



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCION DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

TEMA:

**“ANÁLISIS DE DUREZA, RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y
DESGASTE DE MATERIALES TERMOPLÁSTICOS OBTENIDOS A
PARTIR DE LA RESINA TOUGH DE PROTOTIPADO ROBUSTO
PARA IMPRESIÓN 3D POR ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA)”**

AUTOR: Villena López Oscar Rodrigo

TUTOR: Ing. Mg Pérez Salinas Cristian Fabian

AMBATO - ECUADOR

ENERO - 2021

CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: "**ANÁLISIS DE DUREZA, RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y DESGASTE DE MATERIALES TERMOPLÁSTICOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA RESINA TOUGH DE PROTOTIPADO ROBUSTO PARA IMPRESIÓN 3D POR ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA)**" elaborado por el Sr. **Villena López Oscar Rodrigo**, portador de la cédula de ciudadanía: C.I. 1803790789 estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica,

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autor
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes
- Está concluido en su totalidad

Ambato, Enero 2021



.....
Ing. Mg. Pérez Salinas Cristian Fabian.

TUTOR

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Yo, Villena López Oscar Rodrigo, portador de la C.I. 183790789 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente trabajo experimental: "**ANÁLISIS DE DUREZA, RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y DESGASTE DE MATERIALES TERMOPLÁSTICOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA RESINA TOUGH DE PROTOTIPADO ROBUSTO PARA IMPRESIÓN 3D POR ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA)**", así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor de la investigación, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, Enero 2021



.....
Villena López Oscar Rodrigo

C.I. 1803790789

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él, un documento para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimonial de mi Trabajo Experimental con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, Enero 2021



.....
Villena López Oscar Rodrigo

C.I. 1803790789

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del tribunal aprueban el informe del Trabajo Experimental, realizado por el estudiante Villena López Oscar Rodrigo de la carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: **"ANÁLISIS DE DUREZA, RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y DESGASTE DE MATERIALES TERMOPLÁSTICOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA RESINA TOUGH DE PROTOTIPADO ROBUSTO PARA IMPRESIÓN 3D POR ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA)"**.

Ambato, Enero 2021

Para constancia firman:



.....

Ing. Mg. Nuñez Nuñez Diego Fernando
Miembro del Tribunal



.....

Ing. Mg. Arroba Arroba César Hernán
Miembro del Tribunal

DEDICATORIA

Para toda mi familia quienes me han acompañado de manera incondicional en este largo camino. Un camino lleno de obstáculos, alegrías y tristezas. Un camino que continua y en el cual no hay mayor secreto que la constancia, la dedicación y la disciplina. Varios esperaran ver el nombre de mis familiares aquí, pero en este caso no quiero que nadie se quede fuera. Todos y cada uno de ellos son el principal motivo para que mis logros sean dedicados con el mayor respeto y cariño hacia ellos.

Oscar Villena

AGRADECIMIENTO

En este trajinar universitario hay varios actores a los cuales me gustaría agradecer infinitamente. La Universidad Técnica de Ambato por medio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica me dieron la oportunidad de lograr otro de mis objetivos personales, esto siempre será motivo de orgullo para mí.

A mis profesores los cuales fueron los encargados de impartir sus conocimientos basados siempre en la ciencia sin dejar de lado los principios y valores que plantea esta sociedad. De manera especial a mi tutor Ing. Mg. Cristian Pérez quien con su predisposición y orientación motivó a la culminación de este proyecto.

A mis compañeros y amigos con los cuales compartí todos estos años de formación académica y a quienes deseo siempre lo mejor.

A toda mi familia que me dan la motivación necesaria para cumplir con mi deber. Pero más que nada son los artífices de implantar una idea en mí la cual espero sirva de motivación para más personas. “Todo lo que hagas hazlo de la mejor manera posible”.

Dios es un pasajero silencioso en nuestro sendero, agradecido siempre estaré por sus bendiciones no solo para mí, también para todos aquellos que me rodean.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
RESUMEN EJECUTIVO	xiii
EXECUTIVE SUMMARY	xiv
CAPÍTULO I.....	1
1.1. Antecedentes Investigativos	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General.	3
1.2.2. Objetivos Específicos	4
1.3. Hipótesis.....	5
1.3.1. Variable Dependiente	5
1.3.2. Variable Independiente.....	5
1.4. Marco Teórico	5
1.4.1. Manufactura	5
1.4.2. Introducción a la Impresión 3D	11
1.4.3. Impresión 3D por Estereolitografía	17
1.4.4. Ensayos	23
CAPÍTULO II.....	31
METODOLOGÍA	31
2.1. Materiales	31
2.2. Métodos	33
2.2.1. Nivel de Investigación	33

2.2.2. Metodología	34
2.3. Protocolo Para La Recolección de Datos	39
2.4. Elaboración de las Probetas.....	40
2.5. Plan de Procesamiento y Análisis	42
2.6. Ensayos.....	42
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
3.1. Análisis y discusión de los resultados.	46
3.2. Análisis de Resultados.....	53
3.3. Verificación de la Hipótesis	64
CAPITULO IV	65
4.1. Conclusiones	65
4.2. Recomendaciones	66
MATERIALES DE REFERENCIA.....	68
Referencias Bibliográficas.....	68
Anexos.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Manufactura en el ámbito técnico. [7].....	6
Figura 2. Manufactura en el ámbito económico. [7].....	6
Figura 3. Clasificación de la Manufactura. [7]	9
Figura 4. Conformación de una pieza por impresión 3D [8].	11
Figura 5. Impresora 3D FDM [11].....	13
Figura 6. Soportes en impresión 3D FDM [12]	14
Figura 7. Impresión SLS [13]	14
Figura 8. Impresora 3D PolyJet [14].....	15
Figura 9. Esquema de una impresora SLA [15].....	15
Figura 10. Fases de la Impresión 3D.....	17
Figura 11. Proceso de Impresión 3D por Estereolitografía [20]	18
Figura 12. Tiempo y temperatura de post curado para una resina utilizada en estereolitografía [2]	20
Figura 13. Partes constitutivas de una impresora 3D SLA. [15]	21
Figura 14. Resina Gris SLA [26]	22
Figura 15. Máquina de ensayos de Tracción. [3].....	24
Figura 16. Ensayo de Tracción.	26
Figura 17. Durómetro.....	27
Figura 18. Abrasímetro.	28
Figura 19. Muelas Abrasivas.	29
Figura 20. Esquema del sistema giratorio del Abrasímetro. [27]	29
Figura 21. Proceso de Desgaste.	30
Figura 22. Elaboración de Probetas.	41
Figura 23. Efectos Principales en el Esfuerzo de Tracción de las Resinas	60
Figura 24. Efectos Principales en la resistencia a la abrasión de las probetas	61
Figura 25. Efectos Principales en la Dureza de las resinas	63
Figura 26. Probetas para ensayo de abrasión de Resina Tough	71
Figura 27. Probetas para ensayo de abrasión de Resina Clear	71

Figura 28. Ensayo de abrasión aplicado a probetas de resina Tough	72
Figura 29. Ensayo de abrasión aplicado a probetas de resina Clear	72
Figura 30. Huella marcada producto del ensayo de abrasión	73
Figura 31. Pesaje de las probetas antes del ensayo de abrasión.....	73
Figura 32. Pesaje de las probetas antes del ensayo de abrasión.....	74
Figura 33. Pesaje de las probetas después del ensayo de abrasión	74
Figura 34. Pesaje de las probetas después del ensayo de abrasión	75
Figura 35. Ensayo de Dureza aplicado a las probetas.....	75
Figura 36. Tiempos recomendados para el post curado de las resinas [31].....	76
Figura 37. Gráfica T vs Módulo para la resina Clear (Objetivo: determinación de los tiempos de curado recomendados) [31]	76
Figura 38. Gráfica T vs Módulo para la resina Tough (Objetivo: determinación de los tiempos de curado recomendados) [31]	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tecnologías de impresión 3D existentes [16].	16
Tabla 2. Materiales utilizados.	31
Tabla 3. Experimentos Requeridos.	36
Tabla 4. Experimentos Requeridos.	36
Tabla 5. Leyenda.	37
Tabla 6. Operacionalización de variables	38
Tabla 7. Operacionalización de variables	39
Tabla 8. Procedimiento para ensayos de abrasión.	42
Tabla 9. Procedimiento para ensayos de dureza.	45
Tabla 10. Resultados Ensayo de Tracción para la resina Clear. [30, 31, 32, 33]	54
Tabla 11. Resultado Ensayo de Tracción para la Resina de ingeniería Tough. [30, 31, 32, 33]	55
Tabla 12. Análisis estadístico.	56
Tabla 13. Términos de las fórmulas.	56
Tabla 14. Términos de las fórmulas.	57
Tabla 15. Términos de las fórmulas.	58
Tabla 14. Relación Matemática resumida	58
Tabla 17. Términos de las fórmulas.	59
Tabla 18. Análisis de la varianza	60
Tabla 19. Análisis de la varianza	62
Tabla 20. Análisis de la varianza	63

RESUMEN EJECUTIVO

Para este trabajo experimental se utilizó la resina Clear y resina Tough. La resina Clear es una de las resinas para prototipos comercialmente más utilizadas. Por otro lado, la resina Tough se usa en el campo de la ingeniería (principalmente en componentes mecánicos a escala). Todas estas resinas son utilizadas en la impresión 3D por estereolitografía.

La investigación consideró 3 tiempos distintos de post-curado, todos ellos recomendados por el fabricante. Se utilizó tres tipos de curado: sin curado, curado normal y curado máximo. Para la resina Clear, se aplicó tiempos de post-curado de 0, 15 y 30 minutos bajo la incidencia de los rayos UV. Mientras que para la resina Tough se consideró tiempos de 0, 60 y 120 minutos.

Los modelos CAD se elaboraron teniendo en cuenta normas internacionales de ensayo (ASTM D638 e ISO 9352). Esto obedece a la realización de ensayos de dureza, tracción y abrasión. Los ensayos de abrasión y dureza se realizaron en los laboratorios de la universidad. El ensayo de tracción es un compendio de varios autores cuya información ha sido verificada y comprobada, es decir, su nivel de confianza es elevado.

Una vez realizados los ensayos, se determinó que la resina estándar (Clear), en lo referente a la dureza, posee un mayor grado comparado con la Tough. Por otra parte, la resina de Ingeniería (Tough) posee menor resistencia a la abrasión. Los resultados de tracción afirman que ambas resinas no poseen una diferencia marcada en sus comportamientos.

PALABRAS CLAVE: Estereolitografía, SLA, Impresión 3D, Resina Tough, Resina Clear, Abrasión, Dureza, ISO 9352.

EXECUTIVE SUMMARY

For this experimental work, Clear resin and Tough resin were used. Clear resin is one of the most widely used commercial prototype resins. On the other hand, Tough resin is used in the engineering field (mainly in scale mechanical components). All these resins are used in stereolithography 3D printing.

The investigation considered 3 different post-cure times, all of them recommended by the manufacturer. Three types of curing were used: no curing, normal curing and maximum curing. For the Clear resin, post-curing times of 0, 15 and 30 minutes were applied under the incidence of UV rays. While for the Tough resin, times of 0, 60 and 120 minutes were considered.

The CAD models were produced taking into account international testing standards (ASTM D638 and ISO 9352). This is due to hardness, traction and abrasion tests. The abrasion and hardness tests were carried out in the university laboratories. The tensile test is a compendium of several authors whose information has been verified and approved, that is, their level of confidence is high.

Once the tests had been carried out, it was determined that the standard resin (Clear), in terms of hardness, has a higher grade compared to Tough. On the other hand, Engineering resin (Tough) has less resistance to abrasion. The tensile results affirm that both resins do not have a marked difference in their behavior.

KEY WORDS: Stereolithography, SLA, 3D Printing, Tough Resin, Clear Resin, Abrasion, Hardness, ISO 9352.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes Investigativos

En el desarrollo del presente trabajo, es necesario citar varias investigaciones consideradas en el progreso del tema planteado. Mismas que han son pilares fundamentales en el desarrollo del documento.

"ESTEREOLITOGRAFÍA, SOLUCIONES 3D CON GRAN ACABADO SUPERFICIAL". Corresponde a una investigación planteada por Ideos 3D Print Solutions, (Catálogo), en el cual se describen varios aspectos básicos relacionados a la impresión 3D por estereolitografía. Se indica el funcionamiento de las máquinas, partes constitutivas, las diversas resinas utilizadas en el proceso de impresión, así como también las aplicaciones más comunes de los productos obtenidos a partir de la utilización de esta tecnología. Por otra parte, se expone los resultados obtenidos a partir del ensayo de tracción, impacto y deflexión de varios materiales tales como el ABS, Polipropileno y una resina estándar comúnmente utilizada en este campo [1].

"GUÍA TÉCNICA DE IMPRESIÓN 3D". elaborado por Erasmus + 3D Printing VET Centres, plantea una de las diversas metodologías utilizadas en la estereolitografía, al igual que la anterior investigación, hace alusión a los diversos parámetros sobre los cuales debe actuar la persona usuaria de este sistema. Uno de los principales atributos de este documento es que aborda una serie de temas y subtemas sobre los cuales se debe actuar una función a la obtención del producto deseado entre ellos se tiene [2].

- Producción de la impresión 3D
 - Digitalización del modelo
 - Exportación de la pieza modelada
 - Análisis de la pieza
 - Estructuras destinadas al soporte de la pieza en producción
 - Rellenos en el modelo
 - Orientación y Posicionamiento del objeto a producir

- Generación de los respectivos códigos G.
- Impresión 3D
 - Extracción del modelo una vez concluido el proceso de producción
 - Post – proceso
- Softwares destinados a la impresión 3D
 - Software de diseño
 - Programas destinados a la prueba, orientación y reparación de modelos
 - Software generador de códigos G
- Materiales para la impresión 3D SLA.
- Limitaciones de los productos obtenidos a partir de este campo de la manufactura

"LA ESTEREOLITOGRAFÍA EN LA FACULTAD DE ODONTOLOGÍA DE LA UNAM". Corresponde a un estudio realizado por René Jiménez Castillo y Alejandro Benavides Ríos en la UNAM y publicado en la Revista Odontológica Mexicana explica la importancia de la estereolitografía en el campo de la odontología. El planteamiento de este trabajo es evidenciar como la estereolitografía se ha convertido en una alternativa eficiente al momento del tratamiento y diagnóstico de pacientes con algún defecto del tipo congénito. Además, hace un enfoque general sobre aspectos técnico – básicos relacionados a la impresión 3D SLA [3].

"ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DE RESISTENCIA DE LAS RESINAS SLA BAJO TASAS DE DEFORMACIÓN ALTAS Y BAJAS". Este análisis planteado por Danuta Miedzinska, Roman Gieleta y Ewelina Malek y publicado en Mechanics of Materials denota un estudio de las propiedades del material de las resinas utilizadas para la creación de prototipos rápidos de estereolitografía. Las muestras se prepararon de acuerdo con las pautas de los productores y se cargaron de dos maneras: casi estáticas y con el uso de una barra Hopkinson. Se consideraron diferentes tasas de deformación. El material investigado mostró diferencias

significativas al responder a las diferentes cargas de velocidad de deformación. El trabajo presentado se utilizará en el modelado numérico constitutivo de piezas SLA [4].

"ANÁLISIS DE LOS FACTORES DE INFLUENCIA EN LA CALIDAD DE LAS PIEZAS EN TECNOLOGÍA MICRO-SLA". Es un trabajo publicado en *Procedia Manufacturing* páginas 856 – 863 y realizado por Martínez – Pellitero en el cual se estudia la influencia de diferentes parámetros en el proceso Micro-SLA (para producción a pequeña escala). Los factores analizados son el tipo de resina, la altura de la capa, la orientación de la pieza y las operaciones de limpieza. El estudio incluye el uso de dos resinas diferentes, ampliamente utilizadas en aplicaciones dentales y joyas, y el efecto de cambiar la orientación de las primitivas geométricas en la calidad de impresión micro-SLA [5].

"LA PREPARACIÓN DE CERÁMICA COMPUESTA ZRO₂-AL₂O₃ MEDIANTE IMPRESIÓN SLA-3D Y PROCESAMIENTO DE SINTERIZACIÓN ". Liu Xiaoyan se centra en la determinación de la resistencia a la fractura y tenacidad de un compuesto cerámico obtenido a partir de impresión 3D SLA. En este documento se evidencia como la temperatura de sinterización y la influencia de rayos UV propios del proceso afectan a las propiedades mecánicas del elemento. Una de las conclusiones a las que ha llegado el autor es que a una temperatura de sinterización de 1500°C con un curado de 60 minutos, la densidad puede alcanzar los 3.75 g/cm³, además, la tenacidad a la fractura del elemento puede alcanzar los 4.05 Mpa/m² [6].

1.2.Objetivos

1.2.1. Objetivo General.

- Analizar la dureza, resistencia a la tracción y desgaste de materiales termoplásticos obtenidos a partir de la resina Tough de prototipado robusto para impresión 3D por estereolitografía (SLA)

Es necesario realizar una investigación del tipo experimental para analizar los datos obtenidos a partir de la realización de los ensayos de dureza, abrasión y tracción de materiales termoplásticos obtenidos mediante un proceso de manufactura 3D por estereolitografía. Las pruebas serán realizadas considerando varios tipos de curado y dos tipos de resina de uso común en este campo.

1.2.2. Objetivos Específicos

- ***Determinar los parámetros más adecuados de manufactura para la impresora 3D por estereolitografía, así como también para la resina utilizada.***

A través de una investigación realizada en los respectivos catálogos relacionados a cada una de las resinas en utilización se establecerá los parámetros adecuados tanto para la impresora 3D como la resina. Considerando los aspectos a variar en este trabajo (Tiempo de curado)

- ***Confeccionar probetas para los ensayos de dureza y abrasión bajo las normas ASTM D 2240 e ISO 9352 respectivamente.***

Con fundamento en las respectivas normas de ensayo se confeccionará las probetas para la realización de las pruebas establecidas. En su mayoría las pruebas se llevarán a cabo en los laboratorios de la universidad.

- ***Determinar las propiedades mecánicas del material obtenido por estereolitografía (SLA)***

Se realizará los ensayos tanto de abrasión y dureza en los laboratorios de la universidad con instrumental adecuado y que cumpla con la respectiva normativa. Además, para la caracterización del material se considerarán los resultados de ensayos de tracción obtenidos de varios autores. Se cumplirá estrictamente con los debidos procedimientos para la realización de las pruebas.

- ***Analizar estadísticamente los resultados obtenidos a partir de los ensayos planteados.***

Para el análisis estadístico será imperativo el uso de un software estadístico mediante el cual se podrá ingresar, analizar y emitir criterios de valoración a partir del comportamiento de los datos arrojados por los ensayos correspondientes.

1.3. Hipótesis

La resina Tough de prototipado robusto presenta una mejor resistencia a la tracción, desgaste y dureza que la resina estándar utilizada para impresión 3D por estereolitografía

1.3.1. Variable Dependiente

- La variable dependiente son las propiedades de dureza, desgaste y abrasión.

1.3.2. Variable Independiente

- Como variable independiente se encuentra el tipo de resina utilizada en el proceso de impresión 3D. para este caso es la resina estándar (Clear) y la resina de ingeniería (Tough)

1.4. Marco Teórico

1.4.1. Manufactura

La manufactura proviene del latín *Manus* (mano) y *factus* (hacer), combinando las dos se obtiene *hacer a mano* [7]. Existen dos definiciones: tecnológica y otra relacionada con la economía.

Tecnológicamente hablando la manufactura corresponde a la influencia de procesos del tipo físico y químicos que tiene como objetivo transformar las propiedades, geometría y/o apariencia física de un determinado material, Figura 1. La meta es transformarlo en productos con un fin determinado. Cabe recalcar que dentro de la manufactura también ingresan los procesos de ensamblaje de elementos. Por lo general, la manufactura depende

de una combinación de operaciones organizadas secuencialmente, así como también de máquinas y equipos destinados a un fin común [7].

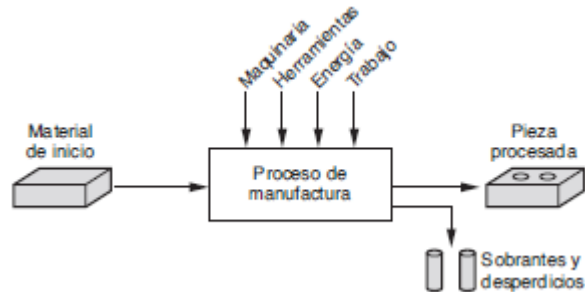


Figura 1 Manufactura en el ámbito técnico. [7]

En el campo económico, se dice que la manufactura equivale a la transformación de elementos en piezas de utilidad cuyo valor económico sea mayor al valor inicial, Figura 2. Es decir, agregar valor por medio de diversos procesos, tales como el ensamblaje, es el eje sobre el cual gira la manufactura en el ámbito económico.

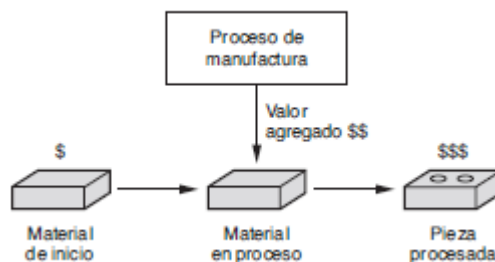


Figura 2. Manufactura en el ámbito económico. [7]

1.4.1.1. La Manufactura y sus Materiales

En conformidad con [7], la manufactura posee 4 grandes grupos de materiales utilizados comúnmente: Metales, Cerámicos, Poliméricos, y Compuestos. Cada uno de ellos posee un tratamiento diferente debido a la diferencia entre propiedades tanto físicas como químicas. Esto a su vez, provoca que los procesos de manufactura sean totalmente distintos diferenciándose también en la maquinaria y tecnología utilizada.

A continuación, se describen cada uno de los materiales mencionados.

Materiales Metálicos

Los materiales metálicos utilizados comúnmente en la manufactura son aleaciones que se componen de dos o más elementos. A su vez los materiales metálicos se subdividen dos grandes grupos:

1) Ferrosos.

Tiene su base en el hierro. Comercialmente son el grupo mayoritario y más importante a nivel mundial [7]. Dentro de este grupo figuran el acero y hierro colado los mismos que son aleaciones con un 0.02% - 2.11% y del 2% - 4% respectivamente de carbono [7].

2) No Ferrosos

Este grupo abarca todos los elementos metálicos y aleaciones que no forman parte de los metales ferrosos. En esta división figuran elementos como: el níquel, la plata, oro, zinc, magnesio, aluminio entre otros.

Materiales de tipo Cerámico

Este tipo de materiales se caracterizan por poseer elementos del tipo metálicos y no metálicos (Carbono, nitrógeno y oxígeno) [7]. Entre los más destacables de este grupo se encuentran:

- Sílice
- Carburo de Silicio
- Arcilla
- Nitruros
- Carburos
- Alúminas

A su vez, los cerámicos se subdividen en dos grupos de acuerdo al objetivo de procesamiento:

- 1) Cerámicos Cristalinos (Unión de polvos a temperatura alta)
- 2) Vidrios

Materiales Poliméricos

Este tipo de materiales nacen gracias a la repetición de unidades llamadas monómeros. Al igual que los demás grupos de materiales, se subdividen en:

1) Termoplásticos

Materiales en los cuales la influencia del calor y el enfriamiento no llegan a alterar la estructura molecular. Figuran materiales como: Polietileno, cloruro de polivinilo, poliestirenos, entre otros.

2) Termoestables

Necesitan de un curado posterior a su proceso de conformación. Aquí figuran los fenoles y resinas.

3) Elastómeros

Polímeros cuyo comportamiento se caracteriza por ser elevadamente elástico. Ejemplos de este tipo de polímeros son el neoprenos, caucho, poliuretano y silicón.

Materiales Compuestos

Los materiales compuestos, en otras palabras, se podría argumentar que son producto de la combinación de los tres tipos de materiales expuestos con anterioridad. Básicamente son materiales compuestos aquellos conformados por dos fases las cuales al unirse de manera homogénea dan lugar a un compuesto cuyas propiedades son superiores a la de las fases individuales. Comúnmente consisten de la mezcla de una matriz con partículas o fibras de cualquier tipo. Las fibras que lo conforman pueden ser del tipo sintético o natural [7].

1.4.1.2. Procesos de Manufactura

En la figura 3, se establece la clasificación de los procesos de manufactura según [7].

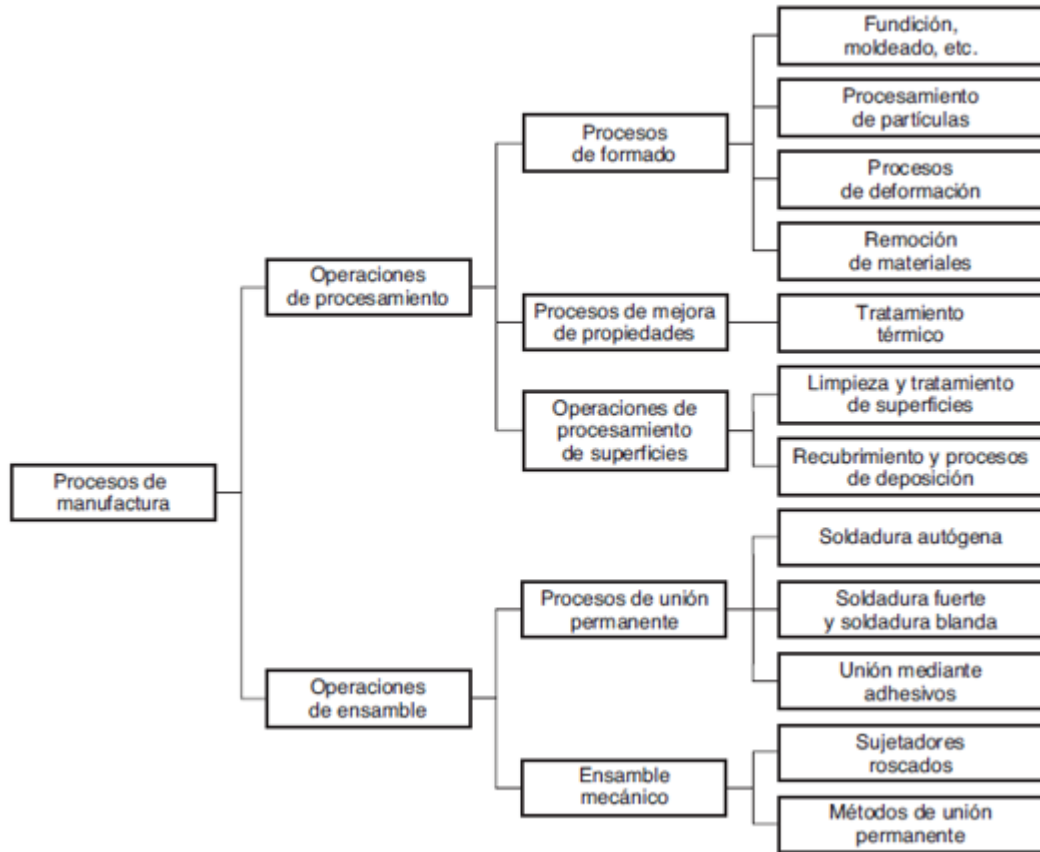


Figura 3. Clasificación de la Manufactura. [7]

Según [7], la manufactura tiene sus bases en dos ejes de operación: En el Procesamiento y Ensamblaje.

Procesamiento

Este grupo hace referencia a un elemento el cual circula por un circuito en el cual, en cada cambio de fase, se denota un acercamiento al producto final que se requiere obtener. Los cambios involucran a la geometría, apariencia, acabados y demás tipo de procesos que le agregan un valor a la materia en tratamiento.

Ensamblaje

La operación de ensamblaje hace alusión a la unión de dos o más partes constitutivas de un elemento nuevo.

1.4.1.3. Procesos y Tecnologías Especiales Relacionadas con el Ensamble

Varias tecnologías que han surgido con el pasar de los años no se han podido ajustar a la clasificación planteada en la figura 3. Uno de los motivos se debe a que tecnologías como la impresión 3D están direccionadas a satisfacer necesidades de carácter especial. Es por ello que la creación rápida de prototipos no se encuentra dentro de las operaciones convencionales de manufactura.

Creación Rápida de Prototipos (RP)

Como su nombre lo indica esta tecnología está direccionada a la creación de prototipos de ingeniería acortando el tiempo empleado por métodos convencionales de manufactura. La base fundamental de este tipo de tecnologías se encuentra en un modelo CAD (computer aided desing – Diseño asistido por computadora). En la actualidad varias son las técnicas empleadas de creación rápida; la impresión 3D es una de ellas. La necesidad principal por la que nace esta tecnología se debe a que, en especial los diseñadores, deben poseer un modelo físico del producto sobre el cual se encuentren trabajando. A partir de allí, se podrían generar criterios de diseño los cuales estén direccionados a la potencialización y desarrollo del modelo.

A su vez la creación rápida de prototipos se divide en dos categorías.

1) Procesos de Remoción de Material

En el proceso de remoción de material se hace referencia a actividades como el fresado, taladrado y demás acciones en las cuales es necesario construir el modelo a partir de materia prima en bruto (en bloques). A partir de un bloque y gracias a la remoción de material se obtiene un objeto con una forma y acabado

determinado. En el prototipado rápido involucra la utilización de materiales como la cera. Por esta razón se menciona en [7], que las actividades realizadas mediante este tipo de operaciones son de escritorio.

2) Procesos de Adición de Material

El principio básico de esta operación es la formación de un modelo determinado y modelado mediante un programa CAD a partir de la adición de capas desde una posición inferior hasta su inmediato superior. La metodología utilizada es variada se puede utilizar la deposición de filamentos, rayos láser todo dependerá del tipo de tecnología utilizada.

1.4.2. Introducción a la Impresión 3D

El principio básico de la impresión 3D, desde sus inicios, es la materialización de modelos CAD previamente establecidos [8]. A lo largo del tiempo se han establecido una serie de técnicas utilizadas en la manufactura de materiales tales como: el tallado, moldeado, perforado, entre otros. La impresión 3D es equivalente a un proceso de adición continua de materia hasta conformar la pieza a reproducir, Figura 4. El proceso de adición puede ser variada e incluso diferir de un tipo de impresión 3D a otra [9].



Figura 4. Conformación de una pieza por impresión 3D [8].

Gracias al apoyo de controladores de diversos tipos instalados en las máquinas de impresión, es posible la obtención de modelos de alta complejidad (cavidades internas, ranuras en interiores, mecanismos internos y demás) así como también la utilización de diversos materiales entre los cuales se puede nombrar [9]:

- Resinas

- Metal
- Polímeros de diversos tipos
- Cerámica
- Vidrio
- Concreto

1.4.2.1.Historia

Chuck Hull, en 1984 introduce la idea al mercado de una impresora 3D. su primer invento fue lo que hoy se conoce como estereolitografía. Hull, menciona a la "*stereolithography apparatus*" como la primera fórmula patentada de creación por capas continuas teniendo como base un material fotosensible [8]. El material fotosensible al contacto con rayos ultravioleta se solidifica creando un objeto sólido con una forma determinada; la máquina fue denominada como SLA-250. El éxito de esta máquina marcó el rumbo para que a la postre Chuck llegue a poseer más de una centena de patentes relacionadas al prototipado rápido [2].

La empresa 3D Systems, empresa creado por Chuck en 1986, tiene relación también con el STL (Standard Tessellation Languaje – Languaje Estandar de Teseleado). Hoy por hoy el archivo STL es un común denominador en la impresión 3D. en 1988 Lisa y Scott Crump desarrollan en su compañía el FDM (Fused Deposition Modeling – Modelado por Deposición Fundida) [8]. Unos años después el proceso FDM daría origen a lo que hoy se conoce como máquinas de impresión del tipo personal. Profesionales en el campo utilizan también el término FFF (Fabricación por Filamentos Fundidos) debido a que FDM es una marca que presenta el registro de Stratasys [8, 10].

El MIT (Massachusetts Institute of Technology) en 1993 da origen al 3DP (3-Dimensional Printing). Con sus bases en la técnica de impresión de tinta en dos dimensiones. La diferencia era la utilización de un pegamento y partículas de polvo las cuales daban origen a la pieza en tratamiento [2]. Sin embargo, hasta el 2005 se tuvo que esperar para dar origen a la Spectrum Z510. Una impresora 3D la cual manufacturaba objetos en colores

distintos [9]. A la par en Inglaterra, se crea la primera impresora auto replicante (capacidad de impresión de sus propios elementos conformantes). Con el paso del tiempo y gracias a la creación, liberación de patentes de la mano de la innovación se ha podido crear nuevas impresoras que incluso son utilizadas en el campo espacial [8].

1.4.2.2. Tipos de Impresión 3D

Varias son las técnicas de modelado 3D, entre las que se destacan:

- **Modelado por Deposición Fundida (FDM)**

Técnica de adición de un filamento fundido el cual atraviesa una boquilla emisora de calor. la boquilla controla directamente el flujo saliente del filamento. La formación de la pieza es netamente realizada por capas, Figura 5. En este tipo de impresión, es conveniente la formación de estructuras de soporte, Figura 6. Esto se debe a que por acción de la gravedad la pieza, al no tener soportes, podría sufrir de daños no aceptables [1]. Es una de las tecnologías 3D de menor costo.

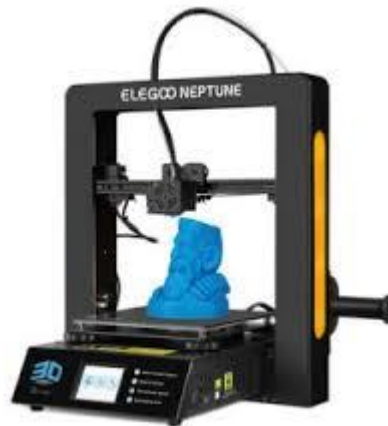


Figura 5. Impresora 3D FDM [11]



Figura 6. Soportes en impresión 3D FDM [12]

- **Sinterizado Láser Selectivo (SLS)**

La característica más sobresaliente de este tipo de impresión es que el material de conformado es un polvo. Por la acción de un láser, las partículas de polvo se sinterizan dando como resultado una pieza, Figura 7. Las densidades de las partes obtenidas estarán en dependencia de la potencia del láser, así como también del tiempo de exposición. Una de las ventajas frente a la impresión FDM es que no necesita de soportes, como resultado, se tiene una pieza sin necesidad de limpieza alguna después de la impresión. El polvo actúa como soporte a la hora de la impresión de las capas [8].



Figura 7. Impresión SLS [13]

- **PolyJet**

Similar a la impresión de inyección de tinta en papel. La diferencia radica en que se utiliza un fotorpolímero en estado líquido que al ser curado de manera

instantánea por rayos ultravioletas pasa a un estado sólido [9]. Este proceso se repite por capas modelando así la pieza requerida. La máquina, Figura 8, inyecta un gel destinado a ser el soporte de la pieza. Para eliminarlo basta con lavarlo.



Figura 8. Impresora 3D PolyJet [14]

- **Estereolitografía SLA.**

Similar a PolyJet, la diferencia radica en el fotopolímero. Para este caso es de un estado viscoso. Al igual que el anterior gracias a la acción de la luz, la resina se transforma de estado líquido viscoso a un estado sólido. El láser es el encargado de formar la pieza gracias al movimiento que posee [2]. La figura 9, muestra un esquema de una máquina de estereolitografía.

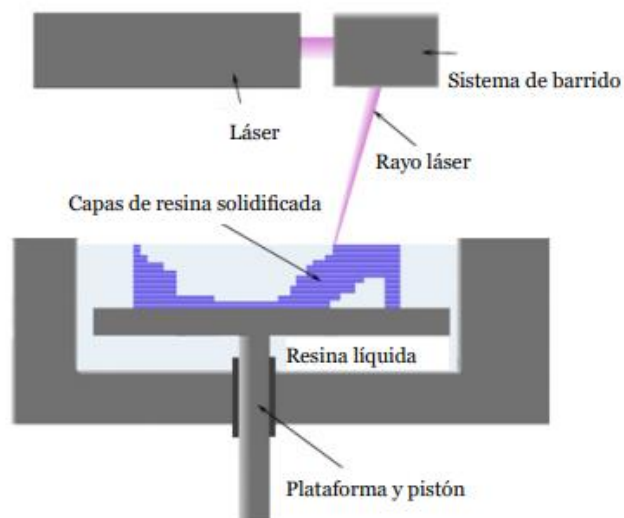


Figura 9. Esquema de una impresora SLA [15]

Ellas son parte de una amplia variedad de tecnologías, otras tecnologías se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Tecnologías de impresión 3D existentes [16].

<i>Tipo</i>	<i>Tecnologías</i>	<i>Materiales</i>
<i>Extrusión</i>	Modelado por deposición fundida (FDM)	Termoplásticos (PLA, ABS), metales eutécticos, materiales comestibles
<i>Hilado</i>	Fabricación por haz de electrones (EBF3)	Casi cualquier aleación de metal
<i>Granulado</i>	Sinterizado de metal por láser (DMLS)	Casi cualquier aleación de metal
	Fusión por haz de electrones (EBM)	Aleación de Titanio
	Sinterizado selectivo por calor (SHS)	Polvo termoplástico
	Sinterizado selectivo por láser (SLS)	Termoplásticos, polvos metálicos, polvos cerámicos
	Proyección aglutinante (DSPC)	Yeso
<i>Laminado</i>	Laminado de capas (LOM)	Papel, papel de aluminio, capa de plástico
<i>Fotoquímicos</i>	Estereolitografía (SLA)	Fotopolímeros y resinas fotosensibles
	Fotopolimerización por luz ultravioleta (SGC)	

1.4.2.3. Fases de la Impresión 3D

La Figura 10, señala cada una de las fases que se deben cumplir para la impresión 3D de cualquier elemento. Este proceso es aplicable para cualquier tipo de impresión 3D.

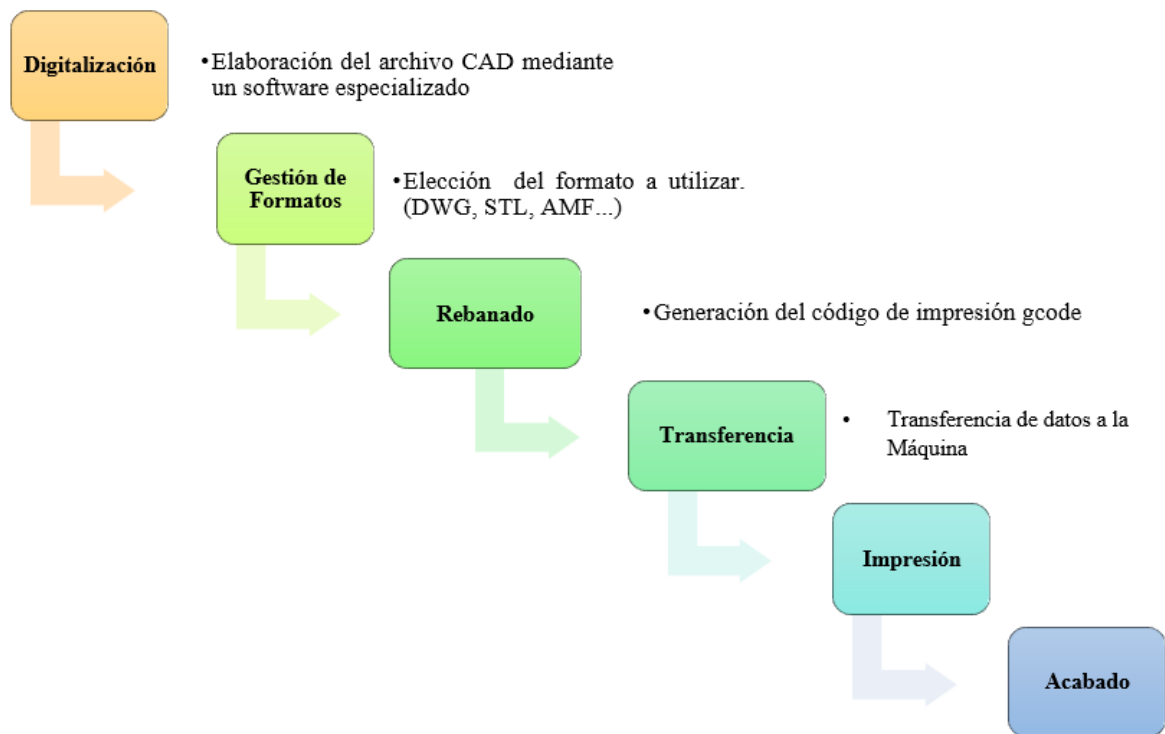


Figura 10. Fases de la Impresión 3D.

1.4.3. Impresión 3D por Estereolitografía

Producto de la evolución de la impresión en 3D se encuentra la Estereolitografía (SLA). Es una tecnología de fabricación la cual utiliza un láser de luz ultravioleta fusionando partículas de resina foto-curable capa por capa [17]. Este proceso es realizado hasta obtener el modelo deseado. En función de la geometría del modelo a generarse, puede o no ser necesario la impresión de material de soporte. El material de soporte está destinado a mitigar cualquier tipo de colapso en el modelo que se pudiera generar en el proceso de conformado [10]. Una vez terminado el proceso, es necesario remover cualquier tipo de material extra generado [18].

El láser encargado de foto curar la resina es controlado por un par de galvanómetros [19]. El galvanómetro es el instrumento encargado de la medición de la corriente la cual está siendo utilizada por un artefacto determinado [10]. A medida que el láser endurece cada capa del modelo a reproducir, el contenedor de resina se mueve despegándose de la capa sólida. Posterior a esto, la superficie de impresión se eleva una distancia comprendida

entre 26 y 200 μm [19]. La distancia de elevación estará en directa dependencia a la elección del diseñador y del modelo.

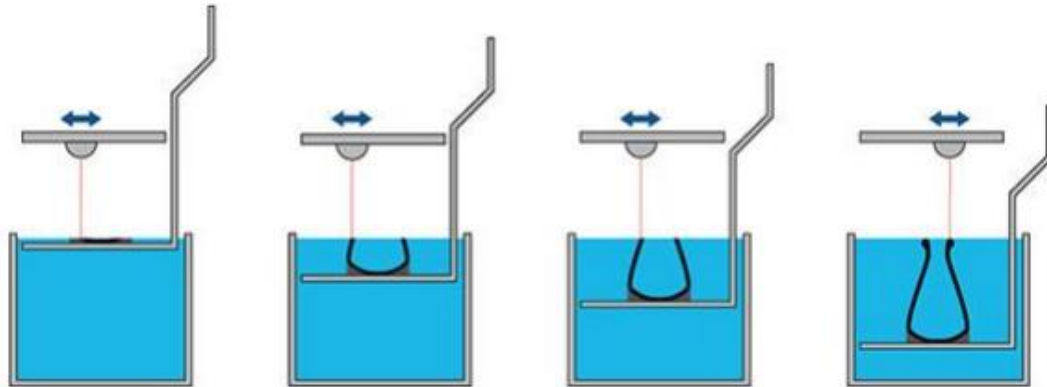


Figura 11. Proceso de Impresión 3D por Estereolitografía [20]

El tiempo requerido para la materialización de una pieza estará comprendido entre horas e incluso días. Todo se relaciona con la fisonomía y complejidad de la pieza en tratamiento. Hablando de otros factores que influyen de manera directa en el tiempo se habla también del espesor de cada capa y la velocidad de exploración. La velocidad de exploración empleada por el láser está entre 500 – 2500 mm/s [21].

Una estimación del tiempo que tomará formar una pieza se podrá obtener a partir de la determinación del tiempo empleado por una capa la cual está planteada por la ecuación (1).

$$T_i = \frac{A_i}{vD} + T_r \quad (1)$$

En donde:

- i : Número de capa
- T_i : Tiempo de conformado de una capa [s]
- A_i : Área de la capa [$\text{mm}^2 - \text{in}^2$]
- v : velocidad de exploración del rayo [$\text{mm/s} - \text{in/s}$]
- D : Diámetro del rayo láser en su superficie

- Tr: Tiempo de reposicionamiento entre capas [s]

Una vez determinado el tiempo empleado en cada capa se procede a la sumatoria de cada una de ellas, obteniendo de esta forma el tiempo de construcción (T_c) desde la capa uno ($i=1$) hasta el n número de capas empleadas así:

$$T_c = \sum_{i=1}^{n_i} T_i \quad (2)$$

1.4.3.1. Post Curado

Uno de los objetivos del post curado es potencializar las conexiones moleculares que se generan como parte del proceso de conformado [22]. Dichas uniones en la mayoría de los casos no se han podido completar del todo, es por esta razón que el post curado se hace presente. La exposición al calor y la luz, provoca que la estructura del polímero se vea reforzada. El refuerzo de los enlaces a la postre desencadena en una mejora en las propiedades mecánicas del elemento [23]. El post curado genera la pérdida de la pieza. Dicha pérdida es muy mínima, por lo tanto, no afecta considerablemente en piezas cuya precisión sea elevada.

La temperatura y el tiempo del curado está en función al módulo de elasticidad. Gracias a las regulaciones provistas por la ASTM, se puede obtener un tiempo y una temperatura adecuada para cada una de las resinas existentes en el mercado a partir de la determinación del módulo [24]. La importancia de esta característica se debe a que se asocia al módulo de elasticidad con la plenitud de unión de los enlaces que conforman las diversas cadenas del polímero [25].

Cuando de la temperatura de post curado es elevada se corre el riesgo de que la pieza sufra algún tipo de deformación. En contraste, la temperatura elevada acelera el tratamiento del elemento en cuestión. Por lo general los proveedores de las resinas, detallan un tiempo de curado y una temperatura gracias a los estudios realizados bajo la normativa ASTM respectiva.

% Gain in Tensile Modulus over Cure Time at 60 °C for Black V4



Figura 12. Tiempo y temperatura de post curado para una resina utilizada en estereolitografía [2]

Resinas como las utilizadas en implantes dentales, necesitan de un tratamiento extra una vez realizado el post curado. Las pruebas por lo general son de biocompatibilidad asegurando también la precisión de las piezas generadas.

1.4.3.2. Partes de una Máquina para Impresión 3D por Estereolitografía

Una impresora 3D SLA, consta de una serie de elementos los cuales hacen posible el hecho de generar la pieza deseada; la figura 13, muestra los componentes de la misma.

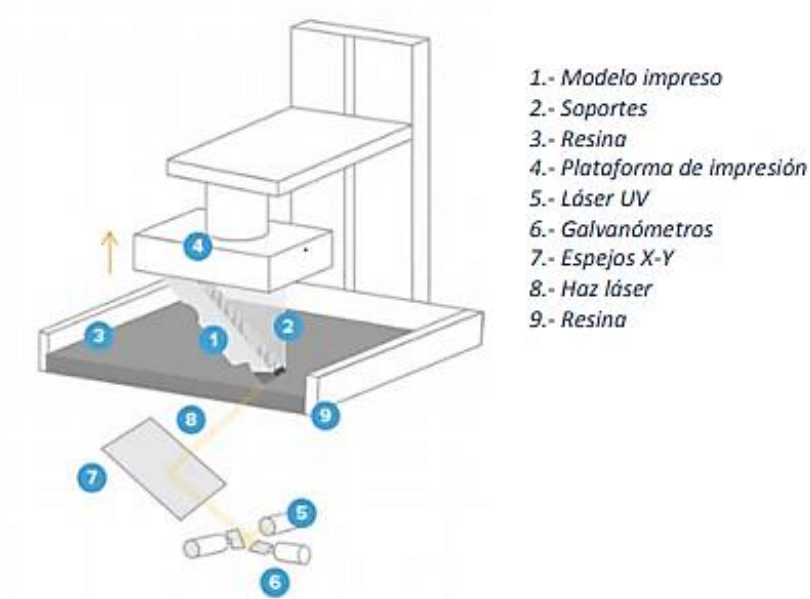


Figura 13. Partes constitutivas de una impresora 3D SLA. [15]

1.4.3.3. Materiales

Al igual que procesos de impresión como el FDM, la estereolitografía presenta una amplia gama de opciones a considerar a la hora de producir un elemento. Según [19], se plantea 3 clases diferentes de materiales utilizados.

- 1) Resina apta a recepción de pintura.
- 2) Resina Gris
- 3) Resina del tipo transparente.

Por lo general, están en función a la aplicación que se le dará en el futuro a la pieza: Decoraciones, usos de ingeniería, medicina y varias otras aplicaciones. Por otra parte, si se le agrega un pigmento como resultado se tendrá una variación en la transparencia. Puede ser cristalina como el agua o en casos especiales podría asemejarse a una resina del tipo gris. Por otro lado, el acabado superficial también juega un papel fundamental. Puede ser del tipo natural o básica. Está determinada por el tipo de resina, el número de pasos de acabado de la máquina, así como también de la tecnología en uso. Económicamente hablando, el acabado natural posee un coste económico menor a cualquier tipo de

tratamiento adicional utilizado. Sin embargo, en su superficie se notarán las capas que conforman la pieza [17].



Figura 14. Resina Gris SLA [26]

Si comparamos los tres tipos de resinas utilizados comúnmente se puede concluir que: la resina gris presenta una gran precisión en detalles finos. La resina pintable puede ser utilizada en fines decorativos sin embargo los soportes del modelo no deberán ser retirados, en pocas palabras se puede hablar de una resina limitada en uso.

1.4.3.4. Campos de Aplicación de la Impresión 3D SLA

La impresión 3D SLA, al igual que las demás, ha demostrado ser una buena alternativa de aplicación en diversos campos cotidianos, entre los destacados se encuentran:

- Campo Médico (Prótesis, inserciones dentales, entre otras)
- Automoción
- Campo Aeroespacial
- Bienes de uso cotidiano (Adornos)
- Educación
- Ingeniería

Este gran aporte se debe a dos características específicas:

- Elevada precisión
- Generación de superficies complejas (Ondulaciones, cambios de sección y demás)

Gracias a ellas se puede reproducir casi cualquier tipo de pieza siempre y cuando sea digitalizada.

1.4.3.5. Ventajas y Desventajas

- **Ventajas**
 - Precisión alta
 - Obtención de superficies complejas (Ondulaciones, cambios de sección, detalles finos, entre otros)
 - Aplicación de pigmentos y/o pinturas con fines netamente estéticos
- **Desventajas**
 - Costos altos en dependencia al tipo de resina, máquina, curado.
 - Acceso relativamente limitado a los consumibles (Resina)
 - Las resinas presentan características del tipo tóxicas e irritantes
 - Limpieza de los modelos producidos (Eliminación de soportes o cualquier tipo de material extra generado)

1.4.4. Ensayos

Para la determinación y caracterización de las propiedades mecánicas de un material, es imperativo realizar ensayos, sean estos no destructivos o destructivos. Un ensayo, posee dos metas destacables como lo son:

- 1) Contribuir con nueva y/o mejor información sobre nuevos materiales
- 2) Generar mediciones precisas sobre alguna propiedad de un material

Los ensayos destructivos (Tracción, compresión, dureza) han sido el común denominador a la hora de caracterizar materiales de cualquier naturaleza. Para efectuar cada una de las pruebas establecidas es necesario la utilización de equipamiento que, de la mano de normas como las ASTM, ISO, INEN, UNE, aseguren que los resultados poseen un alto nivel de confiabilidad.

1.4.4.1. Ensayo de Tracción

Uno de los ensayos más practicados en el mundo es el de tracción. Este ensayo da la oportunidad de generar información relacionado al comportamiento mecánico del material en tratamiento. Su funcionamiento está basado en la deformación de un material llevándolo hasta su rotura mediante la aplicación de una fuerza. La fuerza aplicada es del tipo uniaxial. Para polímeros es necesario utilizar una máquina de 50kN la misma es apta para ensayar materiales como cables, cerámicos, textiles, entre otros.



Figura 15. Máquina de ensayos de Tracción. [3]

El procedimiento del ensayo consiste en, una vez sujeta la muestra a las mordazas de máquina, aplicar una carga secuencialmente. De esta manera se espera obtener los datos solicitados para caracterizar un material mecánicamente. En el caso de los polímeros, la norma que regula este ensayo es la ASTM D638-14.

- **Resistencia Máxima a la Tracción**

Se la obtiene mediante la relación establecida entre la fuerza máxima aplicada y el área del elemento. La relación está dada por:

$$\sigma = \frac{P_{max}}{A} \quad (3)$$

En donde:

σ : Esfuerzo último de Tracción [MPa]

P_{max} : Fuerza máxima registrada antes de la ruptura del material [N]

A : Área promedio medida en la sección transversal del elemento en tratamiento [mm²]

- **Módulo de Elasticidad**

Relación lineal comprendida entre el esfuerzo y la deformación unitaria. También es conocido como módulo de Young en honor a Thomas Young (1773 – 1829).

$$E = \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon} \quad (4)$$

En esta relación:

E : Módulo de Young [MPa]

σ_{max} : Esfuerzo máximo axial [MPa]

ε : Deformación axial

- **Deformación Unitaria**

La deformación de un material está en función a su alargamiento y acortamiento, el cual matemáticamente hablando se la puede determinar como:

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_i}{l_i} \quad (5)$$

En donde:

ε : Deformación axial

l_f : Longitud final

l_i : Longitud inicial

Si la relación anterior se la multiplica por 100, lo que se obtiene es el porcentaje de deformación, el cual está dado por:

$$\% \text{ de deformación} = \frac{l_f - l_i}{l_i} * 100 \quad (6)$$

De Manera resumida, el ensayo de tracción permite obtener:

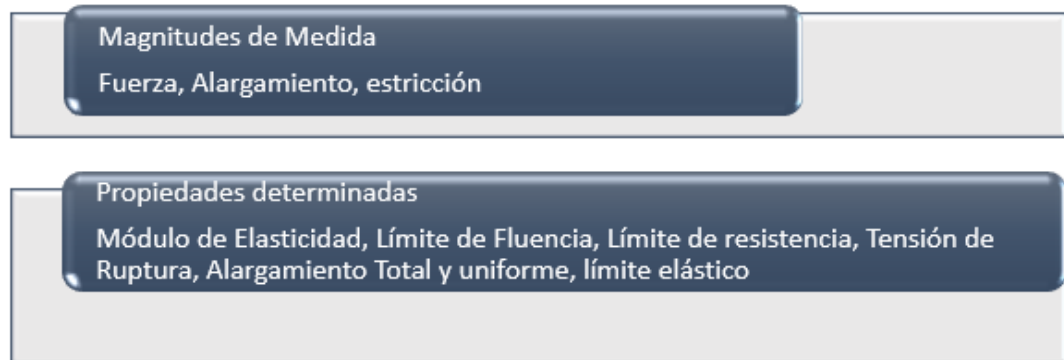


Figura 16. Ensayo de Tracción.

1.4.4.2. Ensayo de Dureza

La dureza se define como la resistencia que posee un determinado material a ser penetrado por un cuerpo de mayor dureza. La norma que rige este ensayo es la ASTM D2240. Al igual que el ensayo de tracción, esta norma regula el procedimiento a llevar a cabo en esta prueba. En polímeros la escala más utilizada es la Shore A y D. Hablando de materiales, se puede argumentar que en la escala Shore A, están los elastómeros del tipo blando mientras que en la escala Shore D, los termoplásticos.

El procedimiento es simple, el indentador es el encargado de penetrar la probeta en una zona localizada. A partir de aquí, se registra el rebote generado por el material mostrando así la dureza obtenida. La evaluación de la dureza superficial del material está en dependencia a la profundidad de penetración del material. La máquina a utilizar es el durómetro.

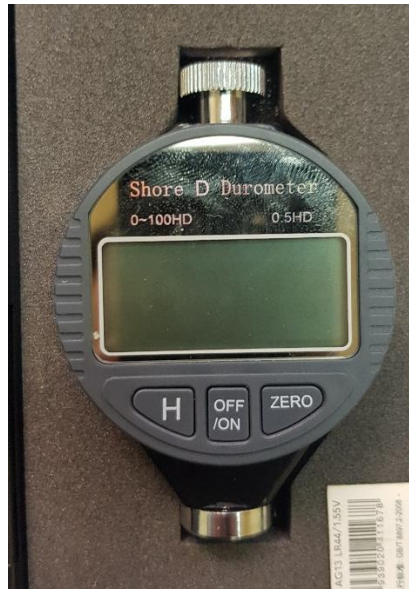


Figura 17. Durómetro.

1.4.4.3. Ensayo de Abrasión

La resistencia que tienen las superficies a la abrasión es evaluada en este ensayo. La normativa utilizada para este ensayo es la ISO 9352. El ensayo consiste en someter una probeta a la abrasión y, por lo tanto, rozamiento de las muelas abrasivas durante un periodo de tiempo y carga establecida por la norma. La expresión de los resultados está en función a la pérdida de masa, volumen y cambios en las propiedades ópticas de la probeta.



Figura 18. Abrasímetro.

En el proceso de abrasión, existen partículas que se desprenden tanto del material en análisis como de las muelas. Es por ello, que el Abrasímetro posee una aspiradora que cumple la función de recoger las partículas evitando que estas puedan provocar una incidencia negativa durante la realización de la prueba.

El Abrasímetro tiene la ventaja de ser muy aplicable en una gran variedad de materiales tales como telas, polímeros de diversos tipos, elastómeros (Cauchos) e incluso se podría hablar de materiales del tipo cerámico, incluyendo también a los recubrimientos del tipo superficial. Por otro lado, las muelas abrasivas desempeñan un papel muy importante. De ellas depende el tipo de abrasión. En el mercado existe una amplia gama de muelas abrasivas. Entre ellas destacan tres tipos.

- 1) Abrasión Fina
- 2) Abrasión Media
- 3) Abrasión Fuerte

Cada una de ellas pueden ser utilizadas en varios materiales, sin embargo, dependerá del tipo de análisis a llevarse a cabo.



Figura 19. Muelas Abrasivas.

El funcionamiento de la máquina está centrado en el giro del plato principal de la misma, transversal a él y sobre ejes del tipo horizontal se encuentran las muelas las cuales giran en direcciones opuestas de esta manera se produce el movimiento de desgaste requerido. Esquemáticamente de mejor manera la figura 20, muestra en principio básico del Abrasímetro.



Figura 20. Esquema del sistema giratorio del Abrasímetro. [27]

Las muelas centran la abrasión en una zona específica la cual adopta la forma de un anillo. En el proceso una muela es la encargada del desgaste en la zona exterior del anillo mientras que la otra desgasta el interior. La figura 21, muestra el accionar de las muelas y la formación del anillo que es la zona sobre la cual se produce el desgaste.

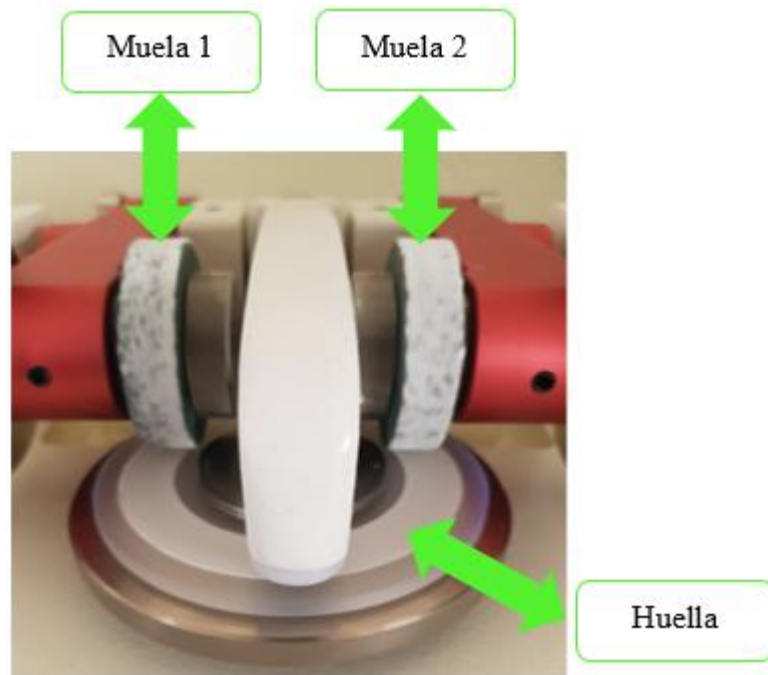



Figura 21. Proceso de Desgaste.

CAPÍTULO II METODOLOGÍA

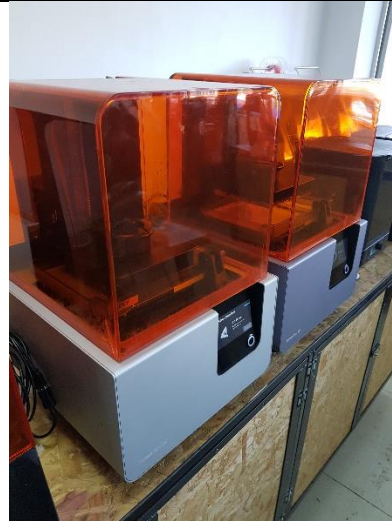
2.1. Materiales

Los materiales utilizados para el presenta trabajo se encuentran detallados en la Tabla 2.

Tabla 2. Materiales utilizados.

<i>Material Empleado</i>	<i>Figura</i>
Resina Form Estándar (Clear) fotocurable.	
Resina Form de Ingeniería (Tough) Fotocurable	

Impresora 3D SLA (Form 2)



**Máquina de limpieza de resina
(Form Wash)**



**Máquina de curado por rayos UV
(Form Cure)**



Alcohol Isopropílico



2.1.1. Obtención de la Materia Prima

La resina estándar, así como la resina Tough de ingeniería utilizada para prototipado del tipo robusto, se obtuvo en un centro especializado en impresión 3D en la ciudad de Quito, ubicado en el norte, Edificio Shyris Park.

2.2. Métodos

2.2.1. Nivel de Investigación

Experimental

Realización de una serie de experimentos con el fin de obtener una referencia con la cual se podría determinar las posibles aplicaciones en el campo de la ingeniería.

Bibliográfica

Para la investigación presentada es de importancia la obtención de información a partir de fuentes bibliográficas cuyo nivel de confianza sea elevado como lo son los artículos científicos, libros, tesis y demás fuentes que contribuyan con el perfeccionamiento del trabajo presentado.

Cuantitativa

Es aplicable este tipo de investigación debido a que los datos obtenidos en su mayoría serán de carácter numérico. Este tipo de datos contribuirán a la determinación de propiedades del material obtenido.

2.2.2. Metodología

Diseño de Experimentos.

El diseño de experimentos (DOE), ha demostrado ser una herramienta efectiva para la determinación de pruebas y las formas de realización. Todo esto con el objetivo de obtener evidencias del tipo objetivas a partir de los datos derivados de cualquier tipo de proceso, ensayo o cualquier actividad en análisis. El diseño estadístico hace énfasis en la planeación del experimento desembocando en la obtención de datos acordes a la investigación [28].

El enfoque estadístico es muy importante en este punto del trabajo debido a que permitirá establecer criterios de valoración relacionado con los datos. Debido a que el estudio está sujeto a errores del tipo experimental la metodología estadística es la que mejor se adapta a la situación.

A partir de lo anterior se puede llegar a argumentar que existen dos consideraciones importantes.

- 1) Diseño Experimental
- 2) Análisis Estadístico de los Resultados.

El diseño de experimentos posee tres ejes principales los cuales son:

- 1) Réplicas (Repetición del experimento)
- 2) Aleatorización (Orden de los ensayos al azar)
- 3) Conformación de Bloques (Mejorar la precisión)

Diseño Factorial

El diseño factorial hace alusión a la conformación de los procedimientos a comprobarse. [29]. El efecto de varios factores y como inciden sobre las diferentes respuestas es otra de las maneras de caracterizar al diseño factorial. El hecho de estudiar de manera simultánea varios factores se debe a que existe una posibilidad en la cual el efecto de cambio de un factor afecte a otro, en dependencia a los niveles de los mismos. Esto se conoce como interacción [29].

Entre las ventajas de utilizar un diseño factorial se tiene:

- Da la posibilidad de estudiar la interacción entre los distintos niveles.
- Obtención de información de manera económica en el material experimental.
- El rango de validez del experimento se amplía.

Diseño Factorial Completo del Estudio.

Considerando los factores:

- A (Tipo de Resina)
- B (Tiempo de Curado)

Con los siguientes niveles de prueba:

- a (Resina Estándar y Resina de Ingeniería)
- b (Sin Curado, Curado Recomendado, y Curado Máximo)

Se tiene:

$$(a,b) \geq 2 \text{ (Niveles de Prueba mínimo Requeridos)}$$

El factorial utilizado sería:

$$a \times b$$

$$3 \times 2 = 6$$

Siendo 6 el número de experimentos requeridos. Por lo que la matriz quedaría de la manera presentada:

Tabla 3. Experimentos Requeridos.

	<i>Tiempo de Curado</i>		
	<i>Sin Curado</i>	<i>Curado Recomendado</i>	<i>Curado Máximo</i>
<i>Resina Estándar (Clear)</i>	1	1	1
<i>Resina de Ingeniería (Tough)</i>	1	1	1

Complementando el modelo, el número de réplicas (n) es necesario debido a que se involucra menos de cuatro factores, así tenemos que el número de corridas experimentales serán de 5, es decir $n= 5$ por lo que:

$$n (a \times b)$$

$$5 (3 \times 2) = 30$$

Se realizarán 5 réplicas por cada experimento esto con el fin de que las pruebas estadísticas tengan un peso considerable aumentando su nivel de confianza. Por lo que, la tabla del experimento será:

Tabla 4. Experimentos Requeridos.

<i>#</i>	<i>Tipo de Resina</i>	<i>Tiempo de Curado [min]</i>
1	<i>RE</i>	0
2	<i>RE</i>	15
3	<i>RE</i>	30
4	<i>RI</i>	60
5	<i>RI</i>	120
6	<i>RI</i>	0
7	<i>RE</i>	0
8	<i>RE</i>	15
9	<i>RE</i>	30

<i>#</i>	<i>Tipo de Resina</i>	<i>Tiempo de Curado [min]</i>
10	<i>RI</i>	60
11	<i>RI</i>	120
12	<i>RI</i>	0
13	<i>RE</i>	0
14	<i>RE</i>	15
15	<i>RE</i>	30
16	<i>RI</i>	60
17	<i>RI</i>	120
18	<i>RI</i>	0
19	<i>RE</i>	0
20	<i>RE</i>	15
21	<i>RE</i>	30
22	<i>RI</i>	60
23	<i>RI</i>	120
24	<i>RI</i>	0
25	<i>RE</i>	0
26	<i>RE</i>	15
27	<i>RE</i>	30
28	<i>RI</i>	60
29	<i>RI</i>	120
30	<i>RI</i>	0

Leyenda.

Tabla 5. Leyenda.

<i>Leyenda</i>	<i>Descripción</i>
<i>RE</i>	Resina Estándar
<i>RI</i>	Resina de Ingeniería

2.2.2.1. Normativa de Evaluación para los Ensayos

La normativa de evaluación para cada ensayo gira en torno a:

- Tracción: ASTM D638
- Dureza: ASTM D 2240
- Abrasión: ISO 9352.

Cada una de ellas, su procedimiento y consideraciones han sido detallados en puntos anteriores.

2.2.2.2. Operacionalización de las variables

Variable dependiente: Propiedades del material dureza, desgaste y abrasión.

Tabla 6. Operacionalización de variables

<i>Definición de la Variable</i>	<i>Categoría</i>	<i>Indicador</i>	<i>Ítems</i>	<i>Técnicas e Instrumentos</i>
La dureza de un material está relacionada con la resistencia a la indentación que presenta. Para el caso puntual de los polímeros la resistencia a la penetración está en función a la aplicación de una carga constante en su superficie	Dureza	Escala de Dureza	Dureza Shore D	Fichas de Registro
La abrasión es el rozamiento de las muelas abrasivas durante un periodo de tiempo y carga establecida. A partir de ello se intenta determinar tanto el porcentaje de masa perdida como el índice de desgaste. Que a la postre servirán como caracterizadores del material.	Desgaste y abrasión	Índice de Desgaste Taber [IDT]	Diferencia de pesos [mg] en función al número de ciclos	Ensayos Hoja de Cálculos
		Pérdida de masa	Porcentaje [%] de pérdida de masa en función al número de ciclos	

Variable independiente: Tipo de resina utilizada (Tough – Clear).

Tabla 7. Operacionalización de variables

<i>Definición de la Variable</i>	<i>Categoría</i>	<i>Indicador</i>		<i>Ítems</i>	<i>Técnicas e Instrumentos</i>
En el campo de la impresión 3D SLA, el principal material utilizado es la resina. Mencionado elemento al tener varios tiempos de curado puede experimentar cambios en sus propiedades mecánicas. Sin embargo, de acuerdo a la utilidad las propiedades difieren unas de otras	Resina Estándar	Tiempo de Curado	Sin Curado	0 min	Fichas de Registro
			Medio	15 min	
			Máximo	30 min	
	Resina Tough (Ingeniería)	Tiempo de Curado	Sin Curado	0 min	
			Medio	60 min	
			Máximo	120 min	

2.3. Protocolo Para La Recolección de Datos

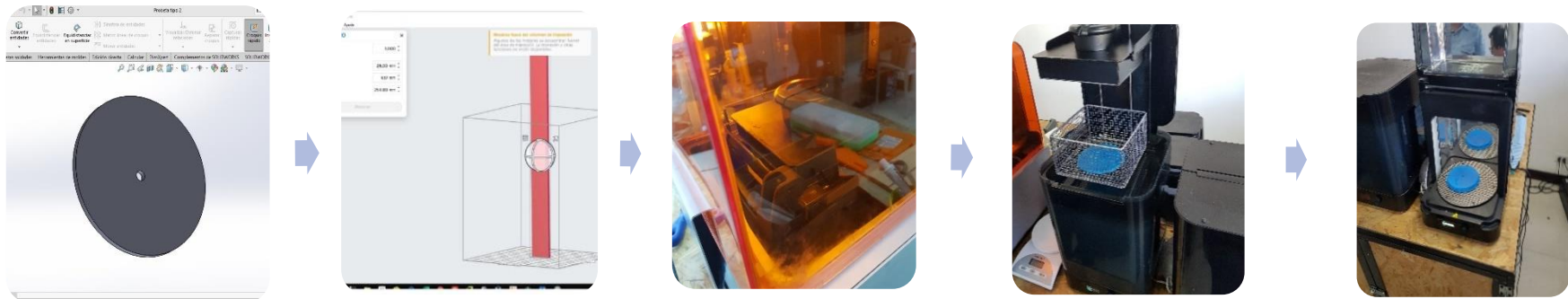
Para la recolección de la información es necesario la elaboración de fichas las cuales están en función a los resultados obtenidos a partir de la elaboración de los ensayos. Los datos serán arrojados por una parte por el durómetro Shore, y el Abrasímetro Taber. Cabe recalcar que, en lo referente al Abrasímetro es necesario la utilización de una balanza electrónica previamente calibrada.

Por otro lado, se utilizará investigación del tipo bibliográfica esto con el fin de obtener información acerca de temas específicos, por ejemplo, propiedades de la resina, tiempos de curado. Esta información está descrita en catálogos propios del fabricante.

2.4. Elaboración de las Probetas

La impresión 3D, como se ha mencionado en puntos anteriores, es uno de los procesos de conformado más sencillos de la manufactura por lo que existen una cantidad limitada de pasos a seguir. Todo inicia a partir del diseño de la pieza a generar mediante la ayuda de un software CAD. A continuación, se exporta el modelo a un programa CAM, cuya función principal es generar los códigos de impresión considerando la máquina a utilizar. Posterior a ello se procede con la limpieza del modelo para finalmente someterlo a un post curado de acuerdo a las necesidades tanto del fabricante como del cliente.

En la figura 22, se detalla el proceso llevado a cabo para la obtención de las probetas para los diferentes ensayos utilizados en este trabajo.



Elaboración de las probetas mediante un software CAD obedeciendo a las normas de ensayo

Incorporación del modelo CAD a un software CAM especializado en impresión 3D.

Generación del código de impresión obedeciendo a la máquina a utilizar

Impresión 3D mediante la máquina FORM 2 SLA.

Limpieza de la probeta impresa en alcohol Isopropílico en la máquina FORM Wash

Curado de las probetas en la máquina FORM CURE a los niveles establecidos

**Nota: El mismo proceso se realizó para la conformación de las probetas de resina Tough de Ingeniería.*

Figura 22. Elaboración de Probetas.

2.5. Plan de Procesamiento y Análisis

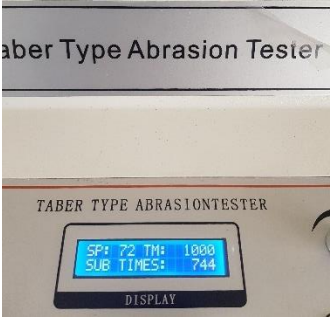

En lo que se refiere al registro de datos se lo realizará en fichas para una mejor presentación e interpretación. En cada probeta del ensayo de abrasión se tomará una medición de dureza. Individualmente las probetas serán pesadas en una balanza previamente calibrada. Una vez realizado el ensayo de abrasión las probetas serán limpiadas para ser pesadas una vez más en la balanza. Esto obedeciendo a los requerimientos de la norma para ensayos de abrasión, ISO 9352. Las mediciones de masa de las probetas están en gramos (gr). Además, se calculará el Índice de Desgaste Taber [IDT]. La organización en fichas dará la posibilidad de un mejor análisis en el futuro.



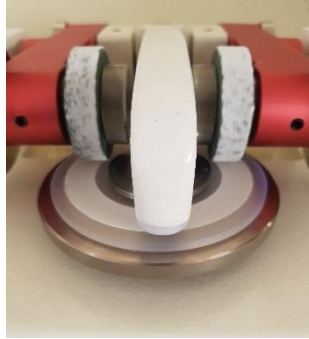

2.6. Ensayos.



2.6.1. Procedimiento para la Elaboración del Ensayo de Abrasión.

El ensayo de abrasión tuvo lugar en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato. La máquina utilizada es el Abrasímetro Taber de un solo plato y dos muelas de abrasión.

Tabla 8. Procedimiento para ensayos de abrasión.

<i>Paso</i>	<i>Actividad</i>	<i>Descripción</i>	<i>Fotografía</i>
1	Calibración y conexión	La calibración consiste en colocar tanto la velocidad como el número de ciclos que se cumplirán en la máquina (1000 ciclos, $72 \pm \text{rpm}$). Además, se deberá conectar los elementos constituyentes de Abrasímetro (Aspiradora)	
2	Colocación de las muelas	Se procede a colocar la muestra las muelas en los brazos del Abrasímetro	




<i>Paso</i>	<i>Actividad</i>	<i>Descripción</i>	<i>Fotografía</i>
3	Fijación de la muestra a ser ensayada	La muestra a ser ensayada se ubica en el plato central. Si es sólida deberá ser fijada mediante el tonillo, si es tela deberá tener fijación adicional (Anillo de fijación)	
4	Ubicación de las pesas	Las pesas deberán ser ubicadas en los brazos del Abrasímetro (1000 gr). Esto de acuerdo a la norma. Y se baja los 3 brazos constituyentes del sistema	
5	Ensayo	En este punto se procede con el inicio del conteo regresivo de los ciclos requeridos a la velocidad calibrada	
6	Extracción y Limpieza	Una vez finalizado el ensayo se procede a extraer la muestra limpiarla y continuar con el proceso.	

<i>Paso</i>	<i>Actividad</i>	<i>Descripción</i>	<i>Fotografía</i>
7	Pesaje	Una vez finalizado el ensayo de la muestra se procede a pesar la probeta en una balanza calibrada. Cabe recalcar que este proceso debe realizarse antes y después del ensayo	
8	Rectificado de las muelas	Una vez ensayado un determinado material es necesario rectificar las muelas para poder obtener la influencia de granos en el próximo ensayo. Esto se debe realizar con el Papel de lija provista por el fabricante.	

2.6.2. Procedimiento para la Elaboración del Ensayo de Dureza.

El ensayo de dureza al igual que el anterior, también se lo realizó en el Laboratorio de materiales de la Universidad Técnica de Ambato considerando los siguientes pasos.

Tabla 9. Procedimiento para ensayos de dureza.

<i>Paso</i>	<i>Actividad</i>	<i>Descripción</i>	<i>Fotografía</i>
1	Preparación de la Superficie	La superficie a ser ensayada debe ser limpia a profundidad para evitar que cualquier tipo de partícula afecte la medición. Además, debe ser una superficie lo más plana posible.	
2	Medición	Se procede a la medición del material con el durómetro Shore D. Se recomienda que se lo mantenga firme a la hora del ensayo	
4	Registro	Una vez se haya estabilizado la medición se procede al registro de los datos.	

2.6.3. Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción es un compendio de una serie de autores cuyas investigaciones han sido realizadas bajo normativa ASTM específicamente D638. Las investigaciones llevadas a cabo son directrices cuya información ha sido validada conforme han pasado los años. [30, 31] presentan los resultados obtenidos por parte del fabricante (Form Lab), [32] y [33] son estudios orientados a la modelación matemática de las resinas en cuestión, sin embargo para la modelación se presentan los resultados del ensayo de tracción evaluados bajo la normativa respectiva.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y discusión de los resultados.

3.1.1. Adquisición de los Datos.

En esta parte del trabajo, abarca todo lo relacionado al registro, procesamiento, evaluación y análisis de los datos arrojados a partir de los experimentos planteados con anterioridad. El registro ordenado de cada dato permite determinar de mejor manera las propiedades mecánicas del material.



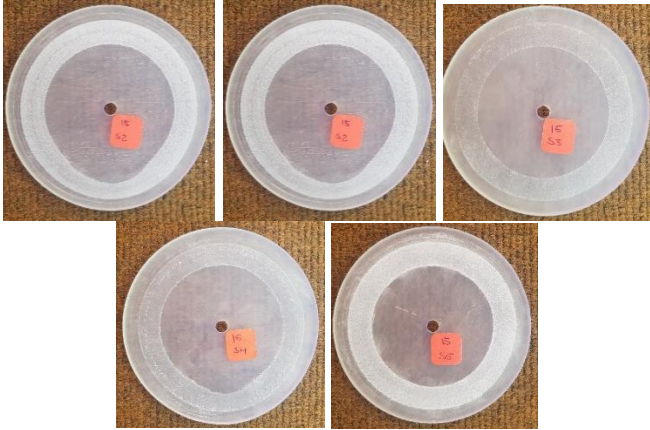
Los datos obtenidos, especialmente del ensayo de abrasión, son expuestos en fichas mediante las cuales se podrá visualizar de mejor manera los resultados generados. Para cada tipo de condición se realizaron 5 repeticiones con el fin de aumentar la confiabilidad. Además, es necesario argumentar que cada ensayo se lo realiza bajo la respectiva norma cumpliendo con cada uno de los ítems propuestos.

Las fichas utilizadas en la exposición de los resultados muestran datos de interés técnico. Es decir, en cada ficha se podrá evidenciar los parámetros utilizados en cada ensayo. Por otra parte, se proporciona también información detallada del tipo de probeta utilizada en el ensayo. Los datos generados en el ensayo de abrasión Taber se presentan a continuación en las fichas de la 3.1.1.1 a la 3.1.1.6



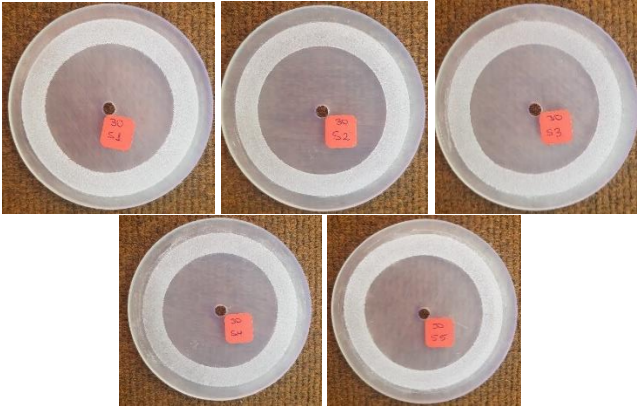
3.1.1.1. Ficha de Registro para datos Abrasión Taber. Experimento 1 con resina Estándar (Sin exposición a Rayos UV).

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;">  <div style="text-align: center;"> <p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p> </div>  </div>				
DATOS INFORMATIVOS:				
Probetas: 5	Autorizado por:	Ing. Cristian Pérez	Realizado por:	Oscar Villena L.
Lugar de estudio y análisis	Laboratorio de Materiales- FICM		Fecha:	
Tipo de estudio	De laboratorio			
Normas aplicadas	ISO 9352			
DATOS PARA EL ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO TABER				
Característica de la probeta			Características de la máquina	
Resina Clear Fotocurable			Velocidad del Disco	72 rpm ± 2 rpm
Temperatura Ambiente	19.7 ° C		Disco Abrasivo utilizado	H22
Dimensión	φ 100.2 ±0.2 mm		Tipo de Abrasión	Fuerte
Espesor:	4 mm		Carga aplicada a los brazos	1000 gr
Tiempo de exposición UV	0 min		Número de Muelas	2
RESULTADOS				
Peso Inicial (gr)	Peso final (gr)	Índice de Desgaste Taber (IDT)	Porcentaje de Pérdida de Masa (%)	Ciclos
37.3715	36.3582	1013.38	2.7116 %	1000
37.0631	36.0851	977.94	2.6386 %	1000
37.1946	36.3025	892.120	2.3985 %	1000
36.9339	36.2064	727.54	1.9698 %	1000
37.0630	36.2270	835.94	2.2555 %	1000
			Observaciones: DUREZA DE LAS PROBETAS [Shore D]: 1) 087.5 2) 080.5 3) 082 4) 086.5 5) 084.5	


3.1.1.2. Ficha de Registro para datos Abrasión Taber. Experimento 2 con resina Estándar (15 min de exposición a Rayos UV).

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;">  <div style="text-align: center;"> UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA </div>  </div>				
DATOS INFORMATIVOS:				
Probetas: 5	Autorizado por:	Ing. Cristian Pérez	Realizado por:	Oscar Villena L.
Lugar de estudio y análisis	Laboratorio de Materiales- FICM		Fecha:	
Tipo de estudio	De laboratorio			
Normas aplicadas	ISO 9352			
DATOS PARA EL ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO TABER				
Característica de la probeta			Características de la máquina	
Resina Clear Fotocurable			Velocidad del Disco	72 rpm ± 2 rpm
Temperatura Ambiente	19.7 ° C		Disco Abrasivo utilizado	H22
Dimensión	φ 100.2 ±0.2 mm		Tipo de Abrasión	Fuerte
Espesor:	4 mm		Carga aplicada a los brazos	1000 gr
Tiempo de exposición UV	15 min		Número de Muelas	2
RESULTADOS				
Peso Inicial (gr)	Peso final (gr)	Índice de Desgaste Taber (IDT)	Porcentaje de Pérdida de Masa (%)	Ciclos
37.0628	36.8055	257.3	0.6942 %	1000
37.3716	37.2107	160.9	0.4305 %	1000
36.9338	36.7679	165.88	0.4491 %	1000
37.0628	36.9039	158.94	0.4288 %	1000
37.1945	36.8386	355.9	0.9569 %	1000
			Observaciones: DUREZA DE LAS PROBETAS [Shore D]: 1) 091.5 2) 092 3) 090.5 4) 089 5) 079.5	



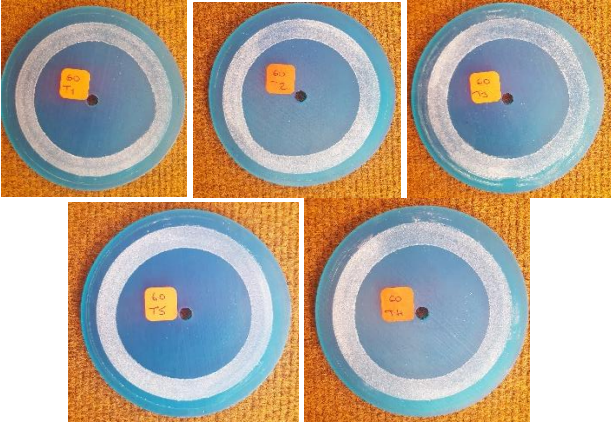
3.1.1.3. Ficha de Registro para datos Abrasión Taber. Experimento 3 con resina Estándar (30 min de exposición a Rayos UV).

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;">  <div style="text-align: center;"> <p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p> </div>  </div>				
DATOS INFORMATIVOS:				
Probetas: 5	Autorizado por:	Ing. Cristian Pérez	Realizado por:	Oscar Villena L.
Lugar de estudio y análisis	Laboratorio de Materiales- FICM		Fecha:	
Tipo de estudio	De laboratorio			
Normas aplicadas	ISO 9352			
DATOS PARA EL ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO TABER				
Característica de la probeta			Características de la máquina	
Resina Clear Fotocurable			Velocidad del Disco	72 rpm ± 2 rpm
Temperatura Ambiente	19.7 ° C		Disco Abrasivo utilizado	H22
Dimensión	φ 100.2 ±0.2 mm		Tipo de Abrasión	Fuerte
Espesor:	4 mm		Carga aplicada a los brazos	1000 gr
Tiempo de exposición UV	30 min		Número de Muelas	2
RESULTADOS				
Peso Inicial (gr)	Peso final (gr)	Índice de Desgaste Taber (IDT)	Porcentaje de Pérdida de Masa (%)	Ciclos
37.0526	36.7805	272.14	0.7345 %	1000
37.0468	36.8532	193.6	0.5226 %	1000
36.9447	36.7701	174.58	0.4725 %	1000
37.3527	37.1581	194.6	0.5210 %	1000
37.1920	36.9311	260.9	0.7014 %	1000
			<p>Observaciones:</p> <p>DUREZA DE LAS PROBETAS [Shore D]:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 088.5 2) 086.5 3) 077 4) 086 5) 091.5 	



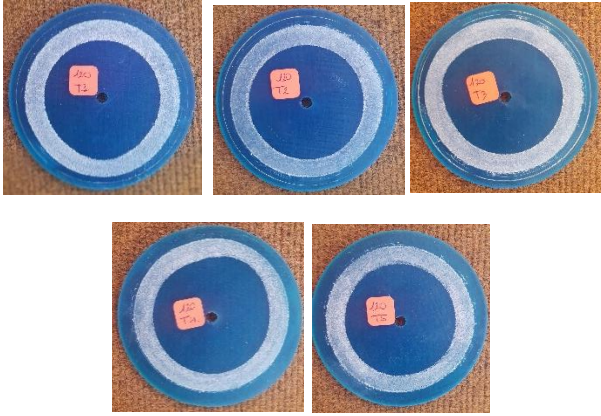
3.1.1.4.Ficha de Registro para datos Abrasión Taber. Experimento 4 con resina de ingeniería (Tough) (Sin exposición a Rayos UV).

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
DATOS INFORMATIVOS:				
Probetas: 5	Autorizado por: Ing. Cristian Pérez	Realizado por: Oscar Villena L.		
Lugar de estudio y análisis	Laboratorio de Materiales- FICM	Fecha:		
Tipo de estudio	De laboratorio			
Normas aplicadas	ISO 9352			
DATOS PARA EL ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO TABER				
Característica de la probeta		Características de la máquina		
Resina Tough Fotocurable		Velocidad del Disco	72 rpm ± 2 rpm	
Temperatura Ambiente	19.7 ° C	Disco Abrasivo utilizado	H22	
Dimensión	φ 100.2 ±0.2 mm	Tipo de Abrasión	Fuerte	
Espesor:	4 mm	Carga aplicada a los brazos	1000 gr	
Tiempo de exposición UV	0 min	Número de Muelas	2	
RESULTADOS				
Peso Inicial (gr)	Peso final (gr)	Índice de Desgaste Taber (IDT)	Porcentaje de Pérdida de Masa (%)	Ciclos
36.9751	36.6997	275.36	0.7447 %	1000
37.1294	36.8044	324.92	0.8751 %	1000
36.8371	36.5067	330.4	0.8969 %	1000
36.9232	36.6882	235	0.6365 %	1000
36.8272	36.5611	266.08	0.7225 %	1000
		Observaciones: DUREZA DE LAS PROBETAS [Shore D]: 1) 041.5 2) 042.5 3) 049.5 4) 047 5) 053.5		

3.1.1.5.Ficha de Registro para datos Abrasión Taber. Experimento 5 con resina de ingeniería (Tough) (60 min de exposición a Rayos UV).

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;">  <div style="text-align: center;"> <p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p> </div>  </div>				
DATOS INFORMATIVOS:				
Probetas: 5	Autorizado por:	Ing. Cristian Pérez	Realizado por:	Oscar Villena L.
Lugar de estudio y análisis	Laboratorio de Materiales- FICM		Fecha:	
Tipo de estudio	De laboratorio			
Normas aplicadas	ISO 9352			
DATOS PARA EL ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO TABER				
Característica de la probeta			Características de la máquina	
Resina Tough Fotocurable			Velocidad del Disco	72 rpm ± 2 rpm
Temperatura Ambiente	19.7 ° C		Disco Abrasivo utilizado	H22
Dimensión	φ 100.2 ±0.2 mm		Tipo de Abrasión	Fuerte
Espesor:	4 mm		Carga aplicada a los brazos	1000 gr
Tiempo de exposición UV	60 min		Número de Muelas	2
RESULTADOS				
Peso Inicial (gr)	Peso final (gr)	Índice de Desgaste Taber (IDT)	Porcentaje de Pérdida de Masa (%)	Ciclos
37.1252	36.9919	133.34	0.3592 %	1000
36.8283	36.6706	157.72	0.4283 %	1000
36.9857	36.847	138.64	0.3748 %	1000
36.973	36.7903	182.68	0.4941 %	1000
36.9055	36.7217	183.78	0.4980 %	1000
			<p>Observaciones:</p> <p>DUREZA DE LAS PROBETAS [Shore D]:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 072.5 2) 074 3) 075.5 4) 079.5 5) 086.5 	

3.1.1.6.Ficha de Registro para datos Abrasión Taber. Experimento 6 con resina de ingeniería (Tough) (120 min de exposición a Rayos UV).

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;">  <div style="text-align: center;"> <p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p> </div>  </div>				
DATOS INFORMATIVOS:				
Probetas: 5	Autorizado por:	Ing. Cristian Pérez	Realizado por:	Oscar Villena L.
Lugar de estudio y análisis	Laboratorio de Materiales- FICM		Fecha:	
Tipo de estudio	De laboratorio			
Normas aplicadas	ISO 9352			
DATOS PARA EL ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO TABER				
Característica de la probeta			Características de la máquina	
Resina Tough Fotocurable			Velocidad del Disco	72 rpm ± 2 rpm
Temperatura Ambiente	19.7 ° C		Disco Abrasivo utilizado	H22
Dimensión	φ 100.2 ±0.2 mm		Tipo de Abrasión	Fuerte
Espesor:	4 mm		Carga aplicada a los brazos	1000 gr
Tiempo de exposición UV	120 min		Número de Muelas	2
RESULTADOS				
Peso Inicial (gr)	Peso final (gr)	Índice de Desgaste Taber (IDT)	Porcentaje de Pérdida de Masa (%)	Ciclos
38.3589	38.1388	220.14	0.5739 %	1000
38.2293	38.0466	182.72	0.4780 %	1000
38.1924	38.0073	185.1	0.4847 %	1000
38.3077	38.1525	155.22	0.4052 %	1000
38.2093	38.0836	125.72	0.3290 %	1000
			<p>Observaciones:</p> <p>DUREZA DE LAS PROBETAS [Shore D]:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 070.5 2) 074 3) 084 4) 085.5 5) 074.5 	

3.2. Análisis de Resultados.

3.2.1. Ensayo de Tracción

A partir de una investigación bibliográfica se ha logrado determinar las características de las resinas utilizadas en este trabajo específicamente en la relacionado al ensayo de tracción. Para la resina Clear, los resultados se exponen en la Tabla 8. En mencionada tabla se exponen los resultados obtenidos a partir de varios estudios cuyo nivel de confianza es elevado.

La Tabla 9, expone los resultados que se han obtenido en varios estudios realizados con la resina de Ingeniería (Tough). Al igual que la resina Clear los resultados posee un elevado nivel de confianza. Cabe recalcar que, entre los estudios realizados figura la investigación llevada a cabo por el fabricante en Estados Unidos.

Resultados Ensayo de Tracción para la Resina Estándar (Clear).

Tabla 10. Resultados Ensayo de Tracción para la resina Clear. [30, 31, 32, 33]

<i>Característica</i>	<i>Autor 1</i>			<i>Autor 2</i>			<i>Autor 3</i>			<i>Promedio</i>		
<i>Tiempo de Curado [min]</i>	<i>0</i>	<i>15</i>	<i>30</i>	<i>0</i>	<i>15</i>	<i>30</i>	<i>0</i>	<i>15</i>	<i>30</i>	<i>0</i>	<i>15</i>	<i>30</i>
<i>Resistencia a la Tracción [MPa]</i>	38	41,36	61,61	38,37	41,53	64,33	30,89	33,63	50,09	35,755	38,844	58,678
<i>Módulo de Young [Gpa]</i>	1,6	1,72	2,45	1,62	1,75	2,59	1,30	1,39	1,99	1,507	1,623	2,344
<i>Elongación [%]</i>	12	10,02	7,4	11,3	9,98	7,09	9,75	8,11	6,03	11,019	9,372	6,842

***Nota:**

Autor 1. [30, 31]

Autor 2. [32]

Autor 3. [33]

Resultados Ensayo de Tracción para la Resina de Ingeniería (Tough).

Tabla 11. Resultado Ensayo de Tracción para la Resina de ingeniería Tough. [30, 31, 32, 33]

<i>Característica</i>	<i>Autor 1</i>			<i>Autor 2</i>			<i>Autor 3</i>			<i>Promedio</i>		
<i>Tiempo de Curado [min]</i>	<i>0</i>	<i>60</i>	<i>120</i>	<i>0</i>	<i>60</i>	<i>120</i>	<i>0</i>	<i>60</i>	<i>120</i>	<i>0</i>	<i>60</i>	<i>120</i>
<i>Resistencia a la Tracción [MPa]</i>	34,7	48,1717	55,7	36,52	46,36	53,362	30,5	43,23	44,3069	33,91	45,92	51,12
<i>Módulo de Young [GPa]</i>	1,7	2,36	2,7	1,76	2,23	2,59	1,494	2,074	2,37	1,65	2,22	2,55
<i>Elongación [%]</i>	42	28,19	24	43,8	29,29	25,05	36,92	24,81	21	40,91	27,43	23,35

***Nota:**

Autor 1. [30, 31]

Autor 2. [32]

Autor 3. [33]

Procedimiento de obtención y análisis de datos estadísticos

Al tener una experimentación que involucra diversos factores procedemos con el análisis de la varianza. El estudio considera 2 factores (A, B) con sus respectivos niveles. Al considerar el factor A en dos niveles, el efecto individual es del tipo lineal (no se los puede descomponer).

Considerando ello, y de manera resumida se presenta la Tabla 4, con las medias de las experimentaciones realizadas obedeciendo a la cantidad de réplicas propuestas.

Tabla 12. Análisis estadístico.

	<i>Tiempo de Curado</i>		
	<i>Sin Curado</i>	<i>Curado Recomendado</i>	<i>Curado Máximo</i>
<i>Resina Estándar (Clear)</i>	Y_1	Y_2	Y_3
<i>Resina de Ingeniería (Tough)</i>	Y_4	Y_5	Y_6

Suma de Cuadrados

Considerando los cálculos previos, se procede con la obtención de la suma de los cuadrados (SC) para un modelo factorial completo y en función a los factores utilizados [29], para ello es necesario la utilización de las siguientes fórmulas:

$$SC(A) = nb\sum_i(\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 \quad (7)$$

$$SC(B) = na\sum_j(\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2 \quad (8)$$

En donde:

Tabla 13. Términos de las fórmulas.

<i>Término</i>	<i>Descripción</i>
a	Número de niveles en el factor A
b	Número de niveles en el factor B
n	Número total de réplicas
Y_i	Media del $i^{\text{ésimo}}$ nivel del factor A

<i>Término</i>	<i>Descripción</i>
$Y_{..}$	Media general de todas las observaciones
$Y_{.j}$	Media del $j^{\text{ésimo}}$ nivel del factor B

Grados de Libertad

Los grados de libertad (GL) los cuales se encuentran asociados con cada suma de los cuadrados viene planteada por:

$$GL(A) = a - 1 \quad (9)$$

$$GL(B) = b - 1 \quad (10)$$

$$GL \text{ Error} = n - p \quad (11)$$

$$GL \text{ Total} = n - 1 \quad (12)$$

En donde:

Tabla 14. Términos de las fórmulas.

<i>Término</i>	<i>Descripción</i>
a	Número de niveles en el factor A
b	Número de niveles en el factor B
n	Número total de observaciones
p	Número de coeficientes

Cuadrado Medio

El cuadrado medio, (CM), se lo obtiene a partir de la relación entre la suma de cuadrados y los grados de libertad. Matemáticamente hablando queda expresado como:

$$\text{Factor CM} = \frac{\text{Factor SC}}{\text{Factor GL}} \quad (13)$$

Para el error tenemos que:

$$\text{Error CM} = \frac{\text{Error SC}}{\text{Error GL}} \quad (14)$$

Valor F

El valor F, es una de las pruebas utilizadas para la determinación de la significancia de las relaciones de interacción y de efectos principales. El modelo matemático utilizado está en función a:

$$F = \frac{CM\ TÉRMINO}{ERROR\ CM} \quad (15)$$

Valor P

El valor P equivale a una probabilidad calculada a partir de una distribución F, con los grados de libertad para los términos en la prueba y los grados de libertad para el error. Está denotado por:

$$1 - P(F \leq fj) \quad (16)$$

En donde:

Tabla 15. Términos de las fórmulas.

<i>Término</i>	<i>Descripción</i>
$P(F \leq fj)$	Función de distribución acumulada para la distribución F
fj	Estadístico F para la prueba

A manera de resumen la tabla de resultados final quedaría expresada matemáticamente de la siguiente manera:

Tabla 16. Relación Matemática resumida

<i>GDL</i>	<i>SC</i>	<i>MC</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
n-1	*SC En función al término	SC/GDL	MC/MCE	1-P(F≤fj)
		MCE		

Valor S

Por otra parte, tenemos el valor S, el cual pertenece a la desviación estándar (σ) dentro de las muestras tomadas

R- Cuad

El R-Cuad está denotado mediante la siguiente relación:

$$1 - \frac{\text{Error SC}}{\text{SC Total}} \quad (17)$$

Una manera diferente de representar a este valor es:

$$\frac{\text{SC del Factor}}{\text{Sc Total}} \quad (18)$$

Siendo el SC la suma de los cuadrados calculada anteriormente.

El R-cuad ajustado está expresado en función del cuadrado medio del error, la suma de cuadrados total y los grados de libertad total. Matemáticamente queda expresado por:

$$1 - \frac{\text{Error CM}}{\frac{\text{SC Total}}{\text{GL Total}}} \quad (19)$$

El R-cuad (Pred), está denotado mediante la siguiente relación.

$$R^2(\text{pred}) = 1 - \frac{\text{PRESS}}{\text{SC Total}} = 1 - \frac{\sum_1^n \left(\frac{e_i}{1 - h_i} \right)^2}{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (20)$$

En donde:

Tabla 17. Términos de las fórmulas.

<i>Término</i>	<i>Descripción</i>
y_i	$i^{\text{ésimo}}$ valor de respuesta observado
y	Respuesta media
n	Número de observaciones
e_i	$i^{\text{ésimo}}$ residuo
h_i	$i^{\text{ésimo}}$ elemento diagonal de la matriz de diseño

A partir del análisis estadístico correspondiente (Anova) se puede argumentar que, en la resistencia a la tracción no existen diferencias marcadas en las propiedades de las resinas. Al aumentar el tiempo de curado aumenta la resistencia a la tracción, tanto a 15 min como a 60 se puede evidenciar un aumento en el caso de la resina Clear del 8.63% y en el de la resina Tough del 35.41% aproximadamente. A pesar de ello, la figura 23 evidencia que la diferencia entre las dos resinas no es significativa.

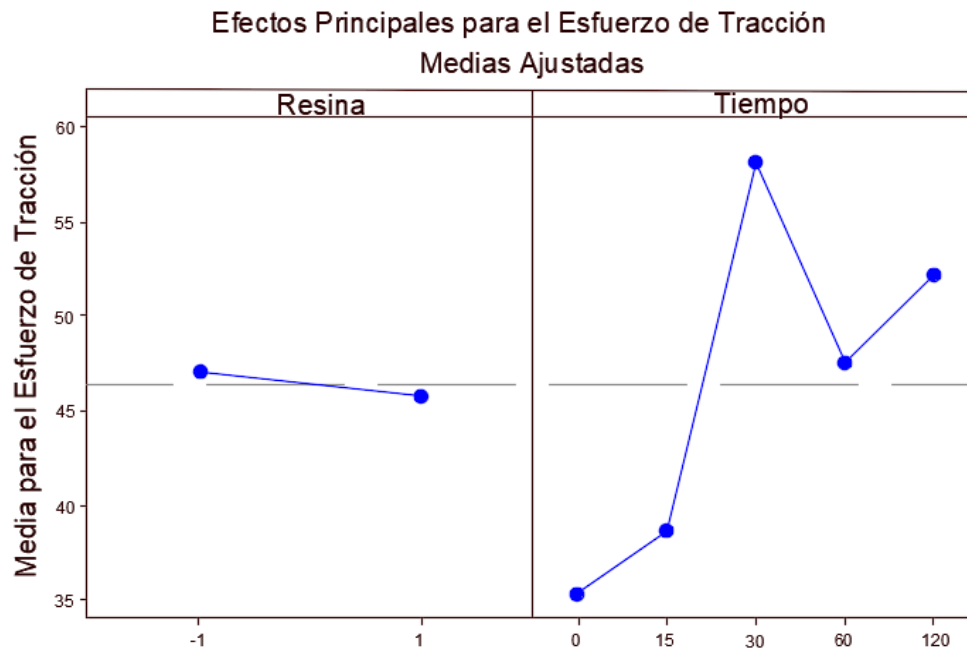


Figura 23. Efectos Principales en el Esfuerzo de Tracción de las Resinas

Tabla 18. Análisis de la varianza

ANÁLISIS DE VARIANZA					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	2268.31	453.663	41.51	0.000
Lineal	5	2268.31	453.663	41.51	0.000
Resina	1	4.22	4.225	0.39	0.540
Tiempo	4	2267.67	566.917	51.88	0.000
Error	24	262.28	10.928		
Total	29	2530.60			

3.2.2. Ensayo de Abrasión

En lo que se refiere a la resistencia a la abrasión, estadísticamente hablando la resina Tough es la que posee una menor resistencia. De los ensayos realizados se puede argumentar que la resina Clear sufrió una pérdida de 1 gr en el peor de los casos. Como lo muestra la figura 24, la resina Clear a los 15 y 30 min posee un desgaste del tipo estable.

La resina Tough posee un mayor desgaste entre el tiempo de curado recomendado (60 min) y el máximo (120 min). En términos generales es preferible que las dos resinas tengan un post curado.

Lo que dice la teoría es que a medida que las probetas reciben un mayor post curado su resistencia aumenta, sin embargo, pasado los tiempos máximos de curado de las resinas (30 min para la resina Clear y 120 min para la resina Tough) las propiedades se mantienen.

Todos los resultados que se presentan a continuación obedecen al procedimiento planteado en este trabajo.

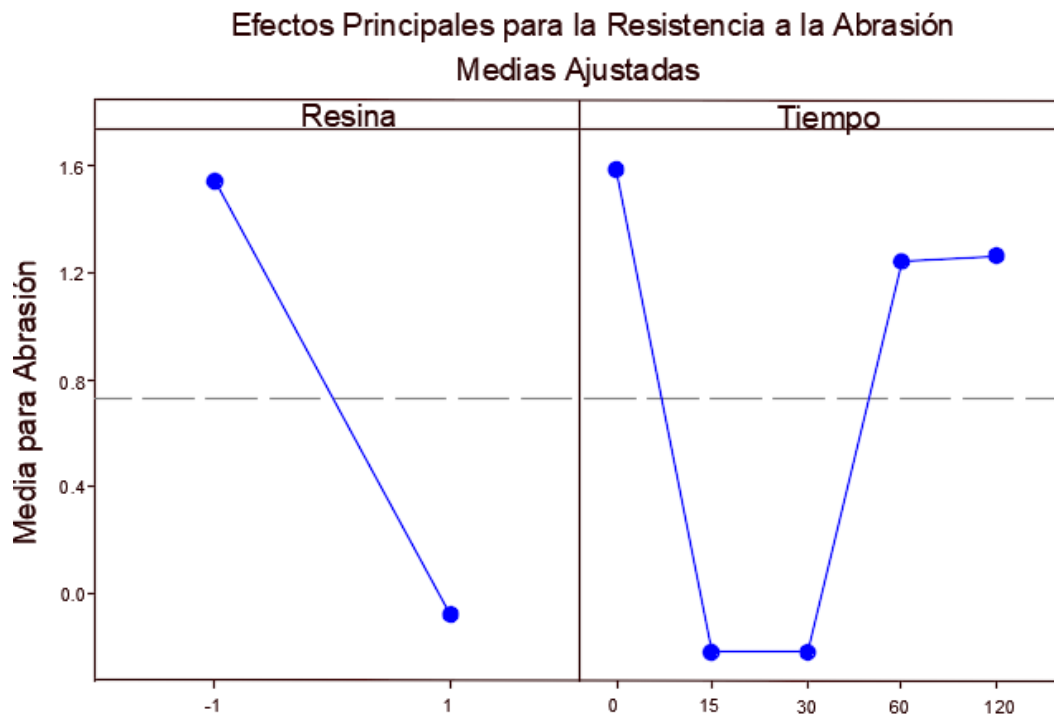


Figura 24. Efectos Principales en la resistencia a la abrasión de las probetas

Tabla 19. Análisis de la varianza

ANÁLISIS DE VARIANZA					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	14.2761	2.85522	93.69	0.000
Lineal	5	14.2761	2.85522	93.69	0.000
Resina	1	6.5582	6.55825	215.19	0.000
Tiempo	4	11.2139	2.80347	91.99	0.000
Error	24	0.7314	0.03048		
Total	29	15.0075			
RESUMEN DEL MODELO					
S		R-CUAD	R-cuad (ajustado)	R-cuad (pred)	
0.174574		95.13%	94.11%	92.38%	

3.2.3. Ensayo de Dureza

En lo referente a la dureza, la resina que mejor comportamiento ha presentado es la resina Clear. Esta resina ha demostrado que los valores de dureza son mayores a los de la resina Tough. Físicamente y una de las maneras más evidenciables es la flexibilidad que poseen las probetas. La resina Tough se caracteriza por tener una flexibilidad ligeramente mayor a la Clear. Al darle un mayor tiempo de post curado a la resina Tough no se logrará obtener un aumento en la dureza. La resina Tough posee un comportamiento casi estable en la dureza, es decir, el aumento del tiempo de post curado no genera un pico considerable entre los dos tiempos de exposición a rayos UV. Esto último se lo evidencia en la figura 25, entre el tiempo de 60 y 120 minutos.

Todos los resultados que se presentan a continuación obedecen al procedimiento planteado en este trabajo.

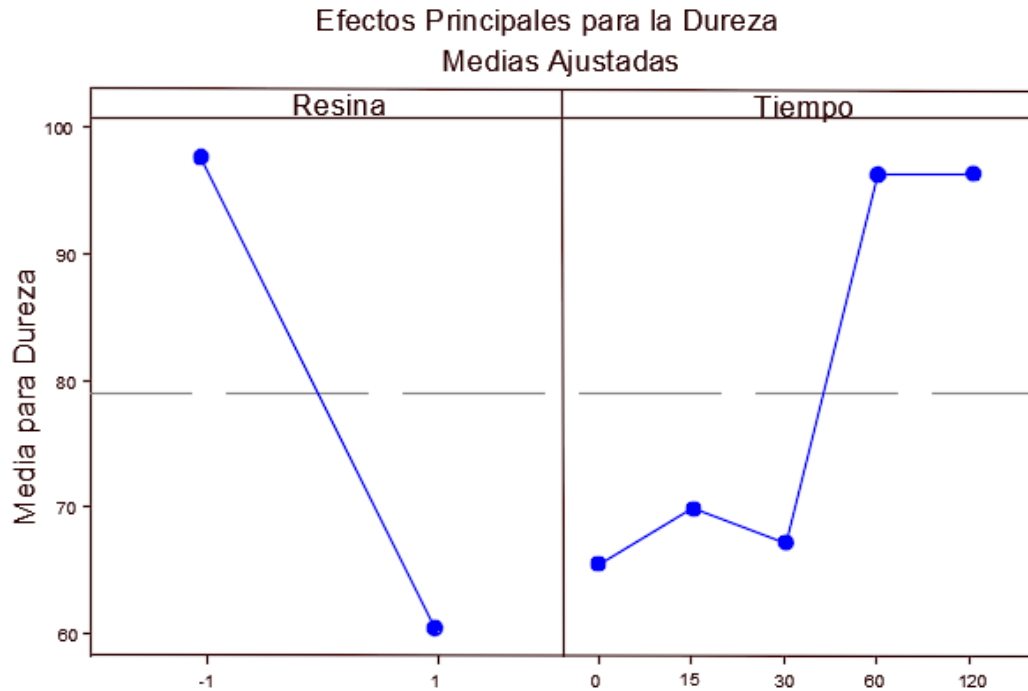


Figura 25. Efectos Principales en la Dureza de las resinas

Tabla 20. Análisis de la varianza

ANÁLISIS DE VARIANZA					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	5879.5	1175.91	42.74	0.000
Lineal	5	5879.5	1175.91	42.74	0.000
Resina	1	3496.9	3496.9	127.1	0.000
Tiempo	4	3219.3	804.83	29.25	0.000
Error	24	660.3	27.51		
Total	29	6539.8			
RESUMEN DEL MODELO					
S		R-CUAD	R-cuad (ajustado)	R-cuad (pred)	
5.24524		89.90%	87.80%	84.22%	

3.3.Verificación de la Hipótesis

La hipótesis planteada, presentaba que la resina Tough posee mejores propiedades (Resistencia a la tracción, Dureza y Resistencia a la Abrasión) que la resina Clear. Estadísticamente hablando, con un nivel de significancia de 95% se argumenta que la hipótesis se Rechaza. Es decir, la resina Estándar (Clear) presenta buenas propiedades tanto en la resistencia a la abrasión como a la dureza.

CAPITULO IV

4.1.Conclusiones

- La estereolitografía es una de las técnicas de impresión 3D con una elevada precisión. El ejemplo claro está en la elaboración de las probetas para ensayos de abrasión. Las dimensiones se encontraban en un rango de error de aproximadamente ± 0.2 mm. Gracias a ellos la impresión SLA, es utilizada para trabajos de precisión como engranes.
- En lo referente a los aspectos técnicos utilizados por las máquinas (Form 2, Form Cure), podemos destacar. Las máquinas Form utilizan una longitud de onda de 405 nm cuya adaptabilidad a las resinas es del 100%. El Post curado utiliza una radiación UV de 1.25 mW/cm². Estos valores son los recomendados por el fabricante.
- La dureza obtenida y una vez analizada estadísticamente arrojó que la resina Clear posee una mayor dureza. Sin embargo, esta no aumentará considerablemente si el tiempo de curado aumenta.
- En lo referente a los resultados del ensayo de abrasión se puede argumentar que la resina estándar posee una buena estabilidad y resistencia. Cuando las probetas no poseen un post curado su resistencia baja notablemente.
- El tiempo de curado recomendado para la resina Clear es de 15 minutos, en los 15 minutos posteriores se evidencia como las propiedades mecánicas llegan a su máximo, es decir, hay un incremento gradual. Sin embargo, si la pieza sigue bajo la incidencia de rayos UV pasados los 30 min las propiedades tienden a bajar (Módulo de Tensión).

- Para la Resina Tough el tiempo de curado adecuado es de 60 minutos al igual que la resina Clear, el máximo valor de las propiedades mecánicas que se pueden llegar a obtener es con un curado de 120 min. A partir de ello se hace evidente la tendencia a disminuir su módulo de tensión.

4.2. Recomendaciones

- Utilizar alcohol isopropílico para la limpieza de las probetas este líquido ayudará a limpiar el exceso de resina en la pieza una vez el proceso de impresión haya culminado.
- El modelo CAD de la pieza a imprimir no debe tener cualquier tipo de elemento de sostén de la pieza. Esto se debe a que el software CAM lo genera automáticamente y de acuerdo a la morfología de la pieza.
- Evitar la exposición a rayos UV una vez las piezas hayan sido curadas. Una exposición extra a rayos ultravioleta provocara cierto pandeo en la pieza. Esto por lo general se lo podría evidenciar en elementos cuya longitud sea considerablemente larga (Probetas de tracción)
- La limpieza de la pieza (eliminación de la rebaba) deberá realizarse de la manera más cautelosa posible esto evitará que se dañe cualquier superficie de la pieza. Gracias al software CAM, la rebaba es de fácil remoción.
- Para el ensayo de abrasión:
 - Limpiar las muelas considerando la cantidad de ciclos y el material utilizados con anterioridad.
 - La aspiradora debe estar encendida en todo momento mientras se realice el ensayo. Esto evitará la acumulación de material desechado en las muelas principalmente.

- Fijar la pieza a ensayar y en todo momento vigilar el desenvolvimiento de la probeta y por lo tanto de los elementos constitutivos de la máquina.

MATERIALES DE REFERENCIA

Referencias Bibliográficas

- [1] Ideos 3D Print Solutions, *Estereolitografía (SLA). Soluciones 3D con gran acabado superficial*, Print Solutions, 2013.
- [2] Erasmus Programme UE, *Introducción a la Impresión 3D*, UE, 2016.
- [3] R. J. C. & A. B. Ríos, “La estereolitografía en la Facultad de Odontología de la UNAM,” *Revista Odontológica Mexicana*, vol. 9, n° 5, pp. 48 - 50, 2005.
- [4] D. M. & R. Gieleta, “Experimental study of strength properties of SLA resins under low and high strain rates,” *Mechanics Of Materials*, vol. 141, pp. 20 - 60, 2019.
- [5] M. C. A. F.-A. S. G. E. C. S. Martínez-Pellitero, “Analysis of influence factors on part quality in micro-SLA technology,” *Procedia Manufacturing*, vol. 13, pp. 856 - 863, 2017.
- [6] B. Z. H. X. C. H. Xiaoyan Liu, “The preparation of ZrO₂-Al₂O₃ composite ceramic by SLA-3D printing and sintering processing,” *Ceramics International*, vol. 46, n° 1, pp. 937-944, 2020.
- [7] M. Groover, *Fundamentos de Manufactura Moderna*, Tercera ed., Santa Fe: The McGraw-Hill, 2007.
- [8] A. I. & Á. H. Fernando Bordignon, *Diseño e Impresión de Objetos 3D, Una guía de apoyo a escuelas*, Buenos Aires: Unipe Editorial Universitaria, 2018.
- [9] M. B. & B. Luyt, *La impresión 3D. Guía definitiva para makers, diseñadores, estudiantes, profesionales, artistas y manitas en general*, Barcelona: Editorial Gustavo Gili, SL, 2014.
- [10] Y. A. D. D. F. P. Kim K, “Stereolithographic Bone Scaffold Design Parameters: Osteogenic Differentiation and Signal Expression,” *Tissue Engineering Part B Reviews.*, vol. 16, n° 5, pp. 523-39, 2010.
- [11] Solectroshop, “Impresoras 3D,” 2016. [En línea]. Available: <https://solectroshop.com/product-spa-1658-Impresora-3D-Anet-A6-DIY-KIT.html>.

- [12] Print 3D World, [En línea]. Available:
<http://www.print3dworld.es/2014/02/bigrep-one-la-impresora-3d-fdm-mas-grande-hasta-la-fecha.html>.
- [13] Impresoras 3D, “Impresoras 3D,” 2014. [En línea]. Available:
<https://www.impresoras3d.com/tipos-de-impresoras-3d/>.
- [14] Imprimilia 3D, “Imprimilia 3D,” 2016. [En línea]. Available:
<http://imprimilia3d.com/noticias/2016/11/04/008183/aiju-adquiere-tecnolog-impresi-n-3d-que-simula-aspecto-tejido-humano-vivo>.
- [15] 3D New Wrld, “Estereolitografía,” 2018. [En línea]. Available:
<https://3dneworld.com/la-guia-de-impresion-de-estereolitografia-sla-en-3d/>.
- [16] J. López, *Notas de Futuro 2/16. Impresoras 3D*, CAP, 2016.
- [17] M. J. D. R. M. Mehra P, “Use of 3-D Stereolithographic Models in Oral and Maxillofacial Surgery,” *J Maxillofac Oral Surg*, vol. 10, nº 1, pp. 6-13, 2011.
- [18] B. R. y. M. P, “Design for Manufacturability,” de *Tool and Manufacturing*, Mich, Dearborn, 1992, p. Cap 7.
- [19] ERASMUS3D+, *GUÍA TÉCNICA DE IMPRESIÓN 3D*, Berlín: UE, 2017.
- [20] O. A. H. García, *Impresión 3D de proyectos de Ingeniería y Construcción*, Santiago de Chile: Universidad Andrés Bello, 2017.
- [21] J. Destefani, “Manufacturing Engineering,” *Plus or Minus*, pp. 93 - 97, 2005.
- [22] Sen Lights, “UV curing technology,” 2015. [En línea]. Available:
<http://www.senlights.com/gijyuu/uvcure/UVcuring.html>.
- [23] 3d Natives, “Top 10 resin 3D printers,” 2017. [En línea]. Available:
[http://www.3dnatives.com/en/top-10-resin-3d-printers280320174/..](http://www.3dnatives.com/en/top-10-resin-3d-printers280320174/)
- [24] M. Zahera, “La fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y desarrollo de productos,” de *XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, Valencia, 2012.
- [25] Mincyt (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva), “Impresión 3D: trabajo en red para una tecnología emergente,” 2015. [En línea]. Available:
www.mincyt.gob.ar/adjuntos/archivos/000/038/0000038659.pdf.

- [26] La Resina Epoxi, “RESINA 3D PARA IMPRESORA : la resina UV para Impresión (NO EPOXI),” 2017. [En línea]. Available: <https://laresinaepoxi.com/resina-uv-3d-impresoras/>.
- [27] H. Erquicia, *Análisis del fenómeno de desgaste por abrasión en conjuntos fibra-matriz de fibra de carbono-epoxy*, Universidad de Cantabria, 2017.
- [28] D. Montgomery, *Diseño y Análisis de Experimentos*, Arizona: Limusa Wiley, 2010.
- [29] UNAM, “Diseños Factoriales,” 2018. [En línea]. Available: <http://www.dpye.iimas.unam.mx/patricia/indexer/factoriales.pdf>.
- [30] P. Zachary Zguris, *How Mechanical Properties of Stereolithography 3D Prints are Affected by UV Curing*, EEUU: FormLbas, 2010.
- [31] FormLabs, *A Guide to Post-Curing Formlabs Resins*, White Paper, 2018.
- [32] E. M. & A. P. Danuta MIEDZIŃSKA, “NUMERICAL MODELLING OF RESINS USED IN STEREOLITHOGRAPHY RAPID PROTOTYPING,” *Applied Computer Science*, vol. 15, pp. 16 - 26, 2019.
- [33] L. L. J. Z. Yiran Yang, “Mechanical property modeling of photosensitive liquid resin in stereolithography additive manufacturing: Bridging degree of cure with tensile strength and hardness,” 2018. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.12.009>.

Anexos Varios.



Figura 26. Probetas para ensayo de abrasión de Resina Tough



Figura 27. Probetas para ensayo de abrasión de Resina Clear

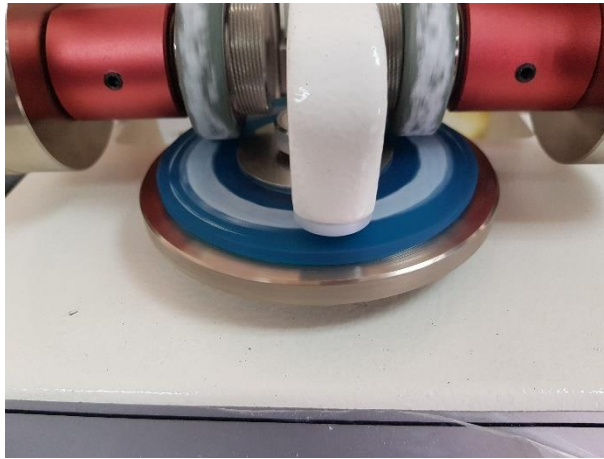


Figura 28. Ensayo de abrasión aplicado a probetas de resina Tough

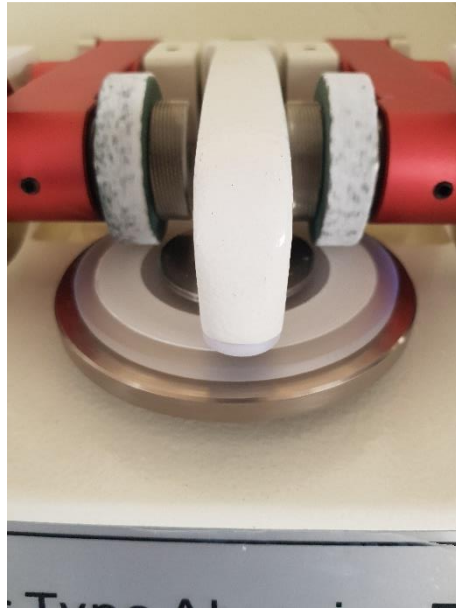


Figura 29. Ensayo de abrasión aplicado a probetas de resina Clear



Figura 30. Huella marcada producto del ensayo de abrasión



Figura 31. Pesaje de las probetas antes del ensayo de abrasión



Figura 32. Pesaje de las probetas antes del ensayo de abrasión



Figura 33. Pesaje de las probetas después del ensayo de abrasión



Figura 34. Pesaje de las probetas después del ensayo de abrasión



Figura 35. Ensayo de Dureza aplicado a las probetas

Resin	Temperature (°C)	Time (min)
Standard Resins	60	60
Castable	45	120
Tough	45	30
Flexible	45	60

Figura 36. Tiempos recomendados para el post curado de las resinas [31]

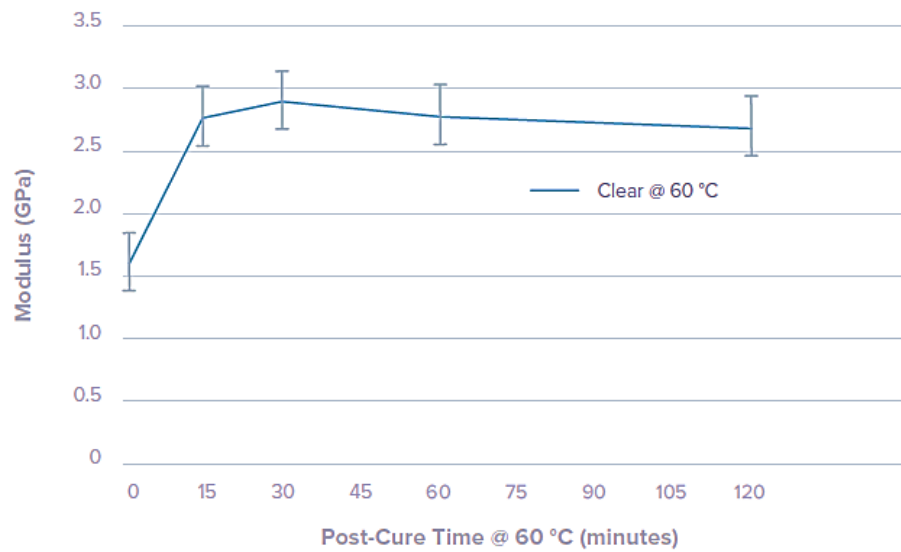


Figura 37. Gráfica T vs Módulo para la resina Clear (Objetivo: determinación de los tiempos de curado recomendados) [31]

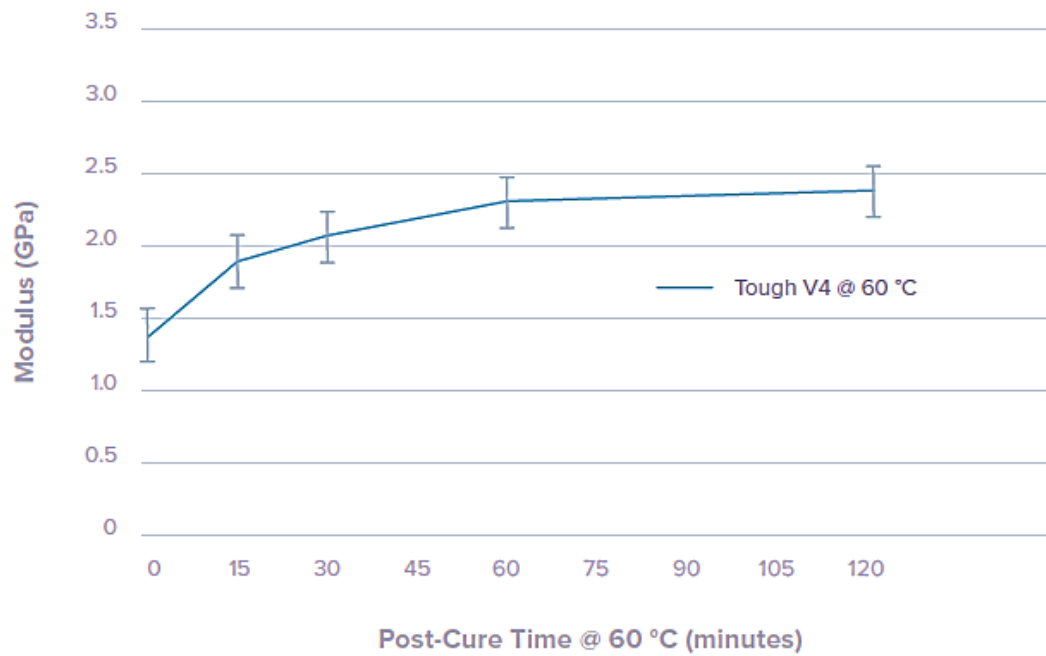


Figura 38. Gráfica T vs Módulo para la resina Tough (Objetivo: determinación de los tiempos de curado recomendados) [31]