caso, se ha empleado el programa *Magics 19.01* y a continuación se van a detallar los pasos a seguir para lograr dicho objetivo. Se ha de tener en cuenta que este programa no es la única opción disponible, existen otros de similares características.

A.5.2 Magics 19.01

Primero se debe importar el diseño realizado en un programa CAD (*Archivo -> Import*). Una vez elegido el archivo correspondiente, la pieza aparecerá en la pantalla. Es aconsejable comprobar las dimensiones de las piezas, ya que en algunas ocasiones puede cambiarse por error las medidas de milímetros a pulgadas.

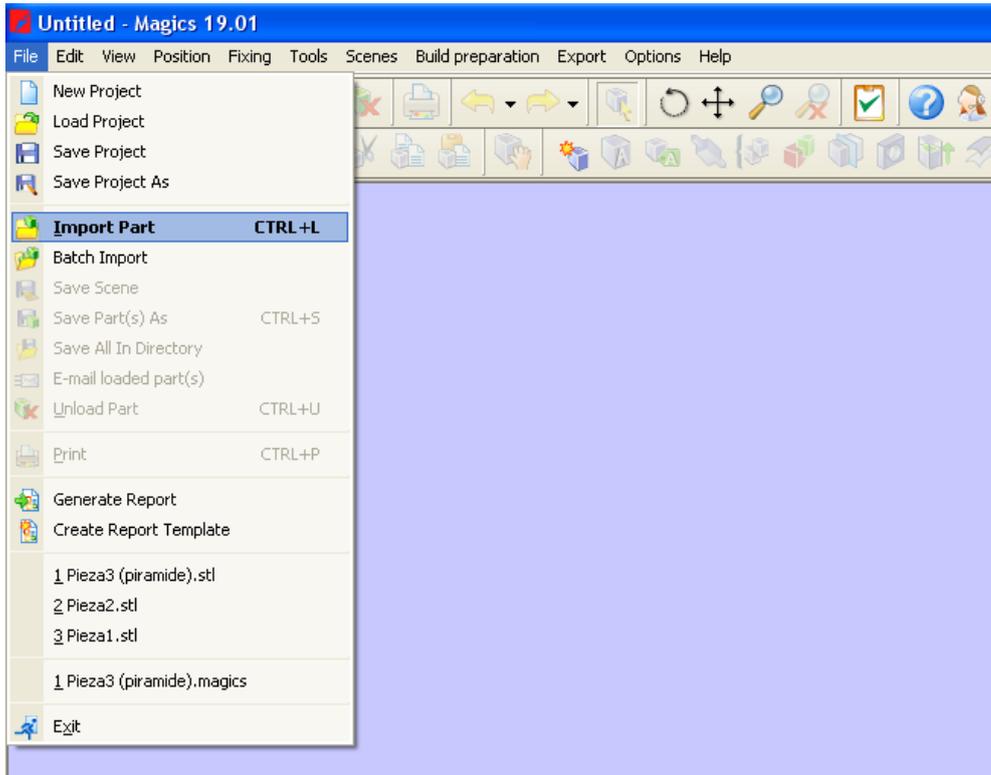


Figura 27 Importación del archivo CAD

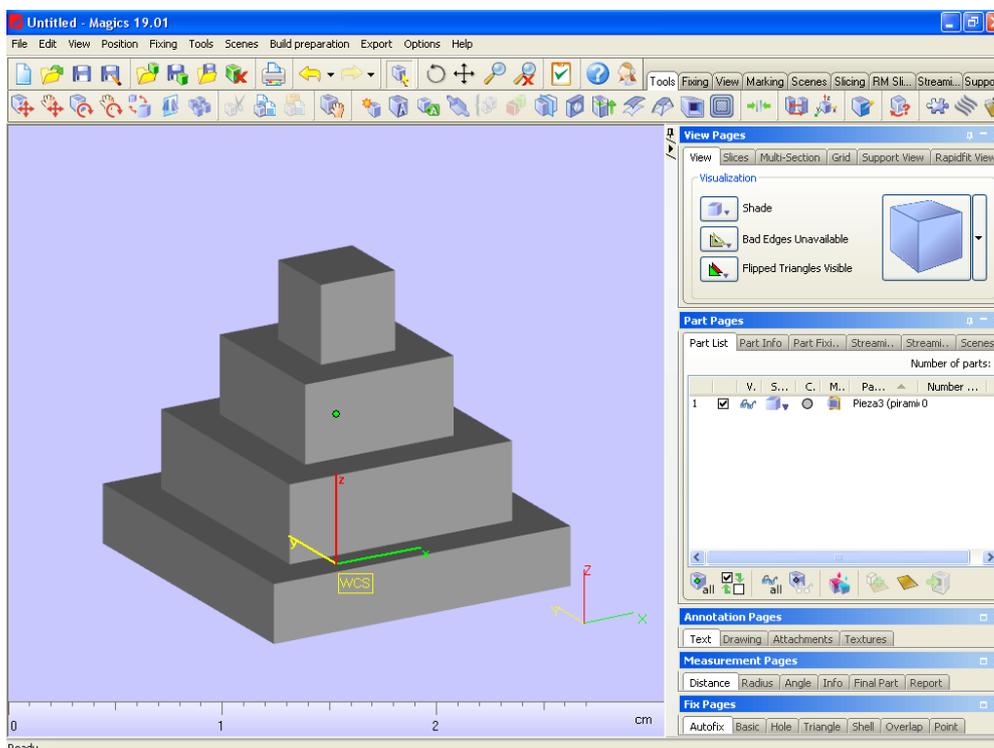


Figura 28 Pieza importada

Una vez hecho esto, se debe seleccionar la impresora, en este caso se crea una impresora virtual en la que se podrán situar las piezas (*Scenes -> Machine Library*). En la nueva pestaña que se abre es donde se puede elegir la impresora, en nuestro caso elegiremos impresoras en mm, como nuestro diseño es un diseño casero y no se encuentra en el programa utilizamos la opción de *Envisiontec Perfactory (mm)*.

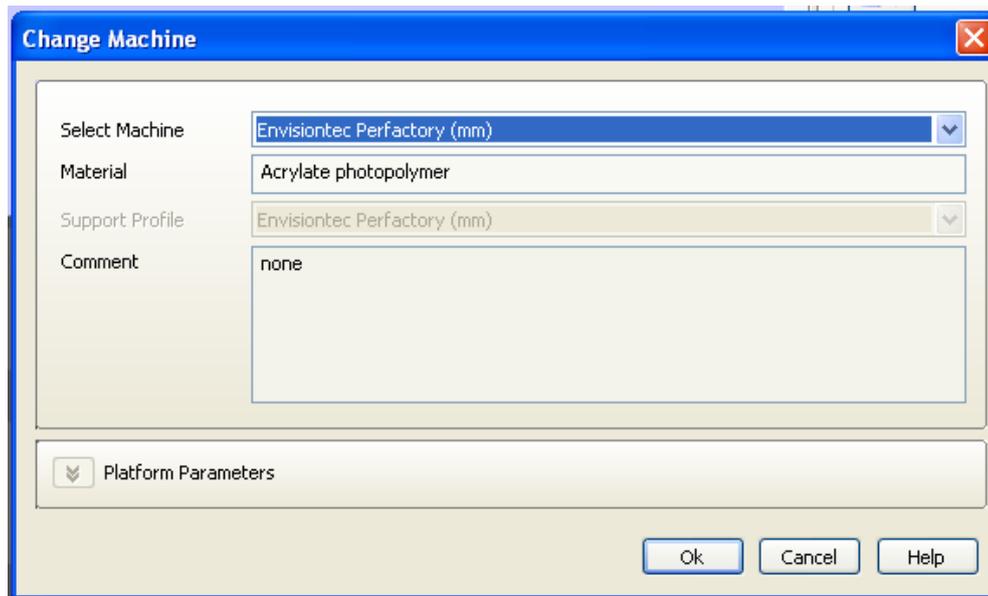


Figura 29 Selección de la impresora

Una vez cargada la impresora, se vuelve a la pestaña *Scenes -> Create* y se selecciona la impresora cargada anteriormente. De este modo aparece en la pantalla un rectángulo amarillo que representa la placa de curado de nuestra impresora.

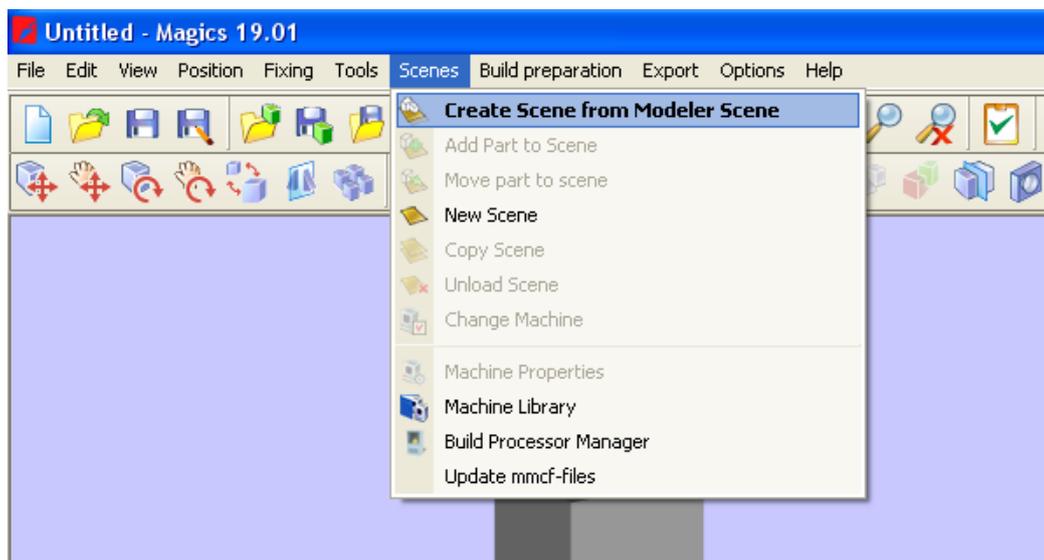


Figura 30 Creación de una nueva escena

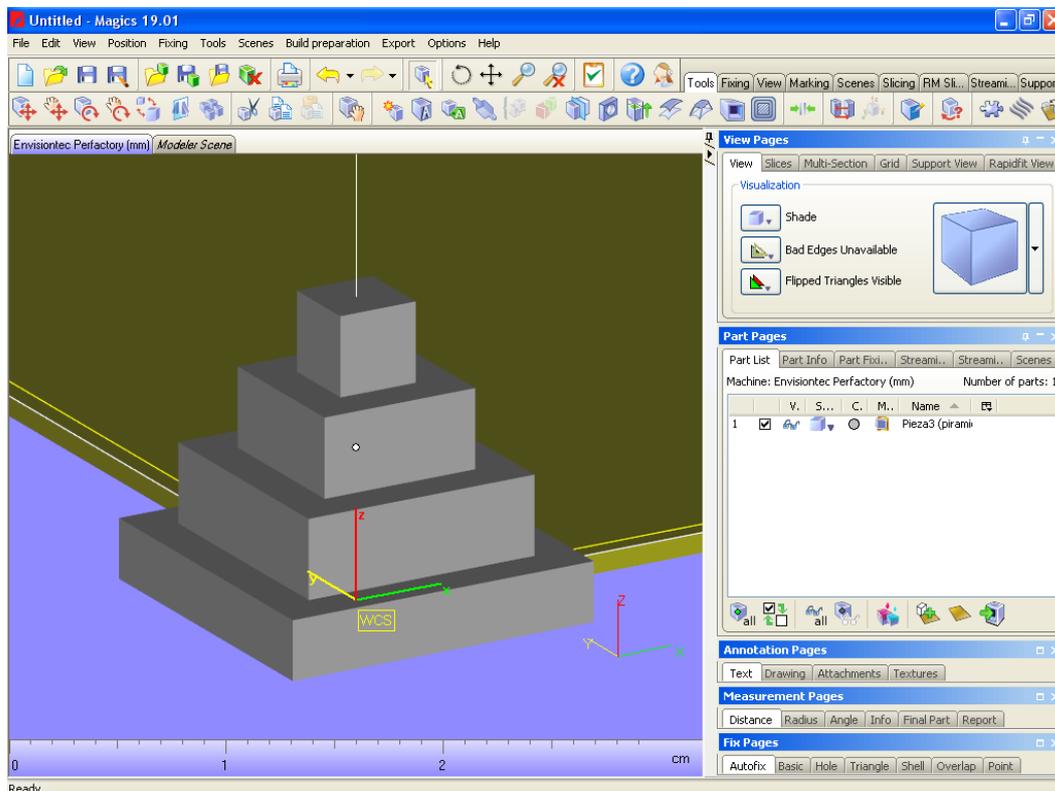


Figura 31 Pieza situada en la escena de impresión seleccionada

Desde la barra de herramientas se puede acceder a diversos comandos que permitirán modificar los parámetros. El primer paso sería ajustar las piezas al área de impresión (*Tools*) situando las piezas en la posición deseada. En el caso estudiado, no es necesario realizar este paso, ya que el programa de la propia impresora se encarga de realizar el centrado de las piezas de forma automática.

Magics también permite rotar las piezas, modificarlas, añadirles textos e incluso situarlas de modo que se reduzca el tiempo de fabricación o el material utilizado en caso de necesidad de material de aporte. Esta opción tiene utilidad en piezas complejas que requieren de un material de soporte para la realización de la pieza y que después es retirado una vez impresa.

Cuando la pieza ya esté situada, se procede a la realización de las distintas capas que la forman (*Slicing -> Slice all parts*). En este punto, se abre una ventana con distintas opciones:

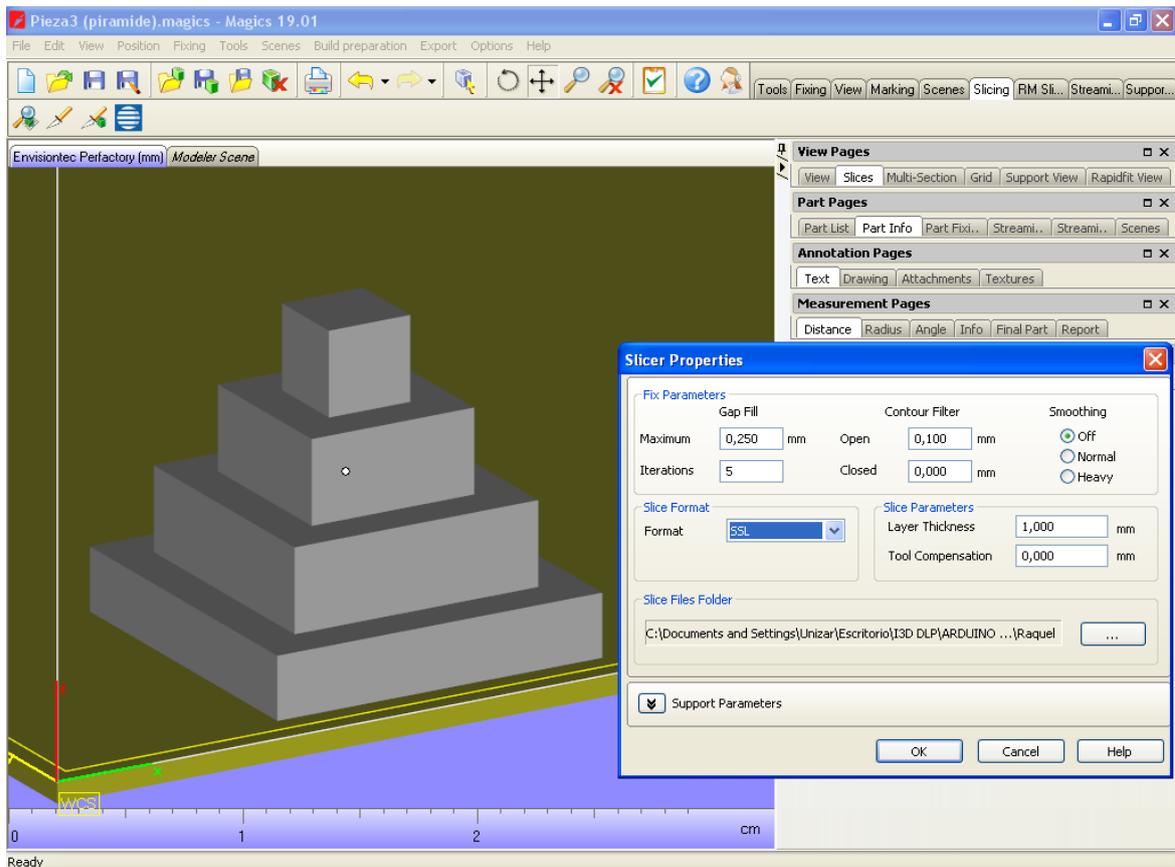


Figura 32 División de la pieza en capas

Es importante elegir el tipo de formato, debe ser siempre *SSL*, ya que si no el siguiente paso no podrá realizarse. Además, se debe elegir el tamaño de capa (*Layer Thickness*), que deberá coincidir con el que se asignará después a la impresora, por lo que para una misma pieza con distinto tamaño de capas deberá de realizarse este proceso de nuevo.

Al pulsar "OK" se habrá creado un archivo ".ssl" en la carpeta especificada.

Una vez se han generado las capas se puede ver qué forma tendrá cada una de ellas y la imagen que se proyectará para el curado. La línea amarilla indica el exterior de la imagen, mientras que la línea azul indica el interior. La imagen dada por el proyector será un fondo negro con una luz blanca en el interior de ambas.

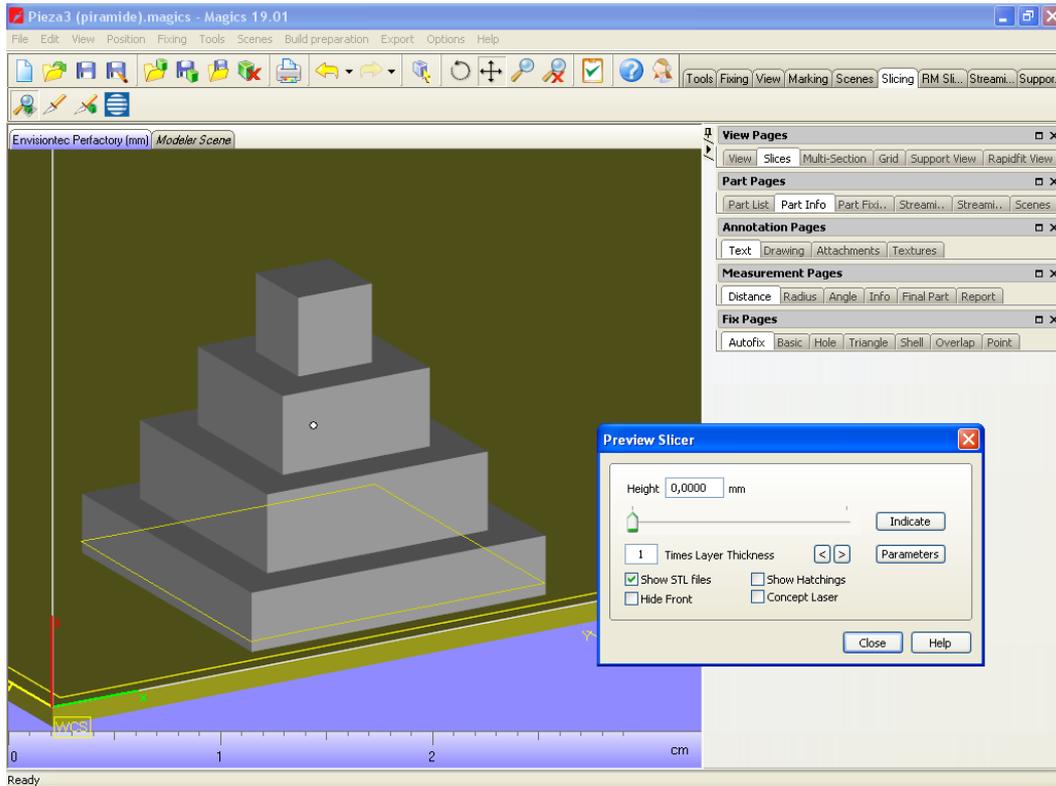


Figura 33 Visualización de la capa cero

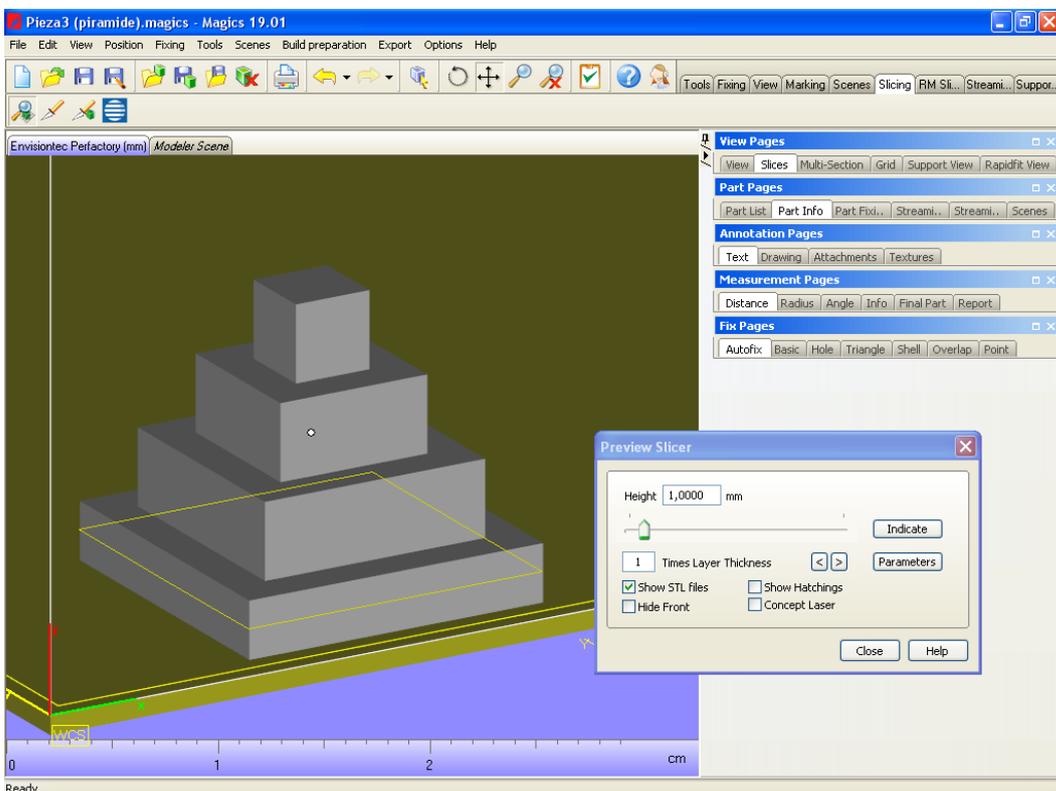


Figura 34 Visualización de la primera capa del espesor indicado anteriormente



El último paso es transformar el archivo ".ssl" en un archivo que pueda leer el programa de *Matlab*. Para ello se debe abrir el archivo *Leer_archivo_SSL.mat* que se encuentra en el ordenador, y asegurarse que el archivo ".ssl" se encuentra en la misma carpeta que el ".mat" que se acaba de abrir. En la ventana de comandos se ha de escribir "Lee_archivo_SSL ('nombre del archivo')", y al pulsar intro se creará un nuevo archivo con el mismo nombre pero de extensión ".mat", éste será el que se debe cargar como pieza.

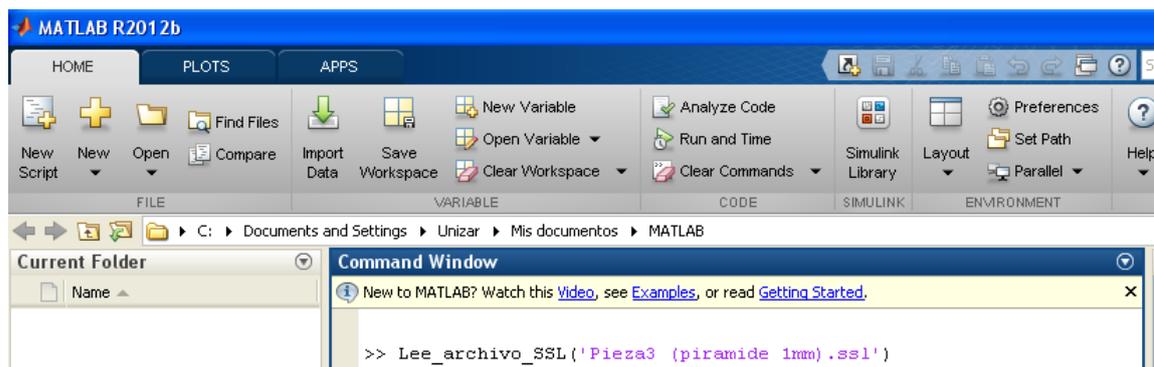


Figura 35 Conversión de un archivo ".ssl" a ".mat"

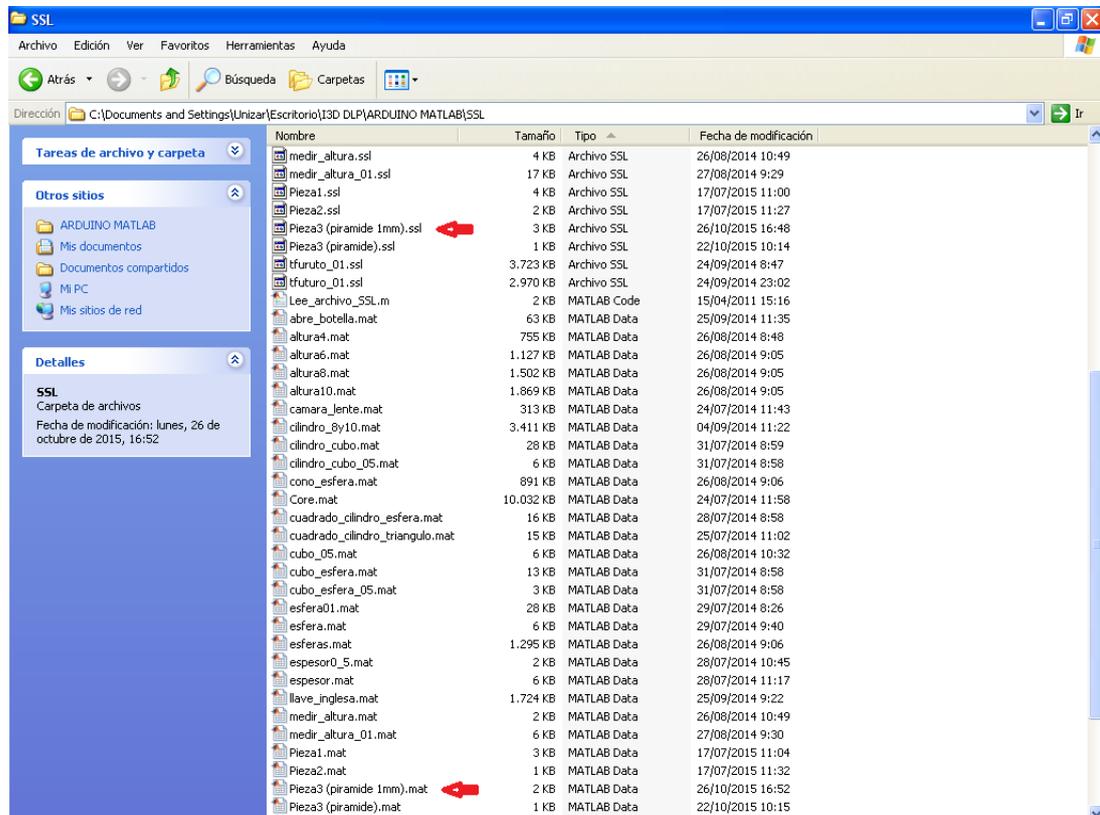


Figura 36 Archivos ".ssl" y ".mat" en la misma carpeta



Una vez que se tiene el archivo necesario para la impresora, simplemente queda abrir el programa *I3DTeam_DLP.m* y pulsar *Run*. De esta forma se abre una ventana donde se introducen los parámetros deseados para la impresión.

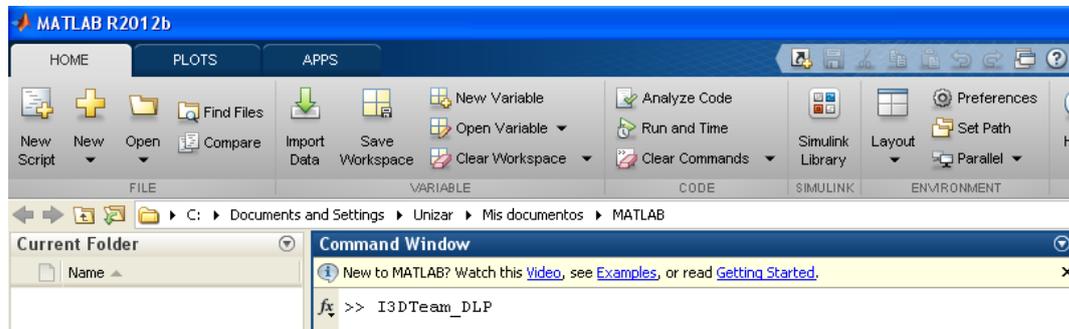


Figura 37 Inicio del programa de impresión

En esencia, primero se deberá cargar el puerto donde se encuentra la impresora (Figura 38). Después se elegirá la pieza deseada (se selecciona el archivo *“.mat”* que se ha creado anteriormente), se introducen las características de la impresión y solo queda esperar el tiempo indicado para tener la pieza lista.

A.5.3 Parámetros de impresión

El primer paso es definir los parámetros que hacen que la impresora funcione. Una vez ejecutado *Matlab*, programa que se encarga del control de Arduino, se podrán variar los valores de los campos que se muestran en la Figura 39.

A continuación se explica la función de cada uno de ellos:

- Home: permite devolver la placa de curado a la posición inicial. Esta posición es la que se encuentra más lejos del material a curar, dónde permanecerá cuando no se esté imprimiendo. Se usará solamente en caso de problemas con la impresión.
- Imprimir: una vez se han definido todos los campos, al pulsar el botón se comienza la impresión. Para ello, la placa de curado sube hasta que toca el final de carrera (que lo posiciona en cero) evitando así problemas en caso de que la impresión anterior no hubiese acabado completamente.
- Cargar pieza: permite seleccionar el archivo de la pieza que deseamos imprimir de cualquiera de las carpetas que se encuentran en el ordenador. Este archivo es un *“.mat”*, que se debe realizar anteriormente como se ha explicado en este anexo.



- Posición inicial: es la distancia desde el punto cero que baja la placa de curado, por consiguiente define el valor que tendrá la primera capa, si el valor es muy grande golpearía con la cuba, mientras que de ser pequeño la resina no llegaría a curar sobre la placa.
- Velocidad posición inicial: velocidad a la que baja el carril de elevación hasta llegar a la altura de impresión.
- Espesor de capa: indica el tamaño de cada una de las capas que se desean imprimir. Este valor debe coincidir con el indicado en la realización del archivo *.mat*
- Velocidad impresión: velocidad a la que se mueve la placa de curado en la zona de impresión.
- Resolución del proyector: permite cambiar la resolución en caso de que se cambie el proyector predefinido.
- Altura área de impresión: altura máxima que se permite imprimir.
- Tiempo proyección pieza: tiempo que permanece cada una de las imágenes generadas por el proyector incidiendo sobre la resina.
- Tiempo entre capas: tiempo de espera entre la proyección de una imagen y la siguiente.
- Tipo de tilt: el tilt nos permite evitar que la resina cure sobre la cuba, debido a que la imagen se proyecta por debajo de la resina. Para ello, se ha diseñado un sistema que hace que la resina se mueva entre cada una de sus capas, evitando así la sobreexposición de la misma a la luz. Ofrece tres posibilidades:
- Sin tilt: reduce el tiempo de impresión pero no realiza ningún tipo de protección ante este problema.
- Basculante: mediante una leva se inclina la cuba, moviendo la resina de sitio.
- Sube-baja: entre cada capa el carril de elevación asciende para luego descender moviendo de este modo la resina. Dentro de esta opción se puede determinar la altura a la que sube la placa de curado (mediante el desplazamiento) la velocidad de subida y bajada, y el tiempo que tiene que esperar una vez proyectada la imagen.

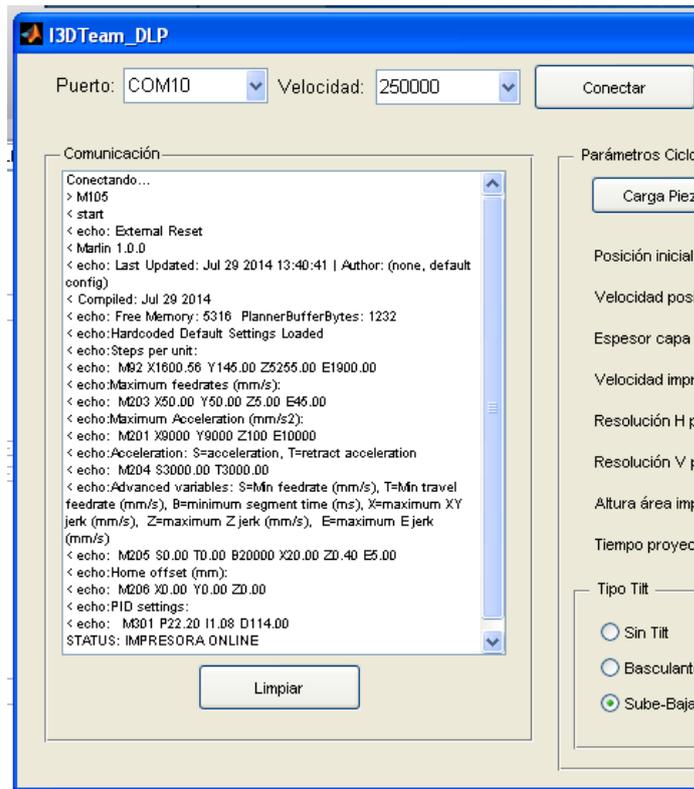


Figura 38 Conexión del puerto donde se encuentra la impresora

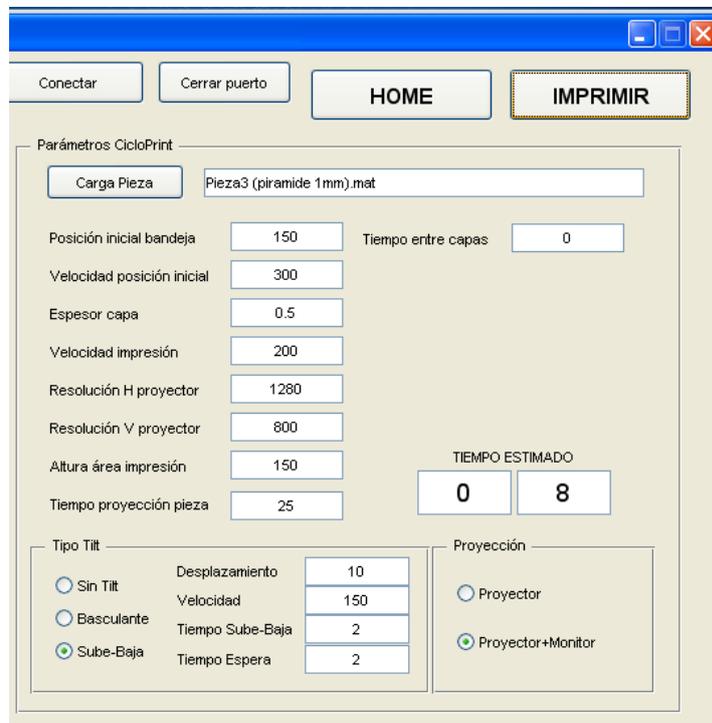


Figura 39 Parámetros de impresión

A.6 PRUEBAS DE INICIACIÓN

En este apartado se muestran las piezas obtenidas tras los ensayos realizados con cada una de las mezclas disponibles. También se adjuntan tablas donde se incluyen distintas medidas del espesor de cada pieza, expresadas en milímetros.

- BAPO + R.III 12/07/2013



Figura 40 Piezas obtenidas de la mezcla BAPO + R.III 12/07/2013

Tabla 12 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla BAPO + R.III 12/07/2013

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
30	0,48	0,73	0,64	0,65	0,63	0,09
20	0,37	0,31	0,31	0,35	0,34	0,03
15	0,22	0,21	0,20	0,23	0,22	0,01
50	0,47	0,35	0,43	0,39	0,41	0,04

- BAPO + R.I 12/07/2013



Figura 41 Piezas obtenidas de la mezcla BAPO + R. I 12/07/2013

Tabla 13 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla BAPO + R.I 12/07/2013

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
20	0,54	0,49	0,49	0,48	0,50	0,02
10	0,59	0,49	0,51	0,43	0,51	0,06
40	0,99	0,81	1,02	0,90	0,93	0,08

- BAPO + R.II 8 %



Figura 42 Piezas obtenidas de la mezcla BAPO + R.II 8 %

Tabla 14 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla BAPO + R.II 8 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
20	0,34	0,34	0,35	0,32	0,34	0,01
40	0,74	0,61	0,64	0,68	0,67	0,05
400	3,25	3,18	3,21	3,16	3,20	0,03

- BAPO + R.II 5 %



Figura 43 Piezas obtenidas de la mezcla BAPO + R.II 5 %

Tabla 15 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla BAPO + R.II 5 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
40	0,58	0,56	0,55	0,53	0,56	0,02
10	0,28	0,31	0,33	0,32	0,31	0,02
20	0,44	0,53	0,50	0,52	0,50	0,03

- BAPO + R.II 2 %



Figura 44 Piezas obtenidas de la mezcla BAPO + R.II 2 %

Tabla 16 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla BAPO + R.II 2 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
20	0,22	0,20	0,20	0,16	0,20	0,02
40	0,78	0,69	0,79	0,80	0,77	0,04
400	3,24	3,28	2,88	2,92	3,08	0,18

- BAPO + R.I 8 %



Figura 45 Piezas obtenidas de la mezcla BAPO + R.I 8 %

Tabla 17 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla BAPO + R.I 8 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
20	1,15	1,03	1,00	1,01	1,05	0,06
10	0,74	0,86	0,68	0,63	0,73	0,09
5	0,33	0,28	0,34	0,29	0,31	0,03
8	0,75	0,69	0,59	0,67	0,68	0,06
40	1,52	1,56	1,42	1,38	1,47	0,07
400	2,37	2,76	3,67	2,65	2,86	0,49
20	1,09	1,07	0,86	0,96	1,00	0,09
8	0,59	0,53	0,53	0,55	0,55	0,02
3	-	-	-	-	-	-

- BAPO + R.I 2 %



Figura 46 Piezas obtenidas de la mezcla BAPO + R.I 2 %

Tabla 18 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla BAPO + R.I 2 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
20	1,18	1,10	1,14	1,12	1,14	0,03
40	1,76	1,78	1,75	1,62	1,73	0,06

- BAPO + R. 15 %



Figura 47 Piezas obtenidas de la mezcla BAPO + R.I 5 %

Tabla 19 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla BAPO + R.I 5 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
20	0,93	0,97	1,18	0,99	1,02	0,10
10	0,71	0,70	0,72	0,72	0,71	0,01
8	0,54	0,60	0,58	0,58	0,58	0,02
5	0,26	0,33	0,31	0,36	0,32	0,04
40	1,89	1,65	1,62	1,85	1,75	0,12
400	3,77	3,68	3,76	3,85	3,77	0,06

- HNU-IL + R.II 2 %



Figura 48 Piezas obtenidas de la mezcla HNU-IL + R.II 2 %

Tabla 20 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla HNU-IL + R.II 2 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
400	1,49	1,60	1,55	1,50	1,54	0,04
180	0,97	0,72	1,03	0,85	0,89	0,12

- HNU-IL + R.II 8 %



Figura 49 Piezas obtenidas de la mezcla HNU-IL + R.II 8 %

Tabla 21 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla HNU-IL + R.II 8 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
120	0,54	0,67	0,65	0,59	0,61	0,05
60	0,46	0,47	0,40	0,48	0,45	0,03
180	0,94	1,07	1,13	1,03	1,04	0,07
400	1,27	1,23	1,29	1,27	1,27	0,02

- HNU-IL + R.II 5 %



Figura 50 Piezas obtenidas de la mezcla HNU-IL + R.II 5 %

Tabla 22 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla HNU-IL + R.II 5 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
180	0,71	0,66	0,69	0,68	0,69	0,02

- HNU-IL + R.II 5 % 15/07/2013



Figura 51 Piezas obtenidas de la mezcla HNU-IL + R.II 5 % 15/07/2013

Tabla 23 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla HNU-IL + R.II 5 % 15/07/2013

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
120	0,74	0,47	0,53	0,67	0,60	0,11
180	0,88	0,96	1,00	1,02	0,97	0,05
400	2,73	2,55	2,59	2,69	2,64	0,07

- HNU-IL + R.I 5 %



Figura 52 Piezas obtenidas de la mezcla HNU-IL + R.I 5 %

Tabla 24 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla HNU-IL + R.I 5 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
60	0,34	0,42	0,41	0,36	0,38	0,03
120	1,23	1,25	1,33	1,27	1,27	0,04
180	1,56	1,24	1,82	2,00	1,66	0,29
400	1,86	2,18	2,28	2,07	2,10	0,16

- HNU-IL + R.III 5 % 15/07/2013



Figura 53 Piezas obtenidas de la mezcla HNU-IL + R.III 5 % 15/07/2013

Tabla 25 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla HNU-IL + R.III 5 % 15/07/2013

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
120	0,49	0,31	0,44	0,35	0,40	0,07
180	0,73	0,60	0,54	0,65	0,63	0,07
400	1,16	1,72	1,64	1,47	1,50	0,21

- HNU-LT + R.II 5 % 15/07/13



Figura 54 Piezas obtenidas de la mezcla HNU-LT + R. II 5 % 15/07/2013

Tabla 26 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla HNU-LT + R. II 5 % 15/07/2013

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
120	1,39	1,18	1,37	1,26	1,30	0,09
80	0,88	0,75	0,96	0,87	0,87	0,07
70	0,89	1,00	0,89	1,10	0,97	0,09
180	0,81	0,82	0,89	0,87	0,85	0,03

- HNU-LT + R.I 5 % 15/07/13



Figura 55 Piezas obtenidas de la mezcla HNU-LT + R.I 5 % 15/07/2013

Tabla 27 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla HNU-LT + R.I 5 % 15/07/2013

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
60	0,73	0,71	0,67	0,62	0,68	0,04
40	0,89	0,82	1,09	1,08	0,97	0,12
120	2,14	1,32	1,32	1,33	1,53	0,35
180	1,88	3,00	2,23	2,35	2,37	0,41
400	2,41	2,58	1,89	2,43	2,33	0,26

- HNU-IL + R.III 5 % 15/07/13



Figura 56 Piezas obtenidas de la mezcla HNU-IL + R.III 5 % 15/07/2013

Tabla 28 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla HNU-IL + R.III 5 % 15/07/2013

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
120	0,78	0,75	0,82	0,81	0,79	0,03
180	1,22	1,16	1,54	1,18	1,28	0,15
80	1,31	1,03	0,37	1,05	0,94	0,35

- HNU-LT + R.III 5 % 15/07/13

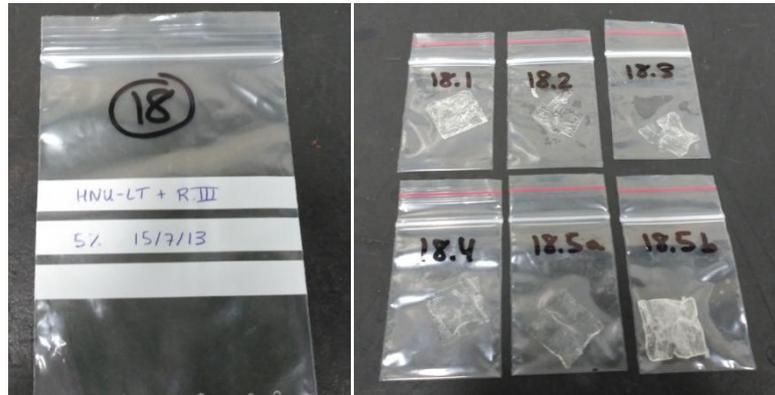


Figura 57 Piezas obtenidas de la mezcla HNU-LT + R.III 5 % 15/07/2013

Tabla 29 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla HNU-LT + R.III 5 % 15/07/2013

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
80	0,56	0,48	0,32	0,37	0,43	0,09
60	0,35	0,29	0,28	0,25	0,29	0,04
120	0,39	0,44	0,50	0,50	0,46	0,05
180	1,07	0,90	0,60	0,57	0,79	0,21
400	0,70	0,64	0,65	0,58	0,64	0,04
400	0,86	1,30	1,15	1,07	1,10	0,16



A.7 MEZCLAS PREPARADAS AL 5 % EN PESO DE FOTIINICIADOR

En este apartado se muestran las piezas obtenidas tras los ensayos realizados con cada una de las nuevas mezclas preparadas con un contenido de fotoiniciador del 5 % en peso. También se adjuntan tablas donde se incluyen distintas medidas del espesor de cada pieza, expresadas en milímetros.

- R.I + BAPO 5 %

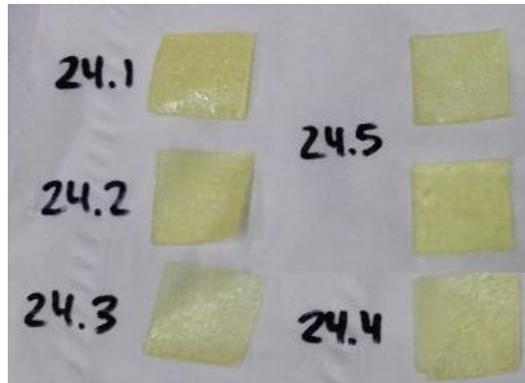


Figura 58 Piezas obtenidas de la mezcla R.I + BAPO 5 %

Tabla 30 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.I + BAPO 5 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
5	0,56	0,45	0,43	0,57	0,50	0,06
8	0,88	0,68	0,78	0,67	0,75	0,09
10	0,93	0,98	1,05	0,97	0,98	0,04
20	1,23	1,36	1,32	1,26	1,29	0,05
40	0,59	0,70	0,67	0,65	0,65	0,04
40	1,55	1,54	1,53	1,55	1,54	0,01

- R.II + BAPO 5 %



Figura 59 Piezas obtenidas de la mezcla R.II + BAPO 5 %

Tabla 31 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.II + BAPO 5 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
30	0,54	0,47	0,52	0,45	0,50	0,04
40	0,47	0,45	0,30	0,48	0,43	0,07
40	0,57	0,74	0,78	0,63	0,68	0,08

- R.III + BAPO 5 %

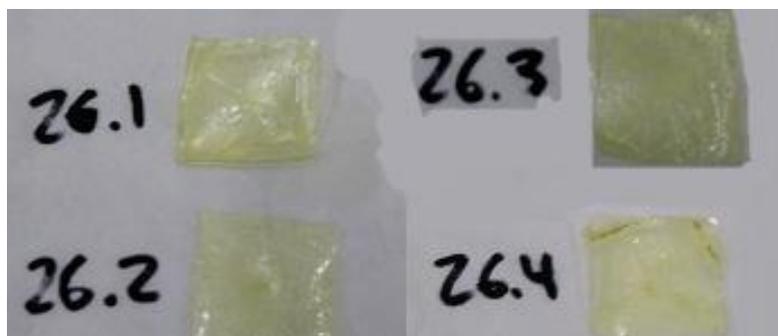


Figura 60 Piezas obtenidas de la mezcla R.III + BAPO 5 %

Tabla 32 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.III + BAPO 5 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
10	0,20	0,21	0,21	0,19	0,20	0,01
15	0,28	0,34	0,26	0,25	0,28	0,04
20	0,41	0,42	0,37	0,40	0,40	0,02
40	0,38	0,43	0,32	0,38	0,38	0,04

- R.V + BAPO 5 %



Figura 61 Piezas obtenidas de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Tabla 33 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
8	0,24	0,34	0,22	0,16	0,24	0,06
10	0,22	0,33	0,45	0,27	0,32	0,09
20	0,51	0,47	0,53	0,47	0,50	0,03
40	0,73	0,84	1,10	1,22	0,97	0,20

- R.I + LT 5 %



Figura 62 Piezas obtenidas de la mezcla R.I + LT 5 %

Tabla 34 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.I + LT 5 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
25	0,47	0,50	0,50	0,47	0,49	0,02
30	0,72	0,81	0,99	0,96	0,87	0,11
40	1,04	0,95	1,52	1,96	1,37	0,40

- R.II + LT 5 %



Figura 63 Piezas obtenidas de la mezcla R.II + LT 5 %

Tabla 35 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.II + LT 5 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
60	0,90	0,69	0,42	0,57	0,65	0,18
120	0,93	1,17	1,26	0,90	1,07	0,15
180	1,42	1,43	1,44	1,37	1,42	0,03

- R.III + LT 5 %

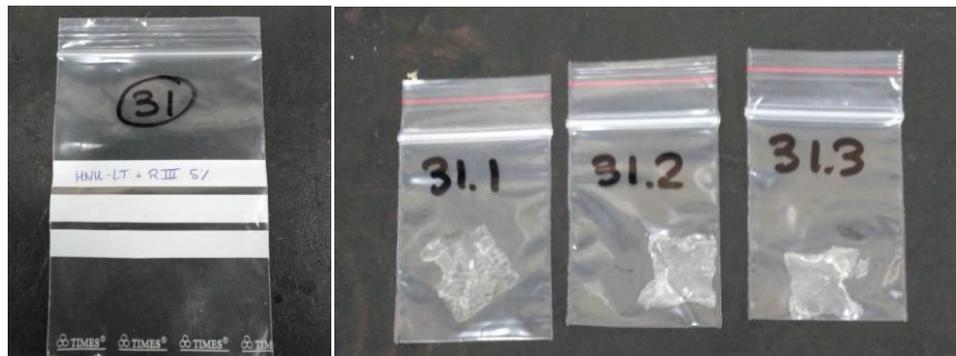


Figura 64 Piezas obtenidas de la mezcla R.III + LT 5 %

Tabla 36 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.III + LT 5 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
60	0,37	0,33	0,31	0,39	0,35	0,03
120	0,43	1,25	1,04	0,64	0,84	0,32
180	0,42	1,32	1,25	0,64	0,91	0,39

- R.V + LT 5 %



Figura 65 Piezas obtenidas de la mezcla R.V + LT 5 %

Tabla 37 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.V + LT 5 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
30	0,27	0,36	0,23	0,21	0,27	0,06
40	0,45	0,35	0,57	0,30	0,42	0,10
60	0,81	0,84	0,86	0,73	0,81	0,05
120	0,98	0,65	1,11	1,07	0,95	0,18

- R.I + IL 5 %



Figura 66 Piezas obtenidas de la mezcla R.I + IL 5 %

Tabla 38 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.I + IL 5 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
60	0,63	0,78	0,57	0,69	0,67	0,08
120	0,76	0,83	0,80	0,86	0,81	0,04
180	0,68	0,67	0,68	0,70	0,68	0,01

- R.II + IL 5 %



Figura 67 Piezas obtenidas de la mezcla R.II + IL 5 %

Tabla 39 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.II + IL 5 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
150	0,52	0,61	0,46	0,56	0,54	0,05
180	0,80	0,89	0,78	0,85	0,83	0,04

- R.III + IL 5 %



Figura 68 Piezas obtenidas de la mezcla R.III + IL 5 %

Tabla 40 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.III + IL 5 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
180	0,58	0,73	0,79	0,80	0,73	0,09
150	0,58	0,89	0,65	0,94	0,77	0,15
400	1,08	0,96	0,62	0,79	0,86	0,17

- R.V + IL 5 %



Figura 69 Piezas obtenidas de la mezcla R.V + IL 5 %



Tabla 41 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.V + IL 5 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
180	0,82	0,80	0,90	0,95	0,87	0,06
150	0,46	0,42	0,58	0,78	0,56	0,14
130	0,34	0,43	0,42	0,53	0,43	0,07
100	0,46	0,45	0,48	0,43	0,46	0,02
115	0,37	0,47	0,48	0,45	0,44	0,04

Estudio y caracterización de materiales para un prototipo de impresora 3D basada en la tecnología DLP

Mezclas preparadas al 5 % en peso de fotoiniciador



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

A.8 MEZCLAS PREPARADAS AL 2 - 8 % EN PESO DE FOTOINICIADOR

En este apartado se muestran las piezas obtenidas tras los ensayos realizados con cada una de las nuevas mezclas preparadas con un contenido de fotoiniciador del 2-8 % en peso, según el caso. También se adjuntan tablas donde se incluyen distintas medidas del espesor de cada pieza, expresadas en milímetros.

- R.I + BAPO 2 %



Figura 70 Piezas obtenidas de la mezcla R.I + BAPO 2 %

Tabla 42 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.I + BAPO 2 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
10	0,95	0,84	0,85	0,89	0,88	0,04
20	1,30	1,53	1,15	1,24	1,31	0,14
15	1,20	1,01	1,18	0,85	1,06	0,14
40	2,06	2,30	2,27	2,25	2,22	0,09



- R.II + BAPO 2 %



Figura 71 Piezas obtenidas de la mezcla R.II + BAPO 2 %

Tabla 43 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.II + BAPO 2 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
120	0,83	0,65	0,77	0,78	0,76	0,07

- R.III + BAPO 2 %



Figura 72 Piezas obtenidas de la mezcla R.III + BAPO 2 %

Tabla 44 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.III + BAPO 2 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
10	0,17	0,21	0,23	0,15	0,19	0,03
15	0,25	0,23	0,29	0,30	0,27	0,03
15	0,28	0,23	0,21	0,33	0,26	0,05
20	0,29	0,25	0,24	0,24	0,26	0,02
20	0,27	0,24	0,26	0,27	0,26	0,01
40	0,44	0,57	0,50	0,39	0,48	0,07

- R.V + BAPO 2 %



Figura 73 Piezas obtenidas de la mezcla R.V + BAPO 2 %

Tabla 45 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.V + BAPO 2 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
15	0,38	0,43	0,40	0,40	0,40	0,02
20	0,63	0,70	0,77	0,78	0,72	0,06
40	1,24	1,67	1,08	0,85	1,21	0,30

- R.I + LT 8 %



Figura 74 Piezas obtenidas de la mezcla R.I + LT 8 %

Tabla 46 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.I + LT 8 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
20	0,36	0,39	0,37	0,33	0,36	0,02
25	0,81	0,82	1,19	1,00	0,96	0,16
30	1,58	1,20	1,41	1,37	1,39	0,14
40	1,97	1,68	2,05	2,08	1,95	0,16

- R.II + LT 8 %



Figura 75 Piezas obtenidas de la mezcla R.II + LT 8 %

Tabla 47 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.II + LT 8 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
60	0,69	0,62	0,64	0,62	0,64	0,03
50	0,75	0,72	0,83	0,65	0,74	0,06
40	0,50	0,46	0,61	0,52	0,52	0,05
30	0,29	0,35	0,38	0,39	0,35	0,04

- R.III + LT 8 %

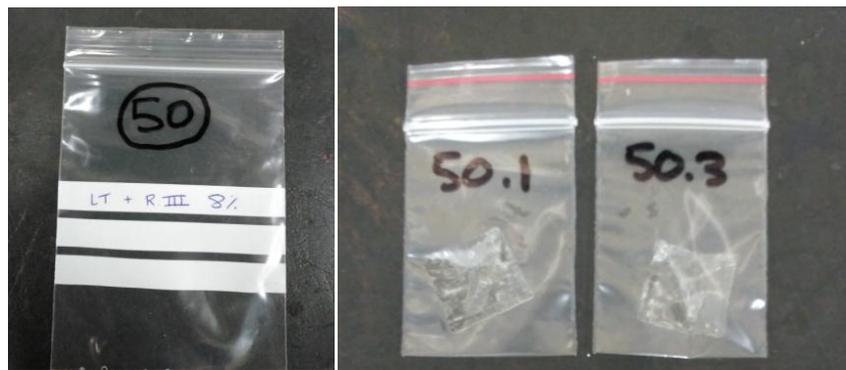


Figura 76 Piezas obtenidas de la mezcla R.III + LT 8 %

Tabla 48 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.III + LT 8 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
40	0,35	0,40	0,30	0,33	0,35	0,04
60	0,32	0,33	0,50	0,40	0,39	0,07

- R.V + LT 8 %



Figura 77 Piezas obtenidas de la mezcla R.V + LT 8 %

Tabla 49 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.V + LT 8 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
20	0,20	0,34	0,27	0,23	0,26	0,05
25	0,27	0,23	0,30	0,25	0,26	0,03
30	0,60	0,65	0,58	0,73	0,64	0,06
40	0,83	0,71	0,97	0,88	0,85	0,09

- R.I + IL 8 %



Figura 78 Piezas obtenidas de la mezcla R.I + IL 8 %

Tabla 50 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.I + IL 8 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
40	0,50	0,50	0,55	0,54	0,52	0,02
60	0,66	0,57	0,75	0,80	0,70	0,09
120	1,13	0,92	1,03	1,15	1,06	0,09

- R.II + IL 8 %



Figura 79 Piezas obtenidas de la mezcla R.II + IL 8 %

Tabla 51 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.II + IL 8 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
100	0,65	0,54	0,41	0,50	0,53	0,09
80	0,49	0,48	0,44	0,45	0,47	0,02
120	0,78	1,09	0,70	0,69	0,82	0,16

- R.III + IL 8 %



Figura 80 Piezas obtenidas de la mezcla R.III + IL 8 %

Tabla 52 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.III + IL 8 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
120	0,28	0,37	0,43	0,34	0,36	0,05
150	0,58	0,63	0,72	0,68	0,65	0,05

- R.V + IL 8 %



Figura 81 Piezas obtenidas de la mezcla R.V + IL 8 %



Tabla 53 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.V + IL 8 %

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
120	0,76	0,74	0,82	0,89	0,80	0,06
100	0,54	0,53	0,47	0,57	0,53	0,04
115	0,73	0,89	0,81	0,84	0,82	0,06
90	0,60	0,60	0,62	0,56	0,60	0,02
70	0,55	0,62	0,67	0,73	0,64	0,07
60	0,48	0,50	0,39	0,35	0,43	0,06



A.9 MATERIALES COMERCIALES

En este apartado se muestran las piezas obtenidas tras los ensayos realizados con cada una de las mezclas comerciales adquiridas. También se adjuntan tablas donde se incluyen distintas medidas del espesor de cada pieza, expresadas en milímetros.

- Spot- GP



Figura 82 Piezas obtenidas con Spot-GP

Tabla 54 Medidas del espesor de las piezas de Spot-GP

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
60	0,20	0,19	0,15	0,17	0,18	0,02
80	0,21	0,20	0,21	0,24	0,22	0,02
100	0,38	0,29	0,39	0,33	0,35	0,04

- Spot- HT



Figura 83 Piezas obtenidas con Spot-HT

Tabla 55 Medidas del espesor de las piezas de Spot-HT

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
120	0,16	0,13	0,120	0,21	0,16	0,04
150	0,29	0,20	0,17	0,15	0,20	0,05

- Spot-LV



Figura 84 Piezas obtenidas con Spot-LV



Tabla 56 Medidas del espesor de las piezas de Spot-LV

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
8	0,28	0,39	0,20	0,18	0,26	0,08
10	0,31	0,21	0,31	0,32	0,29	0,04
20	0,54	0,44	0,45	0,43	0,47	0,04
40	0,50	0,75	0,48	0,45	0,55	0,12
60	0,72	0,96	0,74	0,84	0,82	0,10



A.10 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE REPETIBILIDAD

Con objeto de simplificar los datos mostrados en este apartado, las casillas "Pieza X" hacen referencia directamente a la media de las cuatro medidas que se han realizado a cada una de las piezas que se pueden observar en las figuras.

- R.I + LT 8 %



Figura 85 Piezas obtenidas de la mezcla R.I + LT 8 %

Tabla 57 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.I + LT 8 %

Tiempo (s)	Pieza 1 (mm)	Pieza 2 (mm)	Pieza 3 (mm)	Pieza 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
60	1,70	2,24	2,02	1,93	1,97	0,19
50	1,32	1,30	0,98	1,16	1,14	0,13
40	0,68	1,17	1,23	1,31	1,09	0,25
30	0,59	1,15	0,99	-	0,91	0,23
20	0,34	0,64	0,63	-	0,54	0,14

- R.V + LT 5 %



Figura 86 Piezas obtenidas de la mezcla R.I + LT 5 %

Tabla 58 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.I + LT 5 %

Tiempo (s)	Pieza 1 (mm)	Pieza 2 (mm)	Pieza 3 (mm)	Pieza 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
60	0,46	0,26	0,35	0,25	0,33	0,08
50	0,46	0,30	0,34	0,55	0,41	0,10
40	0,34	0,23	0,26	0,58	0,35	0,14
30	0,31	0,25	0,24	0,26	0,23	0,03

- R.V + LT 8 %



Figura 87 Piezas obtenidas de la mezcla R.V + LT 8 %

Tabla 59 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.V + LT 8 %

Tiempo (s)	Pieza 1 (mm)	Pieza 2 (mm)	Pieza 3 (mm)	Pieza 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
60	0,89	0,71	0,91	0,70	0,80	0,10
50	0,57	0,44	0,74	0,71	0,61	0,12
40	0,59	0,58	0,89	0,99	0,76	0,18
30	0,58	0,35	0,93	0,80	0,66	0,22
20	0,40	0,31	0,58	0,76	0,51	0,17

- R.V + BAPO 2 %



Figura 88 Piezas obtenidas de la mezcla R.V + BAPO 2 %

Tabla 60 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.V + BAPO 2 %

Tiempo (s)	Pieza 1 (mm)	Pieza 2 (mm)	Pieza 3 (mm)	Pieza 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
60	0,83	1,18	0,88	1,02	0,97	0,14
50	0,68	0,89	0,82	1,03	0,85	0,13
40	0,51	0,84	0,84	0,95	0,78	0,17
30	0,47	0,45	0,79	0,62	0,58	0,14
20	0,47	0,46	0,64	0,70	0,57	0,10

- R.V + BAPO 5 %



Figura 89 Piezas obtenidas de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Tabla 61 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Tiempo (s)	Pieza 1 (mm)	Pieza 2 (mm)	Pieza 3 (mm)	Pieza 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
60	0,71	1,19	0,87	0,96	0,93	0,17
50	0,67	0,88	0,85	0,99	0,85	0,11
40	0,57	0,74	0,76	0,82	0,72	0,10
30	0,56	0,69	0,66	0,81	0,68	0,08
20	0,49	0,43	0,59	0,55	0,52	0,06
10	0,35	0,31	0,34	0,39	0,35	0,03

- R.II + BAPO 5 %

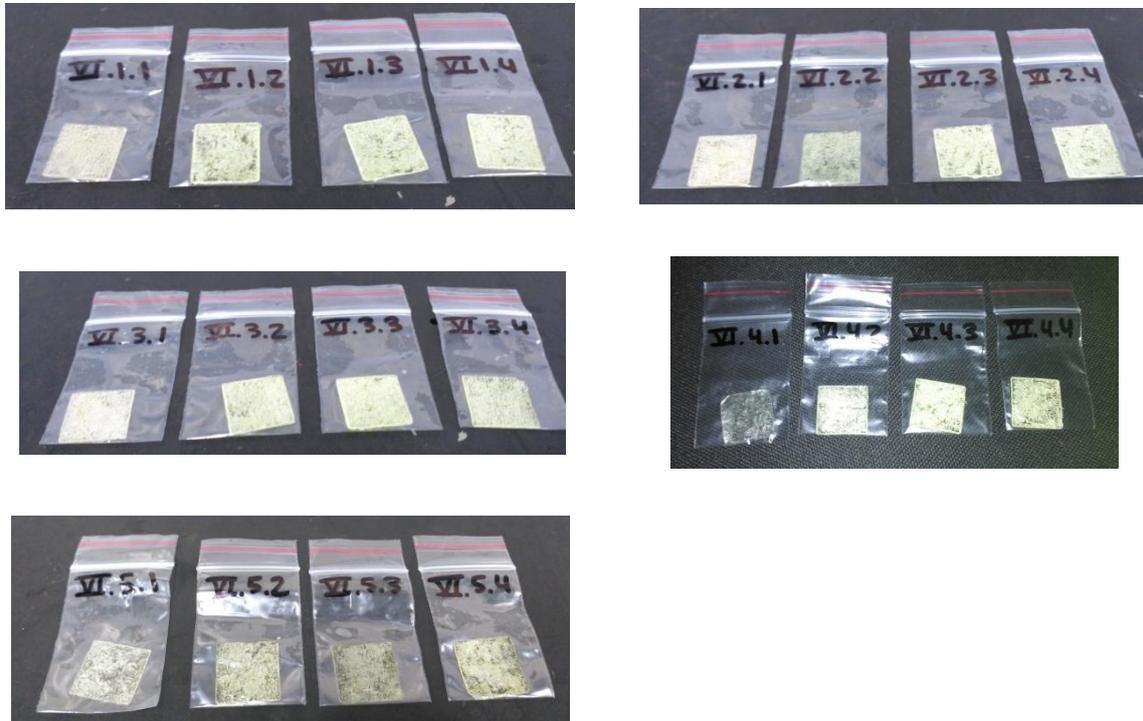


Figura 90 Piezas obtenidas de la mezcla R.II + BAPO 5 %

Tabla 62 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.II + BAPO 5 %

Tiempo (s)	Pieza 1 (mm)	Pieza 2 (mm)	Pieza 3 (mm)	Pieza 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
60	0,77	1,33	1,22	1,15	1,12	0,21
50	0,92	1,29	1,13	1,28	1,15	0,15
40	0,80	1,08	1,10	0,70	0,92	0,17
30	0,52	0,60	0,95	0,72	0,70	0,16
20	0,38	0,47	0,45	0,46	0,44	0,04



A.11 ENSAYOS ACLARATORIOS

Dado que los ensayos de repetibilidad anteriores no permiten obtener ninguna conclusión, se realizan estas pruebas adicionales para determinar las nuevas condiciones de operación.

- Piezas independientes con y sin tapa:

Tabla 63 Medidas del espesor de piezas realizadas con y sin tapa

	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Media	Desviación
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Cuba con tapa	0,33	0,29	0,34	0,35	0,33	0,02
Cuba sin tapa	0,31	0,30	0,30	0,33	0,31	0,01
Cuba con tapa	0,28	0,32	0,33	0,34	0,32	0,02
Cuba sin tapa	0,28	0,30	0,33	0,28	0,30	0,02

- Realización de dos piezas consecutivas:

Tabla 64 Medidas del espesor de piezas realizadas consecutivamente

	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Media	Desviación
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1ª pieza	0,36	0,35	0,38	0,37	0,37	0,01
2ª pieza	0,41	0,41	0,40	0,45	0,42	0,02
1ª pieza	0,34	0,33	0,30	0,34	0,33	0,02
2ª pieza	0,48	0,47	0,46	0,46	0,47	0,01



A.12 CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS

Para conseguir la curva característica de las distintas mezclas disponibles, en primer lugar, se imprimen piezas con un tiempo de exposición de 25, 35 y 45 segundos. Con estos tres puntos es posible definir la gráfica que se busca.

Para comprobar los resultados obtenidos y asegurar la repetibilidad del proceso, se vuelven a imprimir piezas durante tres tiempos diferentes. Con objeto de acotar mejor el comportamiento de las mezclas, en este caso se disminuye lo máximo posible el tiempo de exposición, para determinar el tiempo mínimo necesario para crear una capa. Una vez se tienen las dos gráficas, se combinan entre sí para obtener una única curva característica.

- R.I + LT 8 %

Tabla 65 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.I + LT 8 % (primera prueba)

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
25	0,32	0,36	0,34	0,37	0,35	0,02
35	0,63	0,60	0,59	0,61	0,61	0,01
45	0,76	0,78	0,78	0,74	0,77	0,02

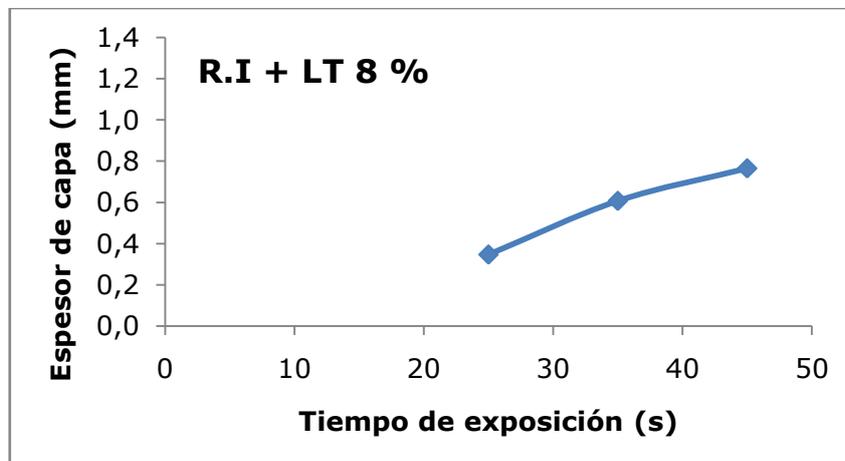


Figura 91 Caracterización de la mezcla R.I + LT 8 % (primera prueba)



Tabla 66 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.I + LT 8 % (segunda prueba)

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
25	0,31	0,37	0,35	0,33	0,34	0,02
35	0,79	0,83	0,70	0,75	0,77	0,05
45	1,15	1,20	1,24	1,12	1,18	0,05

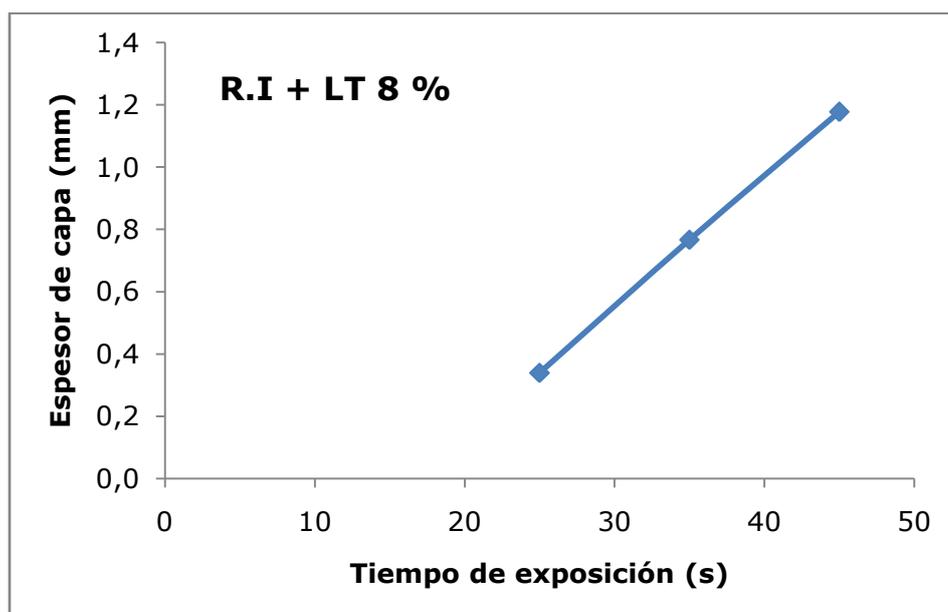


Figura 92 Caracterización de la mezcla R.I + LT 8 % (segunda prueba)

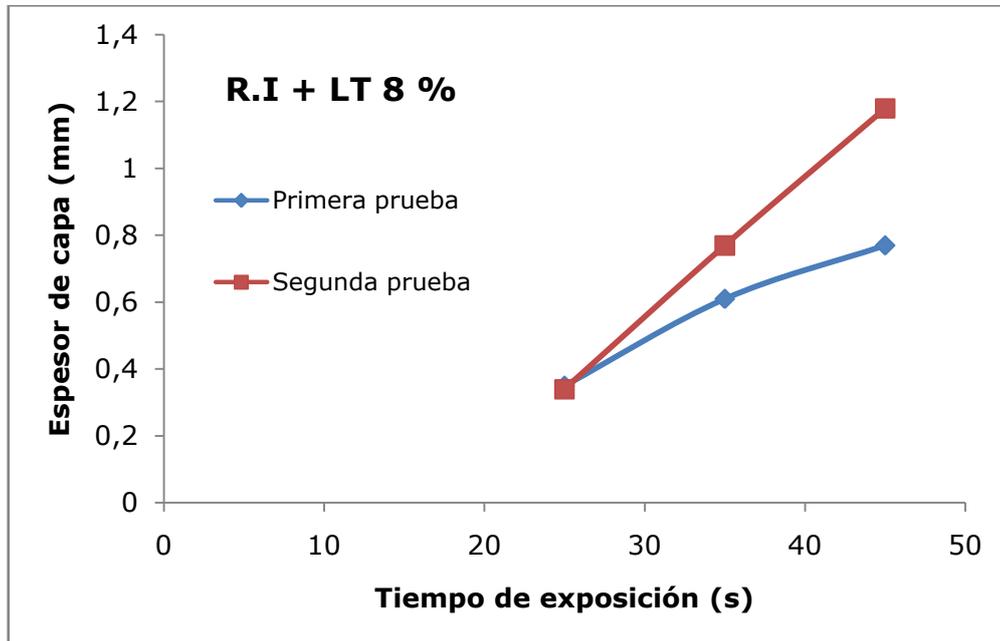


Figura 93 Caracterización de la mezcla R.I + LT 8 %

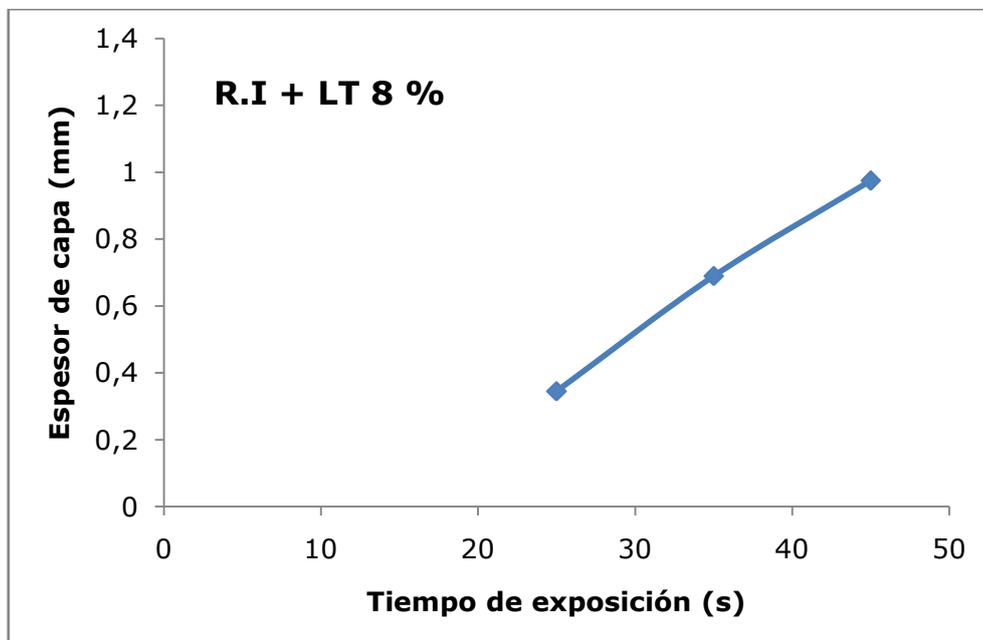


Figura 94 Curva característica de la mezcla R.I + LT 8 %



- R.V + LT 8 %

Tabla 67 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.V + LT 8 % (primera prueba)

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
25	0,13	0,14	0,11	0,14	0,13	0,01
35	0,38	0,36	0,31	0,34	0,35	0,03
45	0,50	0,51	0,48	0,46	0,49	0,02

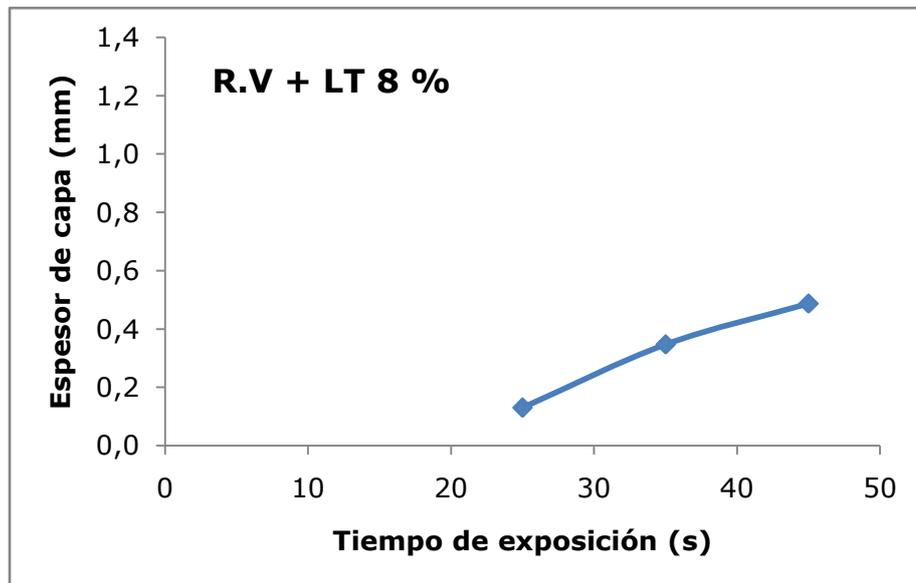


Figura 95 Caracterización de la mezcla R.V + LT 8 % (primera prueba)

Tabla 68 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.V + LT 8 % (segunda prueba)

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
25	0,14	0,15	0,13	0,13	0,14	0,01
35	0,39	0,38	0,32	0,33	0,36	0,03
45	0,52	0,50	0,50	0,51	0,51	0,01

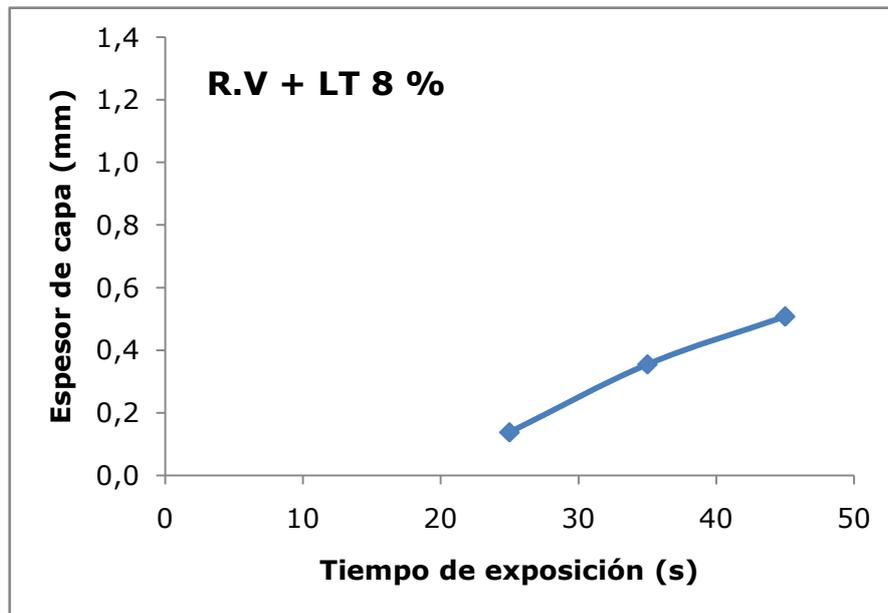


Figura 96 Caracterización de la mezcla R.V + LT 8 % (segunda prueba)

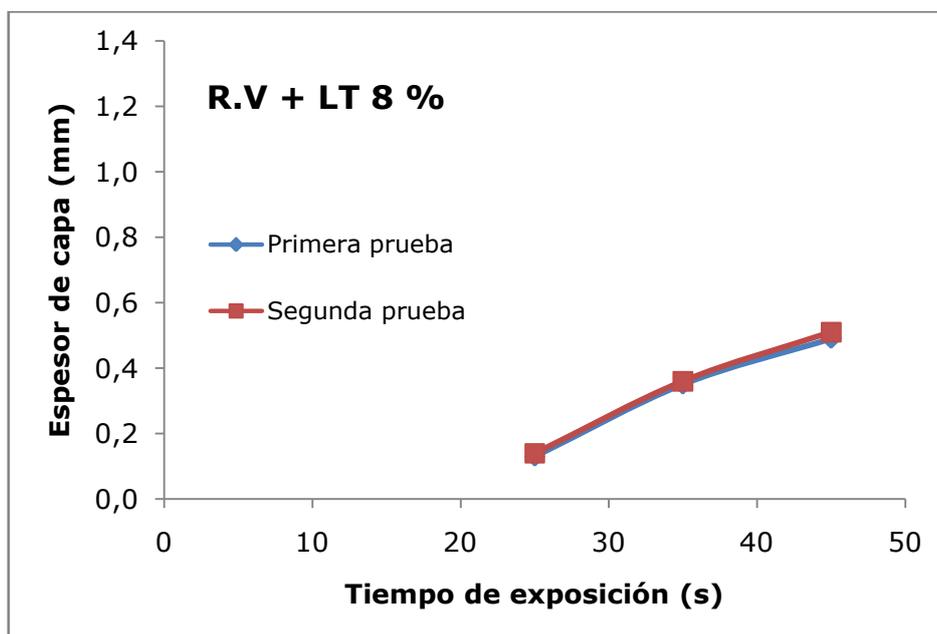


Figura 97 Caracterización de la mezcla R.V + LT 8 %

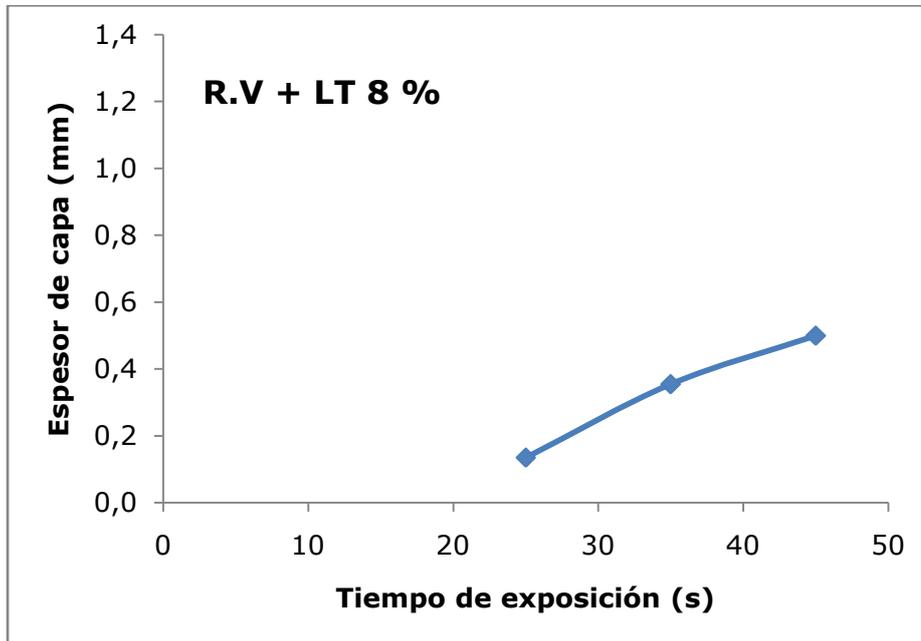


Figura 98 Curva característica de la mezcla R.V + LT 8 %

- R.V + BAPO 5 %

Tabla 69 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.V + BAPO 5 % (primera prueba)

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
25	0,42	0,42	0,36	0,42	0,41	0,03
35	0,63	0,62	0,61	0,59	0,61	0,01
45	0,74	0,75	0,79	0,71	0,75	0,03

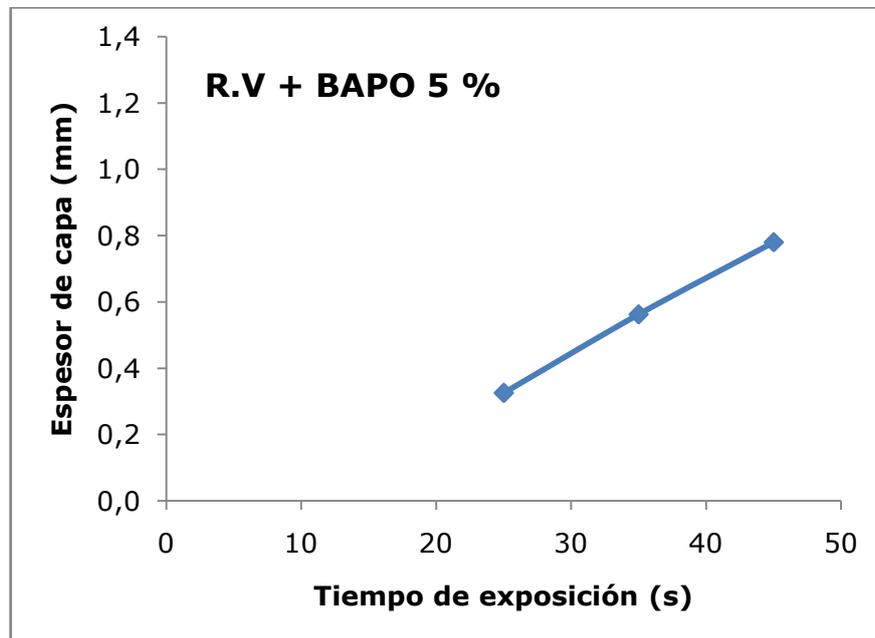


Figura 99 Caracterización de la mezcla R.V + BAPO 5 % (primera prueba)

Tabla 70 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.V + BAPO 5 % (segunda prueba)

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
20	0,37	0,34	0,34	0,35	0,35	0,01
25	0,43	0,43	0,41	0,39	0,42	0,02
35	0,60	0,59	0,62	0,59	0,60	0,01

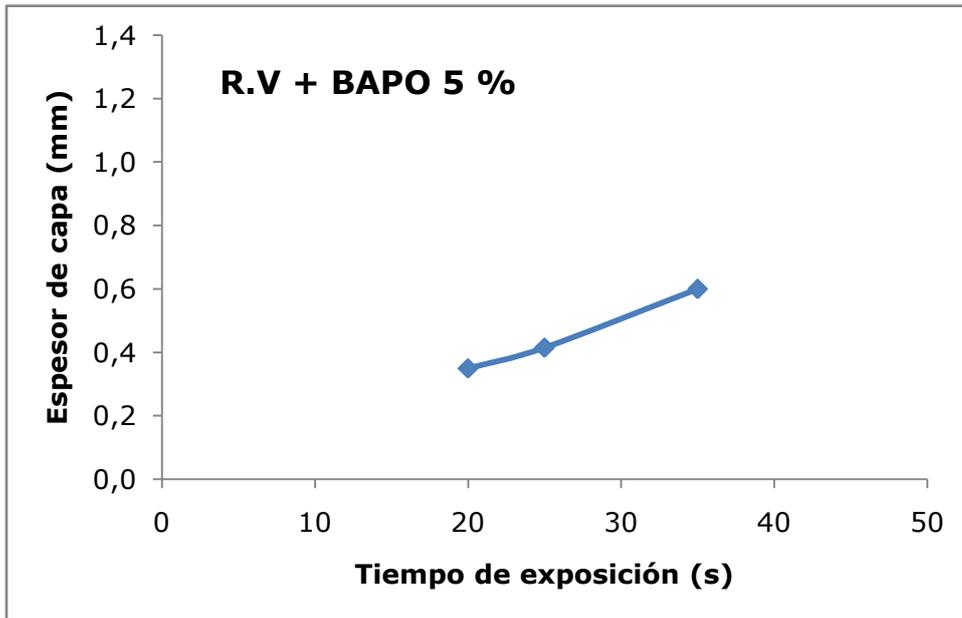


Figura 100 Caracterización de la mezcla R.V + BAPO 5 % (segunda prueba)

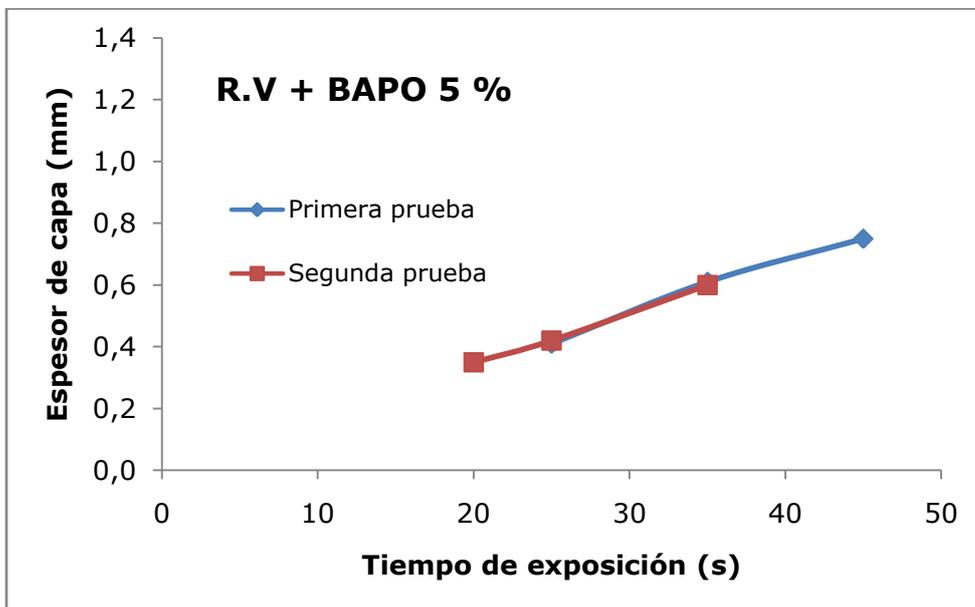


Figura 101 Caracterización de la mezcla R.V + BAPO 5 %

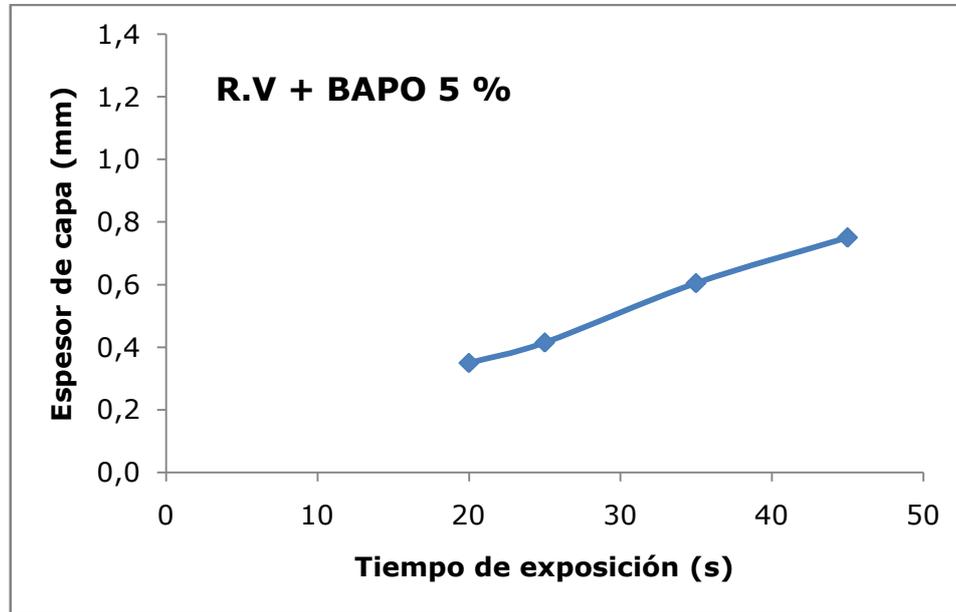


Figura 102 Curva característica de la mezcla R.V + BAPO 5 %

- R.II + BAPO 5 %

Tabla 71 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.II + BAPO 5 % (primera prueba)

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
25	0,17	0,19	0,15	0,18	0,17	0,01
35	0,28	0,30	0,28	0,27	0,28	0,01
45	0,32	0,31	0,30	0,26	0,30	0,02

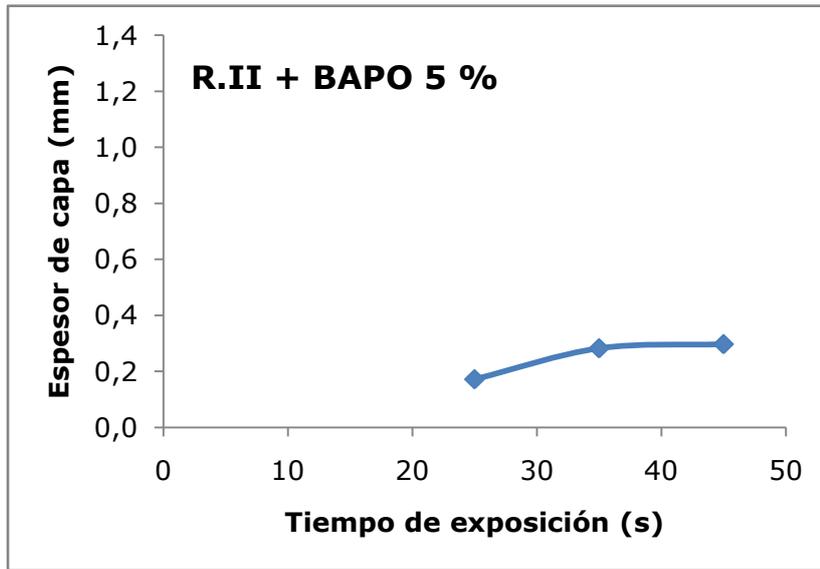


Figura 103 Caracterización de la mezcla R.II + BAPO 5 % (primera prueba)

Tabla 72 Medidas del espesor de las piezas de la mezcla R.II + BAPO 5 % (segunda prueba)

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
20	0,16	0,15	0,13	0,17	0,15	0,01
25	0,19	0,19	0,21	0,21	0,20	0,01
35	0,38	0,40	0,37	0,38	0,38	0,01

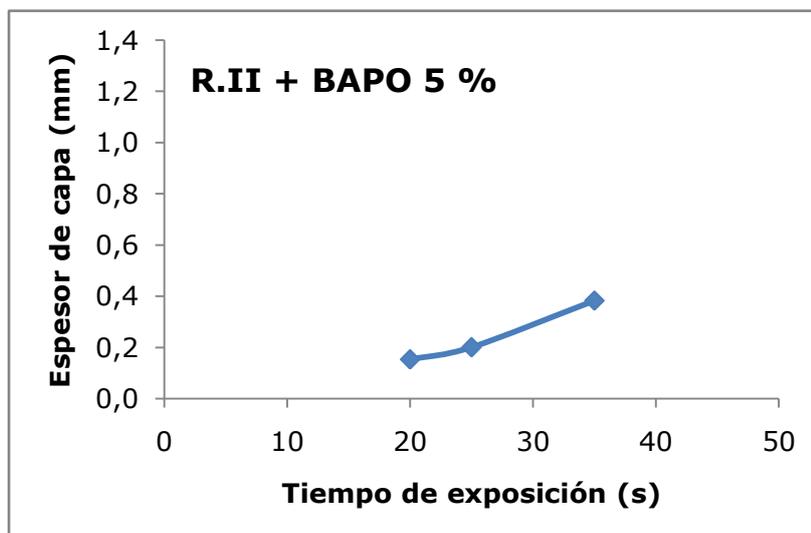


Figura 104 Caracterización de la mezcla R.II + BAPO 5 % (segunda prueba)

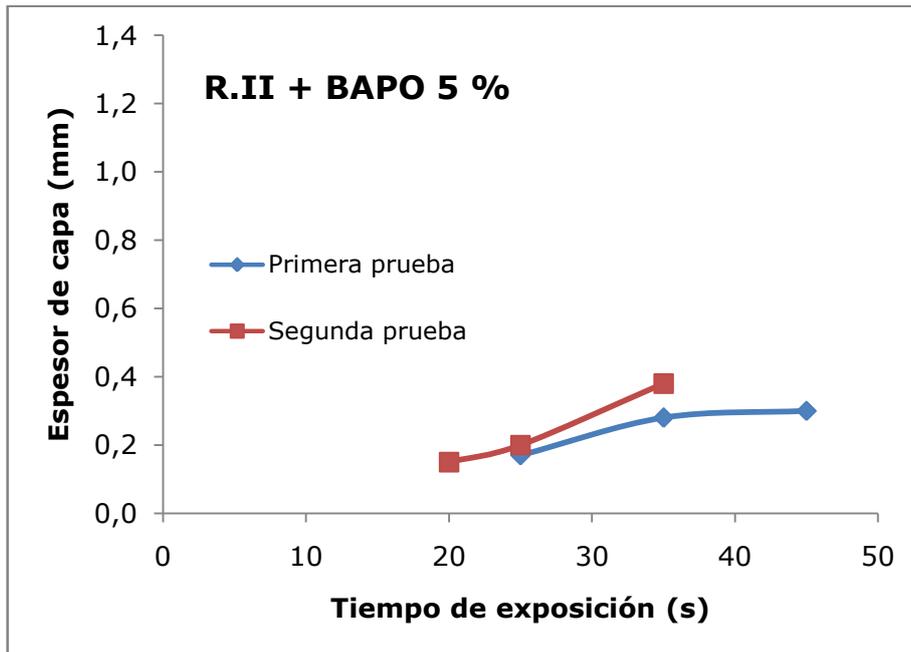


Figura 105 Caracterización de la mezcla R.II + BAPO 5 %

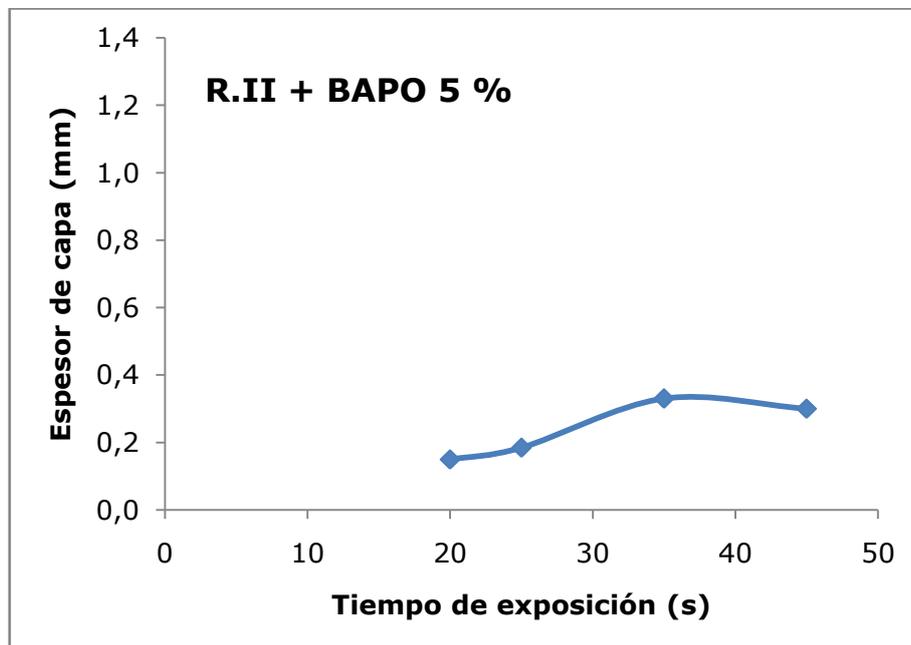


Figura 106 Curva característica de la mezcla R.II + BAPO 5 %



- RESINA COMERCIAL

Tabla 73 Medidas del espesor de las piezas de la resina comercial (primera prueba)

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
25	0,34	0,37	0,33	0,34	0,35	0,02
35	0,55	0,53	0,54	0,51	0,53	0,01
45	0,63	0,68	0,68	0,65	0,66	0,02

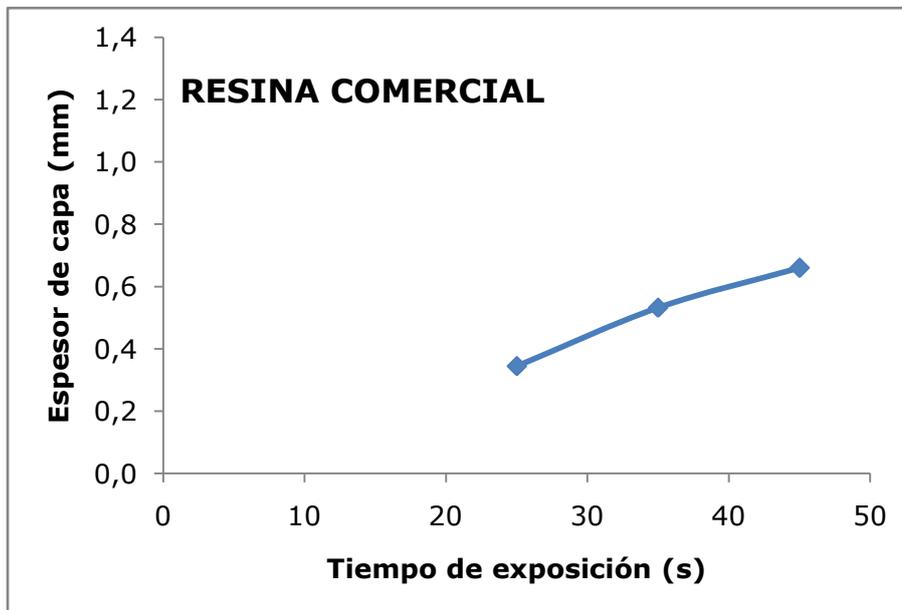


Figura 107 Caracterización de la resina comercial (primera prueba)

Tabla 74 Medidas del espesor de las piezas de la resina comercial (segunda prueba)

Tiempo (s)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)	Desviación (mm)
20	0,20	0,22	0,24	0,24	0,23	0,02
25	0,33	0,31	0,33	0,33	0,33	0,01
35	0,40	0,43	0,46	0,43	0,43	0,02

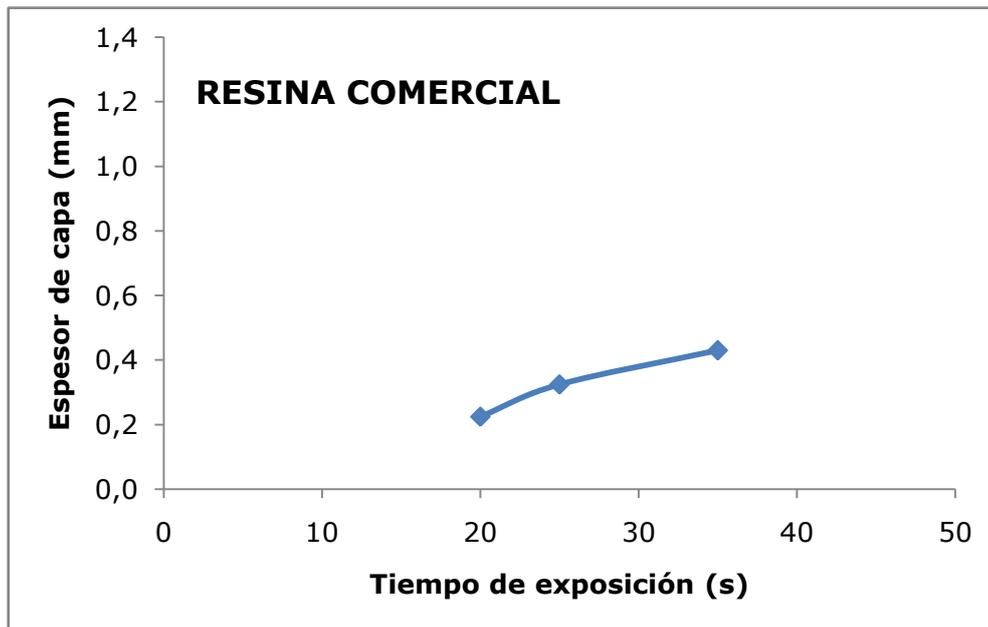


Figura 108 Caracterización de la resina comercial (segunda prueba)

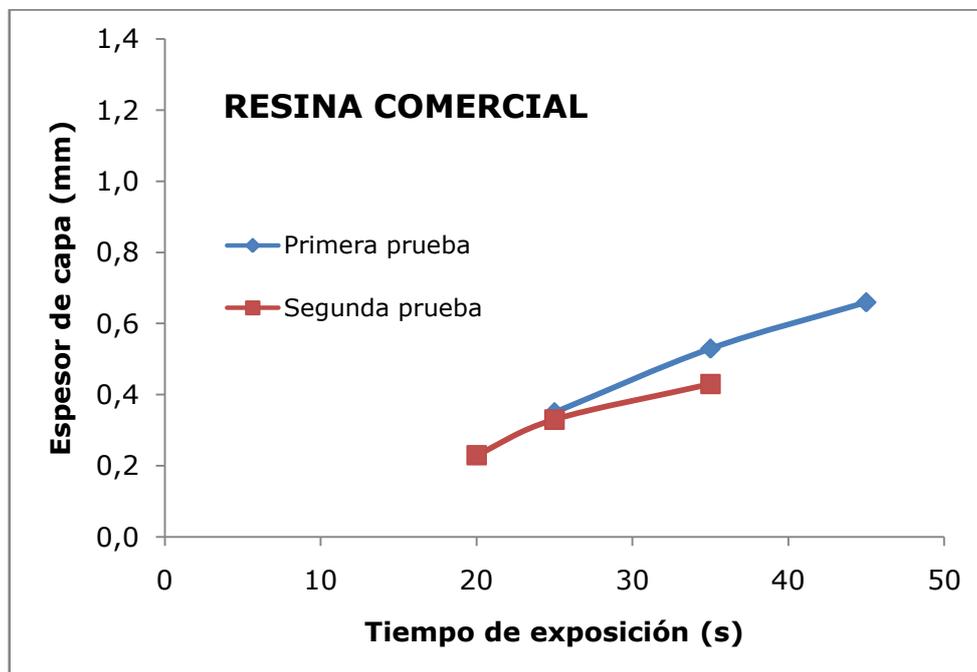


Figura 109 Caracterización de la resina comercial

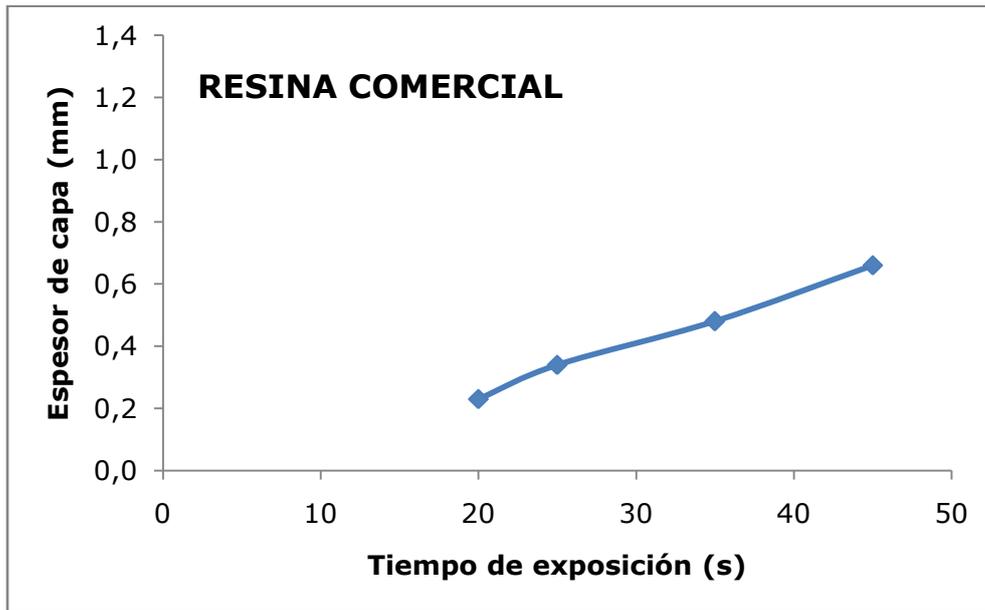


Figura 110 Curva característica de la resina comercial

- Comparación de resultados

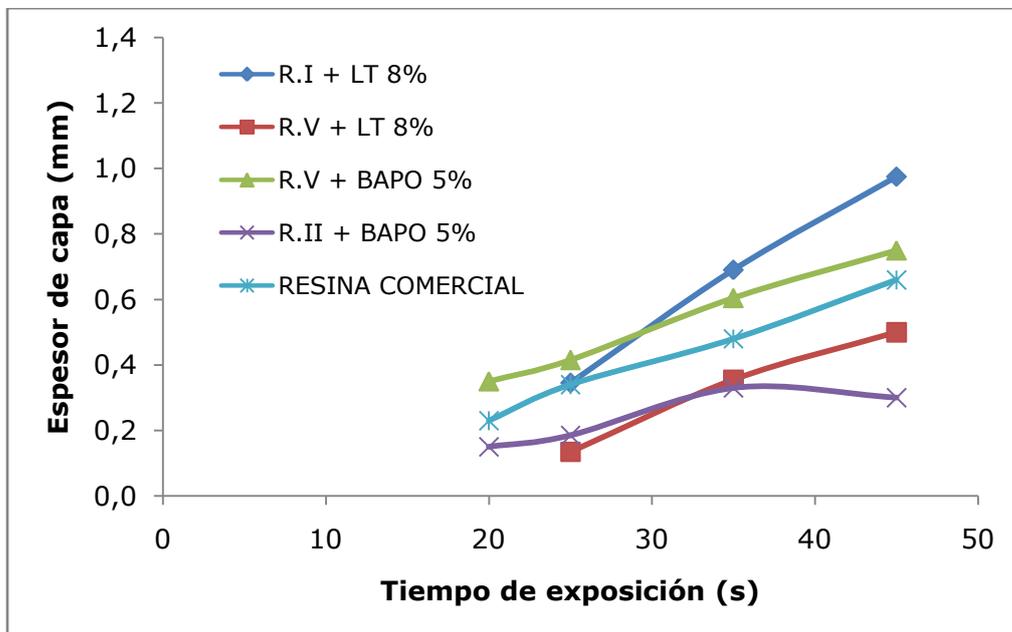


Figura 111 Caracterización de todas las mezclas analizadas

A.13 PIRÁMIDES (CAPAS DE 4 MILÍMETROS)

En este apartado se muestran las piezas en tres dimensiones obtenidas al dividir el diseño original de una pirámide en capas de 4 milímetros para que cada una de ellas se emita una sola vez. También se adjuntan tablas donde se incluyen distintas medidas del espesor de cada capa desde la base; por diferencia se tiene el espesor de cada una de ellas.

- R V + BAPO 5 %



Figura 112 Piezas obtenidas con la mezcla R.V + BAPO 5 %

Tabla 75 Medidas del espesor de la pieza 1 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,63	0,66	0,67	0,60	0,64
Capa 1 + 2	1,13	1,16	1,16	1,12	1,14
Capa 1 + 2 + 3	1,61	1,63	1,64	1,60	1,62
Capa 1 + 2 + 3 + 4	2,11	2,11	2,10	2,09	2,10



Tabla 76 Medidas del espesor de las capas de la pieza 1 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 1	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Media
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Capa 1	0,63	0,66	0,67	0,60	0,64
Capa 2	0,50	0,50	0,49	0,52	0,50
Capa 3	0,48	0,47	0,48	0,48	0,48
Capa 4	0,50	0,48	0,46	0,49	0,48

Tabla 77 Medidas del espesor de la pieza 2 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 2	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Media
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Capa 1	0,98	1,03	0,91	0,83	0,94
Capa 1 + 2	1,13	1,18	1,14	1,09	1,14
Capa 1 + 2 + 3	1,58	1,64	1,59	1,60	1,60
Capa 1 + 2 + 3 + 4	2,12	2,06	2,05	2,07	2,08

Tabla 78 Medidas del espesor de las capas de la pieza 2 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 2	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Media
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Capa 1	0,98	1,03	0,91	0,83	0,92
Capa 2	0,15	0,15	0,23	0,26	0,21
Capa 3	0,45	0,46	0,45	0,51	0,47
Capa 4	0,54	0,42	0,46	0,47	0,45

Tabla 79 Medidas del espesor de la pieza 3 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,54	0,58	0,64	0,61	0,59
Capa 1 + 2	1,04	1,06	1,11	1,09	1,08
Capa 1 + 2 + 3	1,58	1,60	1,58	1,58	1,59
Capa 1 + 2 + 3 + 4	2,09	2,07	2,06	2,07	2,07

Tabla 80 Medidas del espesor de las capas de la pieza 3 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,54	0,58	0,64	0,61	0,61
Capa 2	0,50	0,48	0,47	0,48	0,48
Capa 3	0,54	0,54	0,47	0,49	0,50
Capa 4	0,51	0,47	0,48	0,49	0,48

Tabla 81 Medidas del espesor de la pieza 4 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,64	0,59	0,62	0,55	0,60
Capa 1 + 2	1,11	1,05	1,08	1,02	1,07
Capa 1 + 2 + 3	1,58	1,55	1,55	1,54	1,56
Capa 1 + 2 + 3 + 4	1,99	1,99	2,04	1,98	2,00

Tabla 82 Medidas del espesor de las capas de la pieza 4 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,64	0,59	0,62	0,55	0,59
Capa 2	0,47	0,46	0,46	0,47	0,46
Capa 3	0,47	0,50	0,47	0,52	0,50
Capa 4	0,41	0,44	0,49	0,44	0,46

- R V + LT 8 %

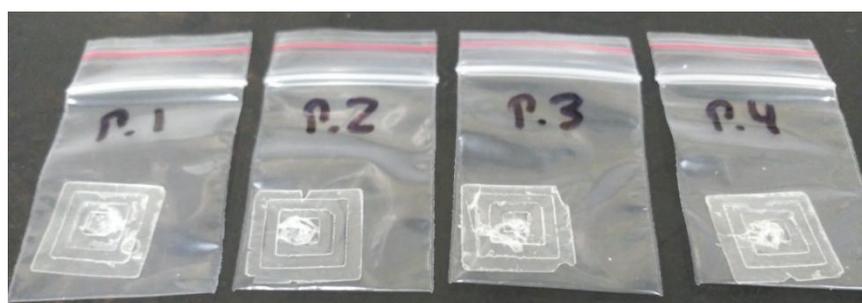


Figura 113 Piezas obtenidas con la mezcla R.V + LT 8 %

Tabla 83 Medidas del espesor de la pieza 1 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,47	0,61	0,63	0,53	0,56
Capa 1 + 2	1,02	1,10	1,09	1,08	1,07
Capa 1 + 2 + 3	1,56	1,53	1,58	1,53	1,55
Capa 1 + 2 + 3 + 4	2,03	2,01	2,03	2,03	2,03



Tabla 84 Medidas del espesor de las capas de la pieza 1 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,47	0,61	0,63	0,53	0,56
Capa 2	0,55	0,49	0,46	0,55	0,51
Capa 3	0,54	0,43	0,49	0,45	0,48
Capa 4	0,47	0,48	0,45	0,50	0,48

Tabla 85 Medidas del espesor de la pieza 2 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 2	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,55	0,46	0,52	0,57	0,53
Capa 1 + 2	1,05	0,98	1,01	1,06	1,03
Capa 1 + 2 + 3	1,54	1,49	1,52	1,54	1,52
Capa 1 + 2 + 3 + 4	1,98	2,00	2,01	2,01	2,00

Tabla 86 Medidas del espesor de las capas de la pieza 2 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 2	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,55	0,46	0,52	0,57	0,53
Capa 2	0,50	0,52	0,49	0,49	0,50
Capa 3	0,49	0,51	0,51	0,48	0,50
Capa 4	0,44	0,51	0,49	0,47	0,48



Tabla 87 Medidas del espesor de la pieza 3 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,62	0,49	0,48	0,58	0,54
Capa 1 + 2	1,15	1,04	1,01	1,09	1,07
Capa 1 + 2 + 3	1,63	1,53	1,52	1,58	1,57
Capa 1 + 2 + 3 + 4	2,04	2,02	2,02	2,03	2,03

Tabla 88 Medidas del espesor de las capas de la pieza 3 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,62	0,49	0,48	0,58	0,54
Capa 2	0,53	0,55	0,53	0,51	0,53
Capa 3	0,48	0,49	0,51	0,49	0,49
Capa 4	0,41	0,49	0,50	0,45	0,46

Tabla 89 Medidas del espesor de la pieza 4 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,50	0,48	0,59	0,60	0,54
Capa 1 + 2	1,03	1,02	1,10	1,19	1,09
Capa 1 + 2 + 3	1,54	1,54	1,58	1,62	1,57
Capa 1 + 2 + 3 + 4	2,04	2,03	2,03	2,03	2,03

Tabla 90 Medidas del espesor de las capas de la pieza 4 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,50	0,48	0,59	0,60	0,54
Capa 2	0,53	0,54	0,51	0,59	0,54
Capa 3	0,51	0,52	0,48	0,43	0,49
Capa 4	0,50	0,49	0,45	0,41	0,46

- R I + LT 8 %



Figura 114 Piezas obtenidas con la mezcla R.I + LT 8 %

Tabla 91 Medidas del espesor de la pieza 1 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,61	0,64	0,53	0,50	0,57
Capa 1 + 2	1,10	1,16	1,03	1,06	1,09
Capa 1 + 2 + 3	1,59	1,63	1,52	1,53	1,57
Capa 1 + 2 + 3 + 4	2,04	2,05	2,05	2,04	2,05



Tabla 92 Medidas del espesor de las capas de la pieza 1 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,61	0,64	0,53	0,50	0,57
Capa 2	0,49	0,52	0,50	0,56	0,52
Capa 3	0,49	0,47	0,49	0,47	0,48
Capa 4	0,45	0,42	0,53	0,51	0,48

Tabla 93 Medidas del espesor de la pieza 2 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 2	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,58	0,65	0,50	0,49	0,56
Capa 1 + 2	1,09	1,13	1,04	0,99	1,06
Capa 1 + 2 + 3	1,53	1,59	1,53	1,52	1,54
Capa 1 + 2 + 3 + 4	2,05	2,05	2,04	2,01	2,04

Tabla 94 Medidas del espesor de las capas de la pieza 2 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 2	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,58	0,65	0,50	0,49	0,56
Capa 2	0,51	0,48	0,54	0,50	0,51
Capa 3	0,44	0,46	0,49	0,53	0,48
Capa 4	0,52	0,46	0,51	0,49	0,50



Tabla 95 Medidas del espesor de la pieza 3 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,43	0,55	0,60	0,47	0,51
Capa 1 + 2	0,94	1,00	1,04	0,95	0,98
Capa 1 + 2 + 3	1,47	1,53	1,55	1,48	1,51
Capa 1 + 2 + 3 + 4	2,01	2,03	2,03	2,01	2,02

Tabla 96 Medidas del espesor de las capas de la pieza 3 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,43	0,55	0,60	0,47	0,51
Capa 2	0,51	0,45	0,44	0,48	0,47
Capa 3	0,53	0,53	0,51	0,53	0,53
Capa 4	0,54	0,50	0,48	0,53	0,51

Tabla 97 Medidas del espesor de la pieza 4 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,55	0,45	0,42	0,54	0,49
Capa 1 + 2	1,08	0,94	0,91	1,01	0,99
Capa 1 + 2 + 3	1,53	1,52	1,46	1,52	1,51
Capa 1 + 2 + 3 + 4	2,05	2,05	2,03	2,03	2,04

Tabla 98 Medidas del espesor de las capas de la pieza 4 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,55	0,45	0,42	0,54	0,49
Capa 2	0,53	0,49	0,49	0,47	0,50
Capa 3	0,45	0,58	0,55	0,51	0,52
Capa 4	0,52	0,53	0,57	0,51	0,53

- RESINA COMERCIAL

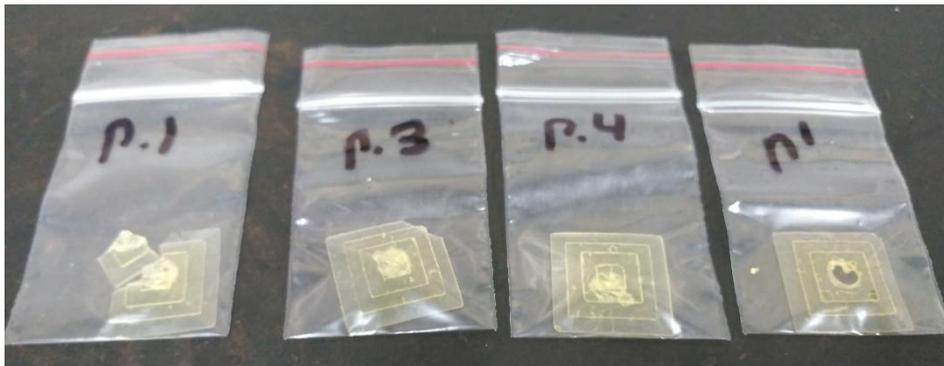


Figura 115 Piezas obtenidas con la resina comercial

Tabla 99 Medidas del espesor de la pieza 1 de la resina comercial

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,16	0,17	0,12	0,12	0,14
Capa 1 + 2	0,58	0,60	0,56	0,52	0,57
Capa 1 + 2 + 3	1,05	1,09	1,06	1,02	1,06
Capa 1 + 2 + 3 + 4	1,57	1,63	1,57	1,49	1,57



Tabla 100 Medidas del espesor de las capas de la pieza 1 de la resina comercial

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,16	0,17	0,12	0,12	0,14
Capa 2	0,42	0,43	0,44	0,40	0,42
Capa 3	0,47	0,49	0,50	0,50	0,49
Capa 4	0,52	0,54	0,51	0,47	0,51

Tabla 101 Medidas del espesor de la pieza 2 de la resina comercial

Pieza 2	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,50	0,55	0,61	0,57	0,56
Capa 1 + 2	1,08	1,10	1,14	1,12	1,11
Capa 1 + 2 + 3	1,57	1,59	1,63	1,62	1,60
Capa 1 + 2 + 3 + 4	2,13	2,15	2,10	2,05	2,11

Tabla 102 Medidas del espesor de las capas de la pieza 2 de la resina comercial

Pieza 2	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,50	0,55	0,61	0,57	0,56
Capa 2	0,58	0,55	0,53	0,55	0,55
Capa 3	0,49	0,49	0,49	0,50	0,49
Capa 4	0,56	0,56	0,47	0,43	0,51



Tabla 103 Medidas del espesor de la pieza 3 de la resina comercial

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,58	0,64	0,65	0,58	0,61
Capa 1 + 2	1,07	1,14	1,13	1,10	1,11
Capa 1 + 2 + 3	1,62	1,60	1,61	1,60	1,61
Capa 1 + 2 + 3 + 4	2,12	2,10	2,09	2,09	2,10

Tabla 104 Medidas del espesor de las capas de la pieza 3 de la resina comercial

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,58	0,64	0,65	0,58	0,61
Capa 2	0,49	0,50	0,48	0,52	0,50
Capa 3	0,55	0,46	0,48	0,50	0,50
Capa 4	0,50	0,50	0,48	0,49	0,49

Tabla 105 Medidas del espesor de la pieza 4 de la resina comercial

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,38	0,28	0,28	0,39	0,33
Capa 1 + 2	0,87	0,80	0,82	0,88	0,84
Capa 1 + 2 + 3	1,34	1,31	1,32	1,34	1,33



Tabla 106 Medidas del espesor de las capas de la pieza 4 de la resina comercial

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,38	0,28	0,28	0,39	0,33
Capa 2	0,49	0,52	0,54	0,49	0,51
Capa 3	0,47	0,51	0,50	0,46	0,49



A.14 PIRÁMIDES (CAPAS DE 1 MILÍMETRO)

En este apartado se muestran las piezas en tres dimensiones obtenidas al dividir el diseño original de una pirámide en capas de 1 milímetros para que cada una de ellas se emita varias veces. También se adjuntan tablas donde se incluyen distintas medidas del espesor de cada bloque desde la base; por diferencia se tiene el espesor de cada uno de ellos, y sabiendo cuántas veces se ha proyectado cada bloque, se obtiene el espesor medio de cada una de las capas que forman la pieza.

- R V + BAPO 5 %



Figura 116 Piezas obtenidas con la mezcla R.V + BAPO 5 %

Tabla 107 Medidas del espesor de la pieza 1 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,62	1,56	1,52	1,56	1,57
Bloque 1 + 2	3,61	3,63	3,52	3,56	3,58
Bloque 1 + 2 + 3	6,02	6,03	6,03	6,02	6,03
Bloque 1 + 2 + 3 + 4	8,04	8,00	8,03	8,01	8,02



Tabla 108 Medidas del espesor de los bloques de la pieza 1 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,62	1,56	1,52	1,56	1,57
Bloque 2	1,99	2,07	2,00	2,00	2,02
Bloque 3	2,41	2,40	2,51	2,46	2,45
Bloque 4	2,02	1,97	2,00	1,99	2,00

Tabla 109 Medidas del espesor de las capas de la pieza 1 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,54	0,52	0,51	0,52	0,52
Capa 2	0,50	0,52	0,50	0,50	0,50
Capa 3	0,48	0,48	0,50	0,49	0,49
Capa 4	0,51	0,49	0,50	0,50	0,50

Tabla 110 Medidas del espesor de la pieza 2 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 2	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,52	1,57	1,64	1,64	1,59
Bloque 1 + 2	3,51	3,52	3,57	3,55	3,54
Bloque 1 + 2 + 3	6,01	6,04	6,02	6,02	6,02
Bloque 1 + 2 + 3 + 4	7,97	8,04	8,04	8,02	8,02



Tabla 111 Medidas del espesor de los bloques de la pieza 2 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 2	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,52	1,57	1,64	1,64	1,59
Bloque 2	1,99	1,95	1,93	1,91	1,95
Bloque 3	2,50	2,52	2,45	2,47	2,49
Bloque 4	1,96	2,00	2,02	2,00	2,00

Tabla 112 Medidas del espesor de las capas de la pieza 2 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 2	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,51	0,52	0,55	0,55	0,53
Capa 2	0,50	0,49	0,48	0,48	0,49
Capa 3	0,50	0,50	0,49	0,49	0,50
Capa 4	0,49	0,50	0,51	0,50	0,50

Tabla 113 Medidas del espesor de la pieza 3 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,68	1,59	1,49	1,56	1,58
Bloque 1 + 2	3,6	3,58	3,53	3,59	3,58
Bloque 1 + 2 + 3	6,06	6,07	6,02	6,04	6,05
Bloque 1 + 2 + 3 + 4	8,01	8,08	8,03	8,09	8,05



Tabla 114 Medidas del espesor de los bloques de la pieza 3 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,68	1,59	1,49	1,56	1,58
Bloque 2	1,92	1,99	2,04	2,03	2,00
Bloque 3	2,46	2,49	2,49	2,45	2,47
Bloque 4	1,95	2,01	2,01	2,05	2,01

Tabla 115 Medidas del espesor de las capas de la pieza 3 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,56	0,53	0,50	0,52	0,53
Capa 2	0,48	0,50	0,51	0,51	0,50
Capa 3	0,49	0,50	0,50	0,49	0,49
Capa 4	0,49	0,50	0,50	0,51	0,50

Tabla 116 Medidas del espesor de la pieza 4 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,57	1,48	1,54	1,61	1,55
Bloque 1 + 2	3,55	3,49	3,57	3,59	3,55
Bloque 1 + 2 + 3	6,02	6,04	6,01	6,05	6,03
Bloque 1 + 2 + 3 + 4	8,05	8,04	7,99	8,07	8,04

Tabla 117 Medidas del espesor de los bloques de la pieza 4 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,57	1,48	1,54	1,61	1,55
Bloque 2	1,98	2,01	2,03	1,98	2,00
Bloque 3	2,47	2,55	2,44	2,46	2,48
Bloque 4	2,03	2,00	1,98	2,02	2,01

Tabla 118 Medidas del espesor de las capas de la pieza 4 de la mezcla R.V + BAPO 5 %

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,52	0,49	0,51	0,54	0,52
Capa 2	0,50	0,50	0,51	0,50	0,50
Capa 3	0,49	0,51	0,49	0,49	0,50
Capa 4	0,51	0,50	0,50	0,51	0,50

- R V + LT 8 %

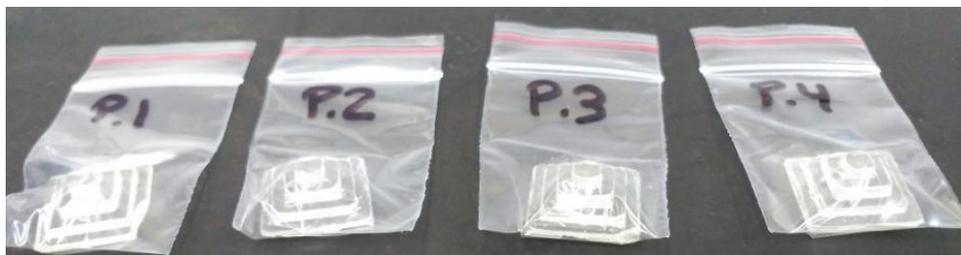


Figura 117 Piezas obtenidas con la mezcla R.V + LT 8 %



Tabla 119 Medidas del espesor de la pieza 1 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,49	1,54	1,58	1,41	1,51
Bloque 1 + 2	3,47	3,52	3,49	3,41	3,47
Bloque 1 + 2 + 3	5,98	6,00	6,08	5,95	6,00
Bloque 1 + 2 + 3 + 4	8,00	7,93	8,02	8,02	7,99

Tabla 120 Medidas del espesor de los bloques de la pieza 1 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,49	1,54	1,58	1,41	1,51
Bloque 2	1,98	1,98	1,91	2,00	1,97
Bloque 3	2,51	2,48	2,59	2,54	2,53
Bloque 4	2,02	1,93	1,94	2,07	1,99

Tabla 121 Medidas del espesor de las capas de la pieza 1 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,50	0,51	0,53	0,47	0,50
Capa 2	0,50	0,50	0,48	0,50	0,49
Capa 3	0,50	0,50	0,52	0,51	0,51
Capa 4	0,51	0,48	0,49	0,52	0,50



Tabla 122 Medidas del espesor de la pieza 2 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 2	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,58	1,46	1,46	1,58	1,52
Bloque 1 + 2	3,51	3,49	3,50	3,56	3,52
Bloque 1 + 2 + 3	6,01	6,00	6,05	6,09	6,04
Bloque 1 + 2 + 3 + 4	8,02	7,98	8,05	8,07	8,03

Tabla 123 Medidas del espesor de los bloques de la pieza 2 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 2	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,58	1,46	1,46	1,58	1,52
Bloque 2	1,93	2,03	2,04	1,98	2,00
Bloque 3	2,50	2,51	2,55	2,53	2,52
Bloque 4	2,01	1,98	2,00	1,98	1,99

Tabla 124 Medidas del espesor de las capas de la pieza 2 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 2	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,53	0,49	0,49	0,53	0,51
Capa 2	0,48	0,51	0,51	0,50	0,50
Capa 3	0,50	0,50	0,51	0,51	0,50
Capa 4	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50



Tabla 125 Medidas del espesor de la pieza 3 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,42	1,56	1,56	1,46	1,50
Bloque 1 + 2	3,48	3,53	3,57	3,45	3,51
Bloque 1 + 2 + 3	5,96	6,03	6,04	5,98	6,00
Bloque 1 + 2 + 3 + 4	7,93	8,05	8,03	7,99	8,00

Tabla 126 Medidas del espesor de los bloques de la pieza 3 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,42	1,56	1,56	1,46	1,50
Bloque 2	2,06	1,97	2,01	1,99	2,01
Bloque 3	2,48	2,50	2,47	2,53	2,50
Bloque 4	1,97	2,02	1,99	2,01	2,00

Tabla 127 Medidas del espesor de las capas de la pieza 3 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,47	0,52	0,52	0,49	0,50
Capa 2	0,52	0,49	0,50	0,50	0,50
Capa 3	0,50	0,50	0,49	0,51	0,50
Capa 4	0,49	0,51	0,50	0,50	0,50



Tabla 128 Medidas del espesor de la pieza 4 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,45	1,43	1,57	1,61	1,52
Bloque 1 + 2	3,47	3,43	3,52	3,57	3,50
Bloque 1 + 2 + 3	6,01	5,98	6,02	6,05	6,02
Bloque 1 + 2 + 3 + 4	8,00	8,01	8,03	8,03	8,02

Tabla 129 Medidas del espesor de los bloques de la pieza 4 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,45	1,43	1,57	1,61	1,52
Bloque 2	2,02	2,00	1,95	1,96	1,98
Bloque 3	2,54	2,55	2,50	2,48	2,52
Bloque 4	1,99	2,03	2,01	1,98	2,00

Tabla 130 Medidas del espesor de las capas de la pieza 4 de la mezcla R.V + LT 8 %

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,48	0,48	0,52	0,54	0,51
Capa 2	0,51	0,50	0,49	0,49	0,50
Capa 3	0,51	0,51	0,50	0,50	0,50
Capa 4	0,50	0,51	0,50	0,50	0,50

- R I + LT 8 %



Figura 118 Piezas obtenidas con la mezcla R.I + LT 8 %

Tabla 131 Medidas del espesor de la pieza 1 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,60	1,54	1,44	1,51	1,52
Bloque 1 + 2	3,60	3,56	3,53	3,58	3,57
Bloque 1 + 2 + 3	6,09	6,11	6,09	6,11	6,10
Bloque 1 + 2 + 3 + 4	8,09	8,12	8,08	8,14	8,11

Tabla 132 Medidas del espesor de los bloques de la pieza 1 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,60	1,54	1,44	1,51	1,52
Bloque 2	2,00	2,02	2,09	2,07	2,05
Bloque 3	2,49	2,55	2,56	2,53	2,53
Bloque 4	2,00	2,01	1,99	2,03	2,01

Tabla 133 Medidas del espesor de las capas de la pieza 1 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 1	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Media
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Capa 1	0,53	0,51	0,48	0,50	0,51
Capa 2	0,50	0,51	0,52	0,52	0,51
Capa 3	0,50	0,51	0,51	0,51	0,51
Capa 4	0,50	0,50	0,50	0,51	0,50

Tabla 134 Medidas del espesor de la pieza 2 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 2	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Media
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Bloque 1	1,45	1,43	1,57	1,63	1,52
Bloque 1 + 2	3,51	3,49	3,66	3,62	3,57
Bloque 1 + 2 + 3	6,05	6,06	6,12	6,06	6,07
Bloque 1 + 2 + 3 + 4	8,06	8,08	8,12	8,07	8,08

Tabla 135 Medidas del espesor de los bloques de la pieza 2 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 2	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Media
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Bloque 1	1,45	1,43	1,57	1,63	1,52
Bloque 2	2,06	2,06	2,09	1,99	2,05
Bloque 3	2,54	2,57	2,46	2,44	2,50
Bloque 4	2,01	2,02	2,00	2,01	2,01



Tabla 136 Medidas del espesor de las capas de la pieza 2 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 2	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,48	0,48	0,52	0,54	0,51
Capa 2	0,52	0,52	0,52	0,50	0,51
Capa 3	0,51	0,51	0,49	0,49	0,50
Capa 4	0,50	0,51	0,50	0,50	0,50

Tabla 137 Medidas del espesor de la pieza 3 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,70	1,47	1,43	1,52	1,53
Bloque 1 + 2	3,63	3,47	3,48	3,54	3,53
Bloque 1 + 2 + 3	6,02	6,02	6,07	6,07	6,05
Bloque 1 + 2 + 3 + 4	8,01	8,02	8,01	8,02	8,02

Tabla 138 Medidas del espesor de los bloques de la pieza 3 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,70	1,47	1,43	1,52	1,53
Bloque 2	1,93	2,00	2,05	2,02	2,00
Bloque 3	2,39	2,55	2,59	2,53	2,52
Bloque 4	1,99	2,00	1,94	1,95	1,97



Tabla 139 Medidas del espesor de las capas de la pieza 3 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,57	0,49	0,48	0,51	0,51
Capa 2	0,48	0,50	0,51	0,51	0,50
Capa 3	0,48	0,51	0,52	0,51	0,50
Capa 4	0,50	0,50	0,49	0,49	0,49

Tabla 140 Medidas del espesor de la pieza 4 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,54	1,57	1,44	1,47	1,51
Bloque 1 + 2	3,56	3,60	3,49	3,51	3,54
Bloque 1 + 2 + 3	6,06	6,08	6,03	6,07	6,06
Bloque 1 + 2 + 3 + 4	8,00	8,01	8,01	8,02	8,01

Tabla 141 Medidas del espesor de los bloques de la pieza 4 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,54	1,57	1,44	1,47	1,51
Bloque 2	2,02	2,03	2,05	2,04	2,04
Bloque 3	2,50	2,48	2,54	2,56	2,52
Bloque 4	1,94	1,93	1,98	1,95	1,95

Tabla 142 Medidas del espesor de las capas de la pieza 4 de la mezcla R.I + LT 8 %

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,51	0,52	0,48	0,49	0,50
Capa 2	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Capa 3	0,50	0,50	0,51	0,51	0,50
Capa 4	0,49	0,48	0,50	0,49	0,49

- RESINA COMERCIAL



Figura 119 Piezas obtenidas con la resina comercial

Tabla 143 Medidas del espesor de la pieza 1 de la resina comercial

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,23	1,35	1,32	1,23	1,28
Bloque 1 + 2	3,28	3,35	3,33	3,25	3,30
Bloque 1 + 2 + 3	5,90	5,92	5,70	5,80	5,83
Bloque 1 + 2 + 3 + 4	7,73	7,89	7,73	7,85	7,80



Tabla 144 Medidas del espesor de los bloques de la pieza 1 de la resina comercial

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,23	1,35	1,32	1,23	1,28
Bloque 2	2,05	2,00	2,01	2,02	2,02
Bloque 3	2,62	2,57	2,37	2,55	2,53
Bloque 4	1,83	1,97	2,03	2,05	1,97

Tabla 145 Medidas del espesor de las capas de la pieza 1 de la resina comercial

Pieza 1	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,41	0,45	0,44	0,41	0,43
Capa 2	0,51	0,50	0,50	0,51	0,51
Capa 3	0,52	0,51	0,47	0,51	0,51
Capa 4	0,46	0,49	0,51	0,51	0,49

Tabla 146 Medidas del espesor de la pieza 2 de la resina comercial

Pieza 2	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	0,79	0,78	0,91	0,90	0,85
Bloque 1 + 2	2,79	2,83	2,92	2,90	2,86
Bloque 1 + 2 + 3	5,40	5,39	5,40	5,43	5,41
Bloque 1 + 2 + 3 + 4	7,41	7,33	7,45	7,47	7,42



Tabla 147 Medidas del espesor de los bloques de la pieza 2 de la resina comercial

Pieza 2	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	0,79	0,78	0,91	0,90	0,85
Bloque 2	2,00	2,05	2,01	2,00	2,02
Bloque 3	2,61	2,56	2,48	2,53	2,55
Bloque 4	2,01	1,94	2,05	2,04	2,01

Tabla 148 Medidas del espesor de las capas de la pieza 2 de la resina comercial

Pieza 2	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,26	0,26	0,30	0,30	0,28
Capa 2	0,50	0,51	0,50	0,50	0,50
Capa 3	0,52	0,51	0,50	0,51	0,51
Capa 4	0,50	0,49	0,51	0,51	0,50

Tabla 149 Medidas del espesor de la pieza 3 de la resina comercial

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	0,95	1,04	1,05	0,97	1,00
Bloque 1 + 2	3,50	3,54	3,53	3,50	3,52
Bloque 1 + 2 + 3	6,04	6,06	6,08	6,07	6,06
Bloque 1 + 2 + 3 + 4	8,09	7,96	8,10	8,09	8,06

Tabla 150 Medidas del espesor de los bloques de la pieza 3 de la resina comercial

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	0,95	1,04	1,05	0,97	1,00
Bloque 2	2,55	2,50	2,48	2,53	2,52
Bloque 3	2,54	2,52	2,55	2,57	2,55
Bloque 4	2,05	1,90	2,02	2,02	2,00

Tabla 151 Medidas del espesor de las capas de la pieza 3 de la resina comercial

Pieza 3	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,32	0,35	0,35	0,32	0,33
Capa 2	0,64	0,63	0,62	0,63	0,63
Capa 3	0,51	0,50	0,51	0,51	0,51
Capa 4	0,51	0,48	0,51	0,51	0,50

Tabla 152 Medidas del espesor de la pieza 4 de la resina comercial

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,54	1,48	1,54	1,61	1,54
Bloque 1 + 2	3,04	2,98	2,85	2,90	2,94
Bloque 1 + 2 + 3	5,54	5,51	5,49	5,50	5,51
Bloque 1 + 2 + 3 + 4	7,02	7,02	7,05	6,96	7,01



Tabla 153 Medidas del espesor de los bloques de la pieza 4 de la resina comercial

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Bloque 1	1,54	1,48	1,54	1,61	1,54
Bloque 2	1,50	1,50	1,31	1,29	1,40
Bloque 3	2,50	2,53	2,64	2,60	2,57
Bloque 4	1,48	1,51	1,56	1,46	1,50

Tabla 154 Medidas del espesor de las capas de la pieza 4 de la resina comercial

Pieza 4	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Media (mm)
Capa 1	0,51	0,49	0,51	0,54	0,51
Capa 2	0,38	0,38	0,33	0,32	0,35
Capa 3	0,50	0,51	0,53	0,52	0,51
Capa 4	0,37	0,38	0,39	0,37	0,38



A.15 ENSAYOS MECÁNICOS

Para la realización de los ensayos mecánicos se ha empleado el programa *TestXpert II*.



Figura 120 *TestXpert II*

Una vez iniciado el programa, es necesario abrir el archivo que contiene el ensayo que se desea realizar. En este caso, se eligen los ensayos de tracción y flexión dentro del grupo de "Plásticos-termoendurecibles".

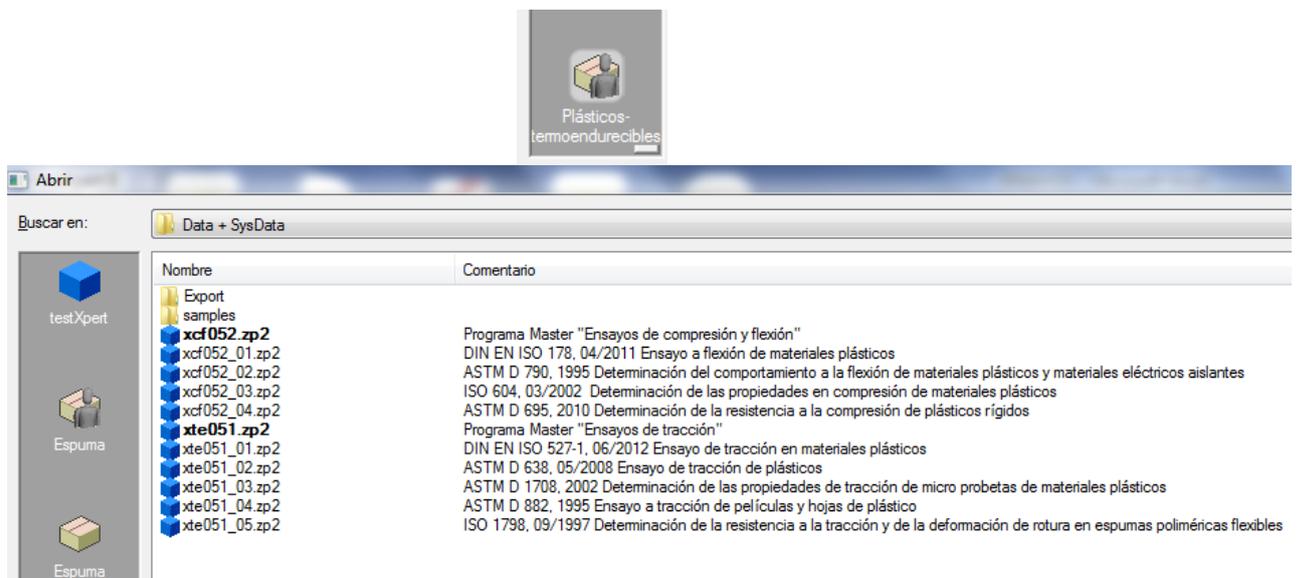


Figura 121 Archivos que contienen diferentes ensayos



A.16 ENSAYOS DE TRACCIÓN

Al abrir este archivo, aparece lo que se muestra en la Figura 122. A partir de ese momento se han de introducir algunos parámetros la longitud de sujeción de las probetas o la velocidad de ensayo, que permanecerán constantes a lo largo de todas las pruebas.

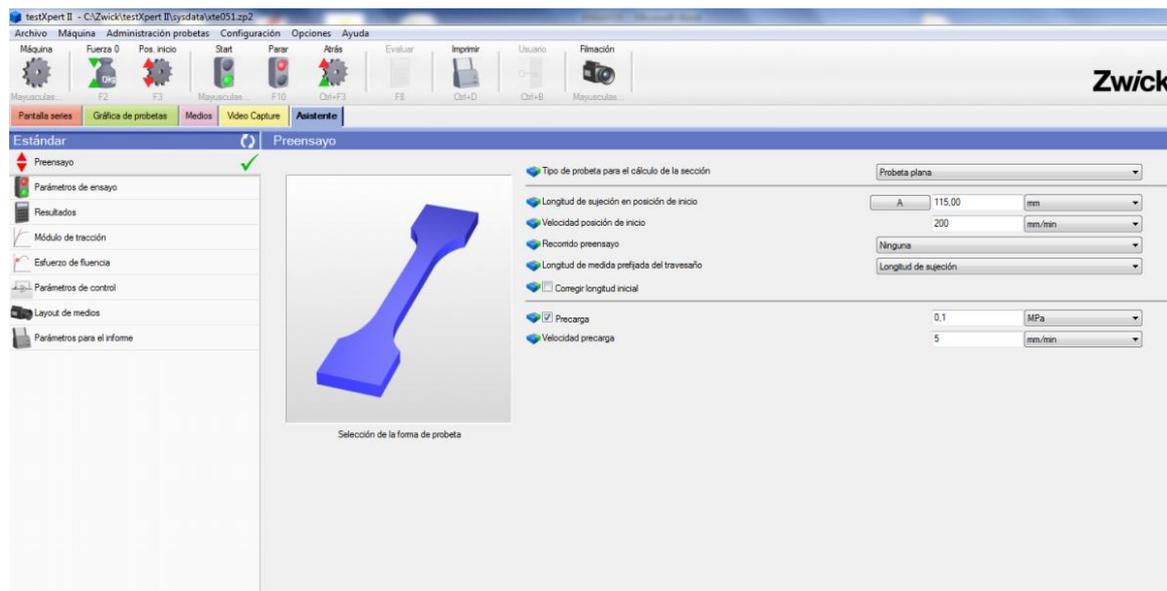


Figura 122 Preparación del ensayo de tracción

Antes de comenzar el ensayo, se debe introducir el espesor (h) y la anchura (b) de la probeta que se va a analizar, ambas en milímetros. De esta forma, el programa calcula automáticamente la sección de rotura [Ec. 2].

$$A_0 \text{ (mm}^2\text{)} = h \text{ (mm)} \times b \text{ (mm)} \quad [\text{Ec. 2}]$$

También se pueden seleccionar los resultados que se quiere que devuelva el programa. En este caso se han escogido los siguientes:

- Deformación en resistencia a la tracción: ϵ^M (%). Es el incremento de longitud que ha experimentado la probeta en el momento en que se aplica la tensión de rotura (fuerza máxima). Se expresa en tanto por ciento.
- Resistencia a la tracción: σ^M (MPa). Se obtiene dividiendo la fuerza máxima que soporta la probeta entre su sección de rotura [Ec. 3].



$$\sigma^M (\text{MPa}) = \frac{F_{m\acute{a}x} (N)}{A_o (\text{mm}^2)} \quad [\text{Ec. 3}]$$

- Módulo de elasticidad o Módulo de Young: E (MPa). Se obtiene calculando la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la zona elástica.

Una vez concluido cada ensayo, el programa permite exportar los resultados a una *Hoja de Cálculo Excel*. De todas las gráficas que pueden realizarse, se escoge la que representa la fuerza ejercida frente a la deformación sufrida por el material.

Según la [Ec. 3], esta curva podrá transformarse fácilmente en otra que represente esfuerzo frente a deformación. De esta forma, se podrá comprobar que calculando la pendiente de dicha recta se obtiene el módulo de Young dado por el programa.



A.17 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN

En este anexo se pueden encontrar todos los datos registrados por el programa *TestXpert II* tras realizar los ensayos de tracción. También se muestran las curvas esfuerzo-deformación de cada uno de los ensayos realizados para cada una de las mezclas.

- R.V + BAPO 5 %

Tabla 155 Resultados de los ensayos realizados con la mezcla R.V + BAPO 5 %

TRACCIÓN	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Media
h (mm)	2,13	1,85	1,66	1,88
b (mm)	6,45	6,52	6,62	6,53
A_o (mm²)	13,74	12,06	10,99	12,26
F_{máx} (N)	55,12	59,91	48,01	54,35
σ^M (MPa)	4,01	4,97	4,37	4,45
ϵ^M (%)	0,45	0,93	0,95	0,77
E (kPa)	6,28	5,40	4,63	5,44

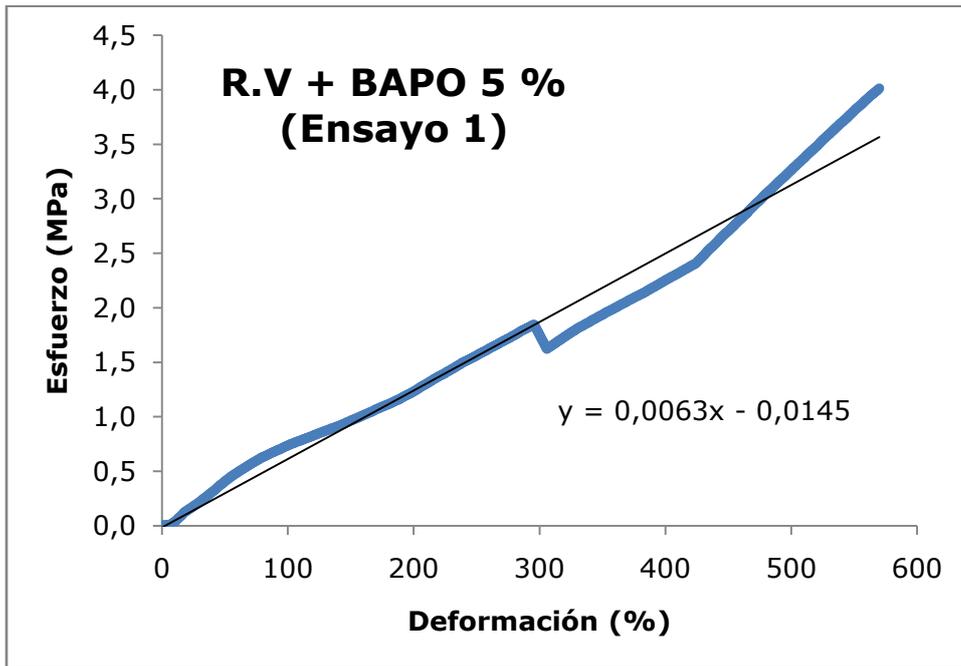


Figura 123 Gráfica esfuerzo-deformación del ensayo 1 con la mezcla R.V + BAPO 5 %

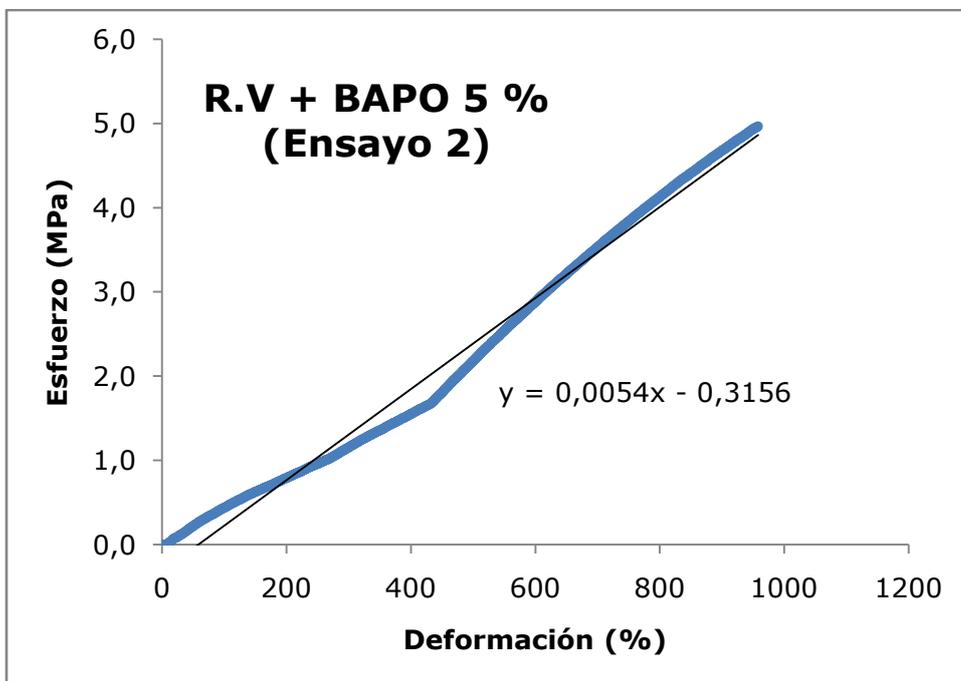


Figura 124 Gráfica esfuerzo-deformación del ensayo 2 con la mezcla R.V + BAPO 5 %

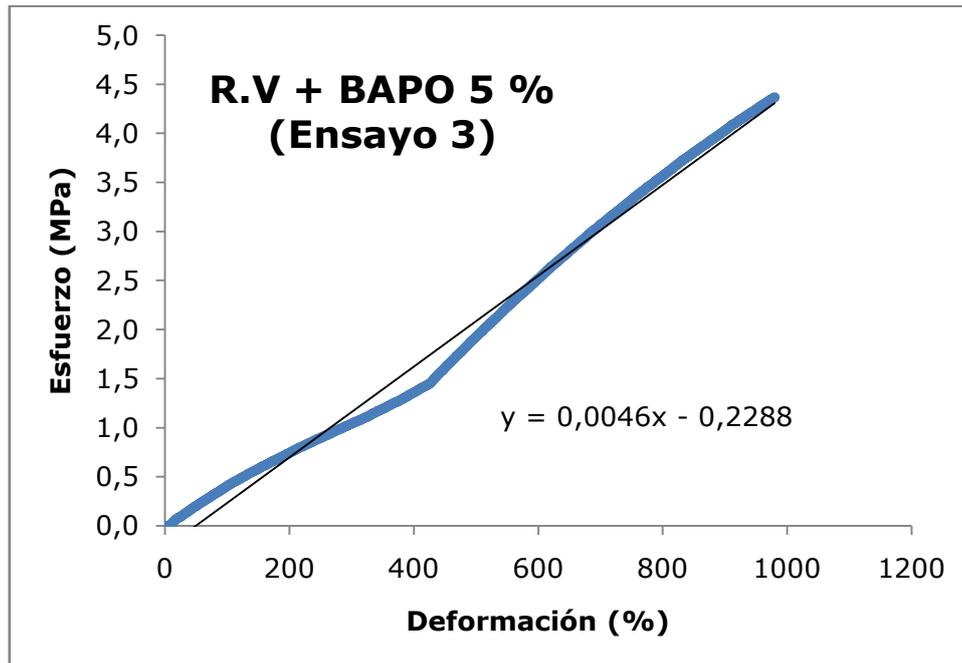


Figura 125 Gráfica esfuerzo-deformación del ensayo 3 con la mezcla R.V + BAPO 5 %

- R.V + LT 8 %

Tabla 156 Resultados de los ensayos realizados con la mezcla R.V + LT 8 %

TRACCIÓN	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Media
h (mm)	0,93	1,17	1,65	1,25
b (mm)	6,48	6,69	6,82	6,66
A_o (mm²)	6,03	7,83	11,25	8,37
F_{máx} (N)	49,60	56,02	72,52	59,38
σ^M (MPa)	8,23	7,16	6,44	7,28
ε^M (%)	1,51	1,41	1,31	1,41
E (kPa)	6,12	5,68	5,36	5,72

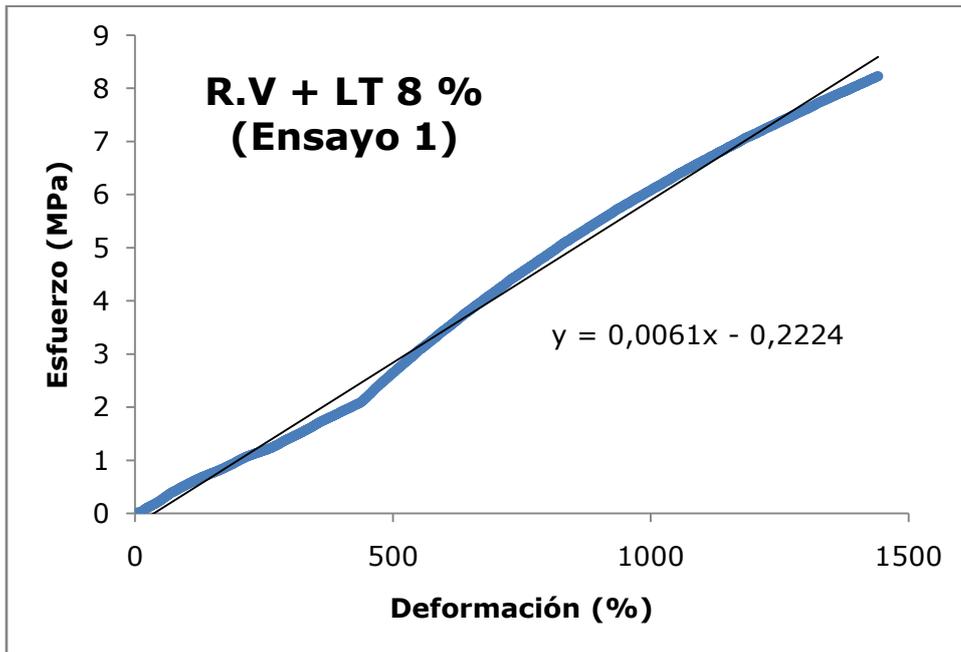


Figura 126 Gráfica esfuerzo-deformación del ensayo 1 con la mezcla R.V + LT 8 %

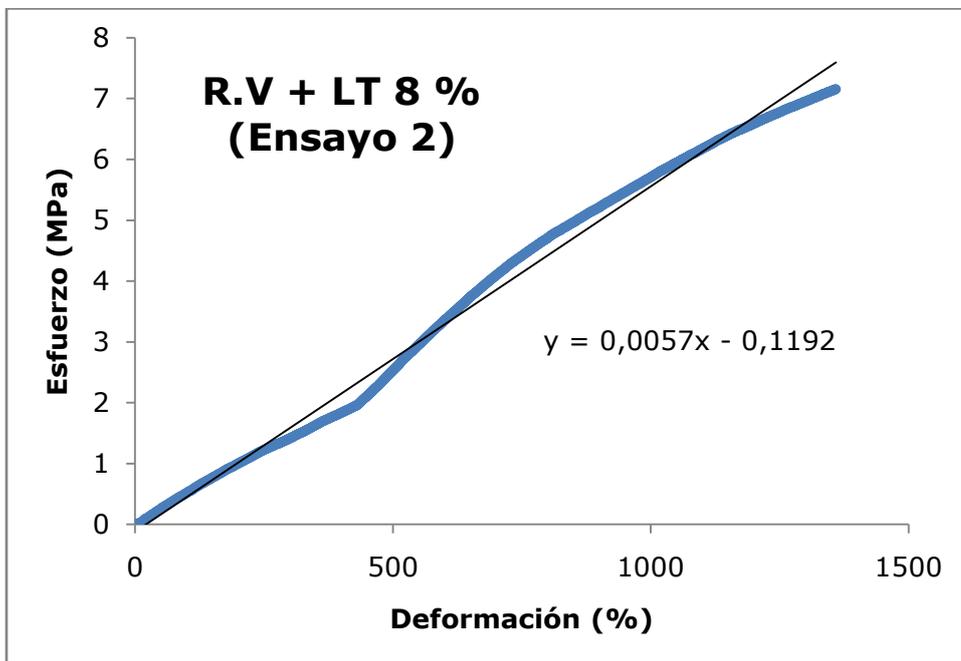


Figura 127 Gráfica esfuerzo-deformación del ensayo 2 con la mezcla R.V + LT 8 %

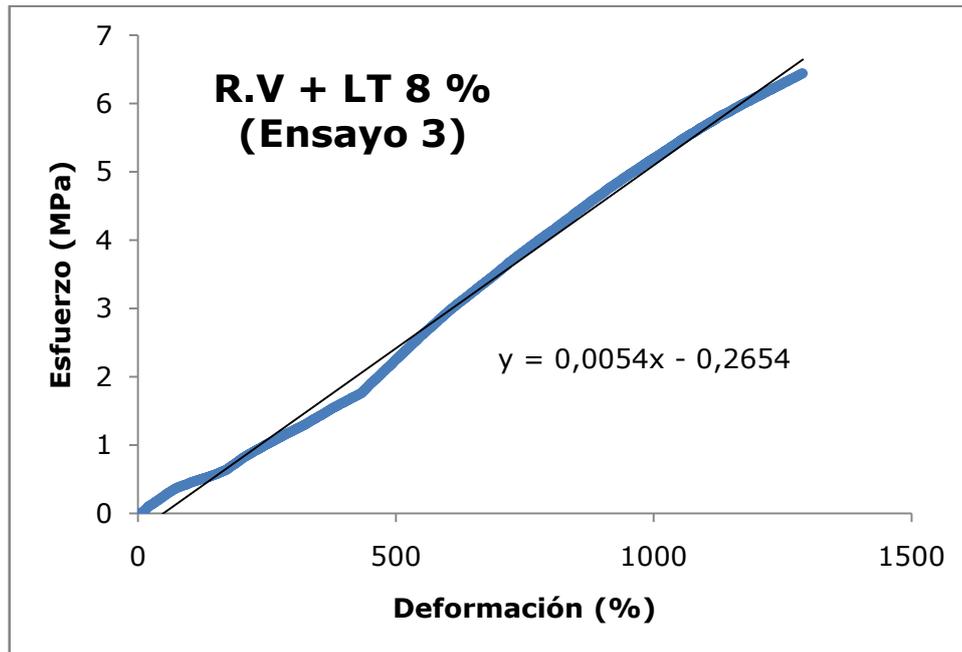


Figura 128 Gráfica esfuerzo-deformación del ensayo 3 con la mezcla R.V + LT 8 %

- R.I + LT 8 %

Tabla 157 Resultados de los ensayos realizados con la mezcla R.I + LT 8 %

TRACCIÓN	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Media
h (mm)	2,54	0,77	—	1,66
b (mm)	6,97	5,81	—	6,39
A_o (mm²)	17,70	4,47	—	11,09
F_{máx} (N)	15,44	3,29	—	9,36
σ^M (MPa)	0,87	0,73	—	0,80
ε^M (%)	1,22	1,05	—	1,14
E (kPa)	0,77	1,26	—	1,01

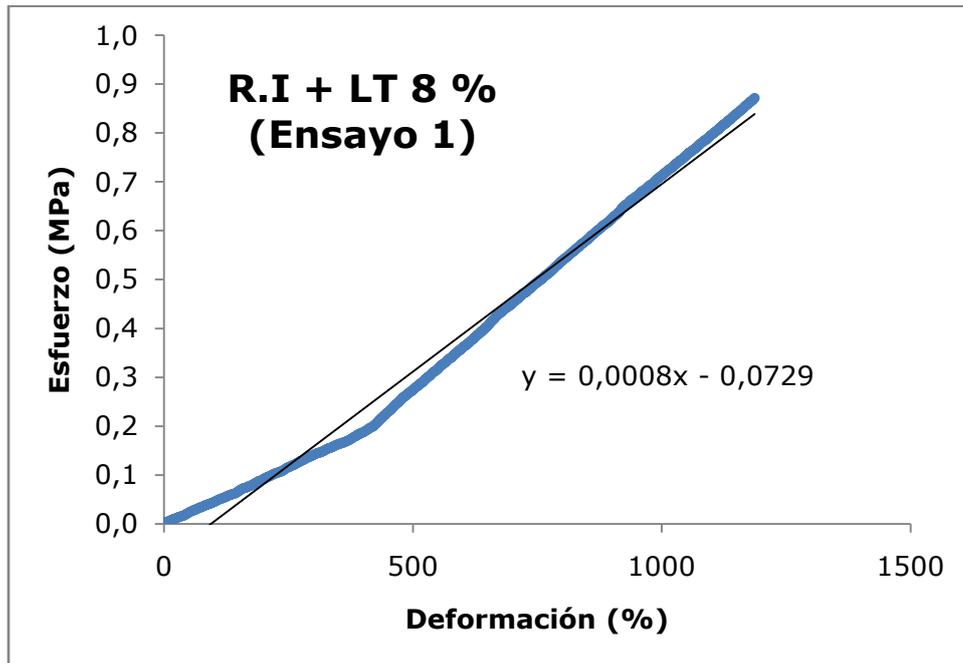


Figura 129 Gráfica esfuerzo-deformación del ensayo 1 con la mezcla R.I + LT 8 %

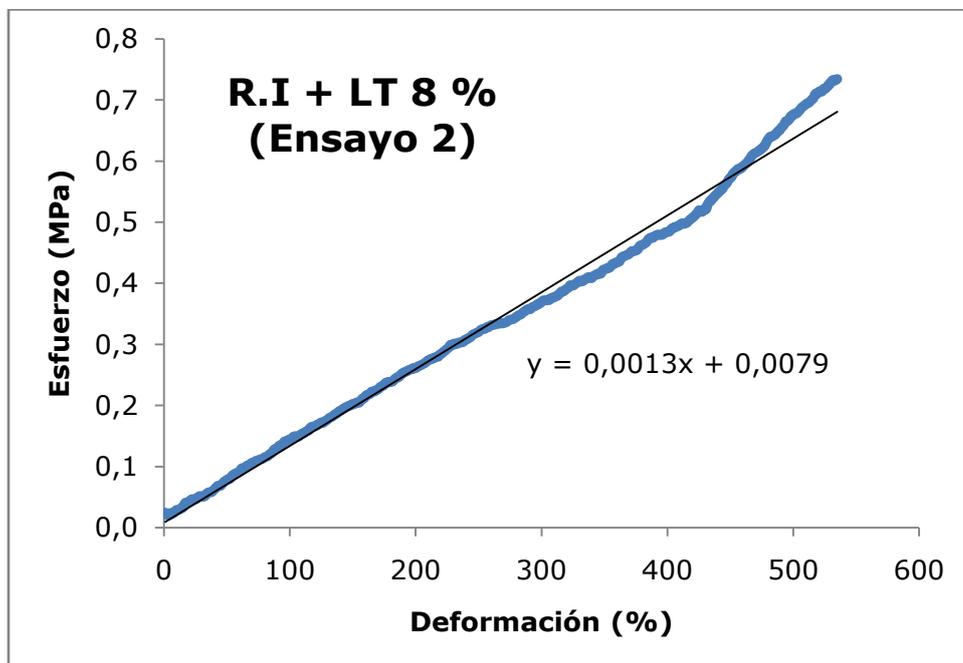


Figura 130 Gráfica esfuerzo-deformación del ensayo 2 con la mezcla R.I + LT 8 %

- RESINA COMERCIAL

Tabla 158 Resultados de los ensayos realizados con la resina comercial

TRACCIÓN	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Media
h (mm)	1,67	2,06	2,06	1,94
b (mm)	6,04	6,45	6,38	6,29
A_o (mm²)	10,09	13,29	13,33	12,24
F_{máx} (N)	64,06	78,27	77,02	73,12
σ^M (MPa)	6,35	5,89	5,78	6,01
ε^M (%)	0,93	1,33	0,92	1,06
E (kPa)	6,28	4,91	6,10	5,76

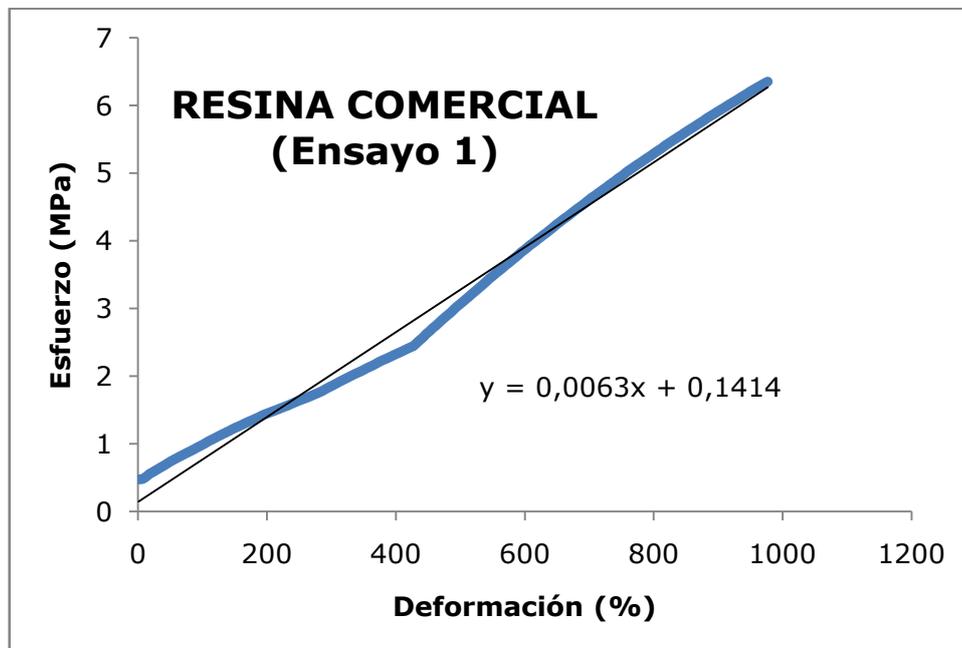


Figura 131 Gráfica esfuerzo-deformación del ensayo 1 con la resina comercial

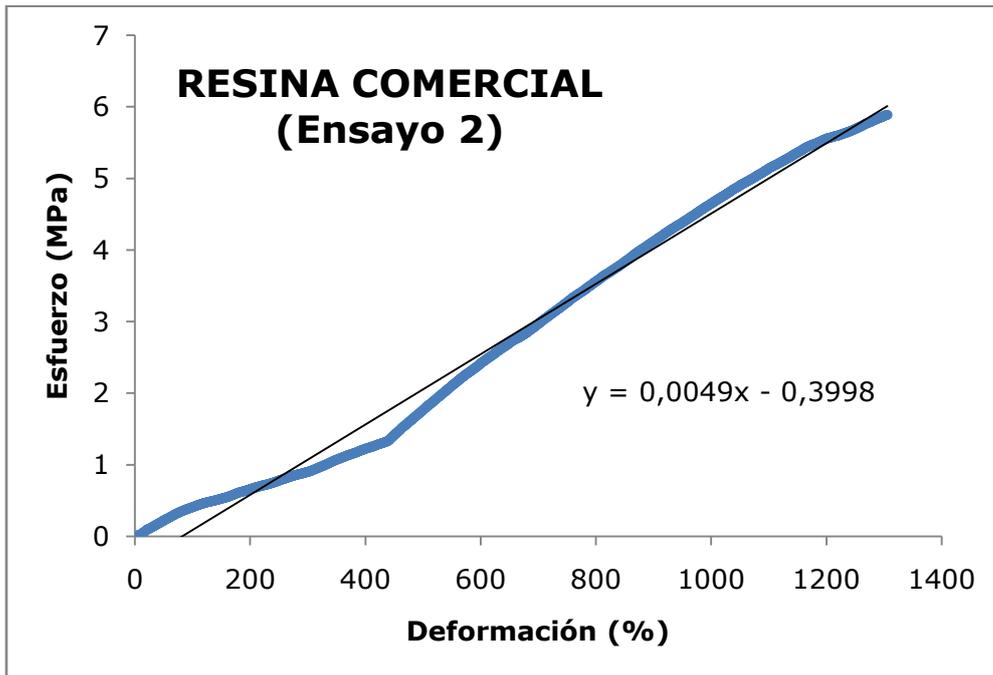


Figura 132 Gráfica esfuerzo-deformación del ensayo 2 con la resina comercial

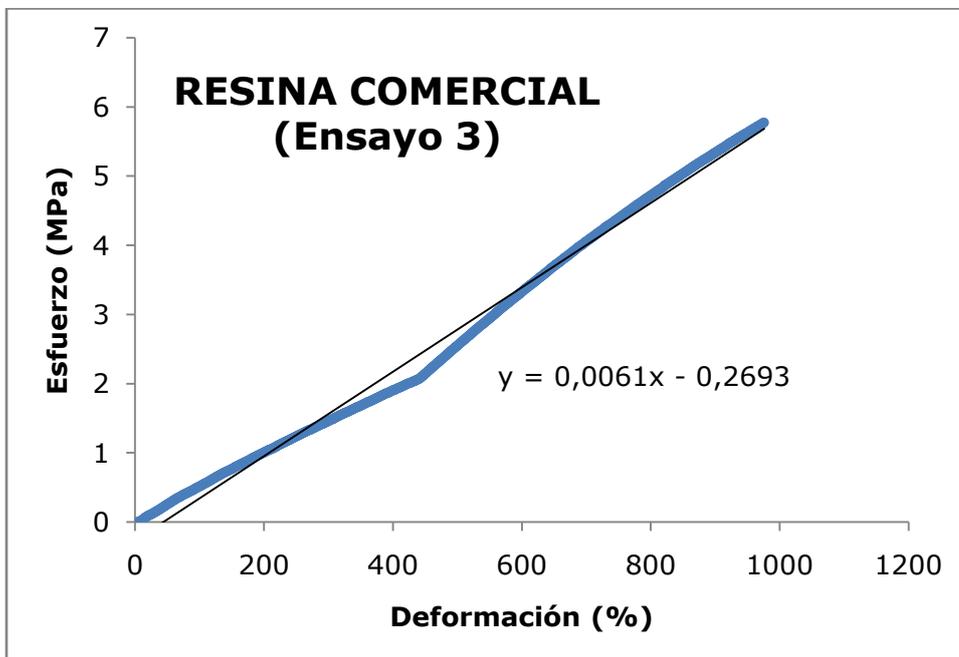


Figura 133 Gráfica esfuerzo-deformación del ensayo 3 con la resina comercial