



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

SELECCIÓN DE MATERIAL DE FABRICACIÓN PARA PRÓTESIS UTILITARIA DE EXTREMIDAD SUPERIOR IMPRESA EN 3D

John Ancajima-Rodríguez

Piura, febrero de 2019

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica

Ancajima, J. (2019). *Selección de material de fabricación para prótesis utilitaria de extremidad superior impresa en 3D* (Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una licencia

[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](https://repositorio.institucional.pirhua.edu.pe/)

**UNIVERSIDAD DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERIA MECANICO - ELECTRICA**

JOHN PAUL GEORGE ANCAJIMA RODRÍGUEZ

Título: “Selección de material de fabricación para prótesis utilitaria de extremidad superior impresa en 3D”

Año 2018, 177 páginas (1 tomo), 04 anexos, 03 planos, 4 CDs.

Asesor: Dr.Ing. Miguel Buenaventura Castro Sánchez

Co-Asesor: Mgtr. Ricardo Rodríguez Torres

RESUMEN

Esta investigación se abordará bajo el enfoque de tesis tradicional, se elige la impresión 3D, como proceso de innovación con proyección de reemplazo para técnicas existentes de modelado y obtención de piezas mecánicas; se escoge esta metodología por su versatilidad, ahorro y resultados excelentes en el campo de la manufactura moderna, además es una buena alternativa para reducir costos de dispositivos orientados a biomecánica, dando prestaciones similares a las fabricadas con otros métodos.

Se valida numéricamente una prótesis mecánica de miembro superior impresa en 3D, además de investigar los factores determinantes en la impresión 3D con un diseño de experimentos factorial 23 basado en la rotura de probetas asentadas por la norma ASTM D 638-03. El cual, por comparación directa, determina cuáles son los materiales que ofrecen las mejores prestaciones mecánicas en tracción para prótesis mecánicas de extremidades superiores. Se debe tener en cuenta que dicha prótesis necesita de dos tipos de materiales específicos (un termoplástico y un elastómero) para lograr su funcionalidad optima, pero sólo se aplican los estudios al termoplástico debido a que la mayor parte de la prótesis está constituida por este material.



UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA



**Selección de material de fabricación para prótesis utilitaria de
extremidad superior impresa en 3D**

**Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico Eléctrico**

JOHN PAUL GEORGE ANCAJIMA RODRÍGUEZ

Asesor:

Dr. Ing. Miguel Buenaventura Castro Sánchez

Co-asesor:

Mg. Ing. Ricardo Gerardo Rodríguez Torres

Piura, Febrero de 2019

Índice general

Introducción	1
Capítulo 1. Materiales para manufactura aditiva	3
1.1. Estado del arte	3
1.2. Polímeros	4
1.3. Procesos de polimerización.....	4
1.3.1. Polimerización por adición	4
1.3.2. Polimerización por condensación	5
1.3.3. Polimerización combinada	5
1.4. Tipos de polímeros.....	5
1.4.1. Según respuesta a elevadas temperaturas	5
1.4.1.1. Termoplásticos	5
1.4.1.2. Termoestables.....	5
1.4.2. Según su estructura molecular	6
1.4.2.1. Polímeros lineales	6
1.4.2.2. Polímeros ramificados.....	6
1.4.2.3. Polímeros entrecruzados	6
1.4.2.4. Polímeros reticulados	7
1.4.3. Según sus aplicaciones	7
1.4.3.1. Plásticos.....	7
1.4.3.2. Elastómeros (cauchos o gomas)	7
1.4.3.3. Fibras	8
1.4.3.4. Otras aplicaciones	8
1.4.3.5. Películas	8
1.4.3.6. Espumas	8
1.5. Propiedades	9

1.5.1.	Tipo de enlace.....	9
1.5.2.	Conducción térmica y eléctrica	9
1.5.3.	Cristalinidad.....	9
1.5.4.	Comportamiento esfuerzo vs deformación.....	9
1.5.5.	Fusión y fenómeno de transición vítrea.....	10
1.5.6.	Resistencia al impacto	10
1.6.	Manufactura aditiva	11
1.7.	Antecedentes de la impresión en 3D.....	12
1.8.	Técnicas de manufactura aditiva.....	13
1.8.1.	Inyección de material (material jetting).....	14
1.8.1.1.	Modelado multi-jet o multi jet modeling (MJM).....	14
1.8.2.	Chorro aglutinante de polvos (binder jetting):	14
1.8.2.1.	Powder bed and inkjet head (PBIH)/ impresión 3D en cama de yeso o 3DP (plaster-based 3D printing).....	15
1.8.3.	Extrusión de materiales (material extrusión).....	15
1.8.3.1.	Modelado por deposición fundida o fused desposition modeling (FDM) /Fabricación con filamento fundido o fused filament fabrication (FFF)	16
1.8.3.2.	Robocasting/direct ink writing (DIW)	17
1.8.4.	Laminación (sheet lamination)	17
1.8.4.1.	Manufactura de objetos por laminado (LOM)	18
1.8.4.2.	Consolidación ultrasónica (UC).....	18
1.8.5.	Deposición por energía dirigida (direct energy deposition)	19
1.8.5.1.	Sinterización directa de metal por láser (DMLS).....	19
1.8.5.2.	Fabricación libre por proyección de haz de electrones o electron beam free form fabrication (EBF).....	19
1.8.5.3.	Laser engineered net shaping (LENS)	20
1.8.5.4.	Consolidación láser o laser consolidation (LC)	20
1.8.5.5.	Ion fusion formation.....	20
1.8.5.6.	Shape metal deposition (SMD)	20
1.8.6.	Fotopolimerización en cuba o batea (vat photopolymerization)	21
1.8.6.1.	Estereolitografía (SLA)	21
1.8.6.2.	Procesado por luz digital o digital light processing (DLP)	21
1.8.6.3.	Cerafab	22
1.8.7.	Fusión en lecho de polvos (powred bed fusion)	22

1.8.7.1.	Fusión por haz de electrones (EBM).....	22
1.8.7.2.	Sinterización selectiva por láser (SLS)	22
1.8.7.3.	Sinterización selectiva con máscara (SMS)	23
1.8.7.4.	Fusión selectiva por láser (SLM)	23
1.8.7.5.	Formado directo con láser (DLF).....	23
1.9.	Polímeros de impresión 3D.....	24
1.9.1.	Acilonitrilo butadieno estireno (ABS)	24
1.9.2.	Ácido poliláctico (PLA)	24
1.9.3.	Alcohol de polivinilo (PVA)	25
1.9.4.	Tereftalato de polietileno (PET).....	25
1.9.5.	Poliestireno de alto impacto (HIPS)	25
1.9.6.	Laywood.....	25
1.9.7.	Nylon	25
1.9.8.	Polietileno de alta densidad (HDPE / PEAD)	26
1.9.9.	Policarbonato (PC)	26
1.9.10.	Laybrick.....	26
1.9.11.	Bendlay.....	26
1.9.12.	Filaflex.....	26
1.9.13.	Fibra de carbono	26
1.9.14.	Co-poliéster termoplástico (TCP FLEX).....	27
1.9.15.	Ninjaflex	27
1.9.16.	Pellets.....	27
1.9.17.	T-glase	27
Capítulo 2. Diseño del experimento.....		29
2.1.	Teoría de diseño de experimentos.....	29
2.1.1.	Conceptos generales	29
2.1.1.1.	Experimento	29
2.1.1.2.	Tratamiento	30
2.1.1.3.	Error experimental.....	30
2.1.1.4.	Testigo.....	30
2.1.1.5.	Unidad experimental	31
2.1.1.6.	Variable de interés o respuesta.....	31
2.1.1.7.	Factor.....	31

2.1.1.8.	Factor tratamiento	31
2.1.1.9.	Factor bloque.....	31
2.1.1.10.	Niveles, observación experimental y tamaño del experimento.....	31
2.1.2.	Planeación de la investigación.....	32
2.1.2.1.	Definir los objetivos del experimento	32
2.1.2.2.	Identificar todas las posibles fuentes de variación	32
2.1.2.3.	Elegir una regla de asignación de las unidades experimentales.....	33
2.1.2.4.	Especificar las medidas con que se trabajará la respuesta	33
2.1.2.5.	Ejecutar un experimento piloto	33
2.1.2.6.	Especificar el modelo	33
2.1.2.7.	Esquematizar los pasos del análisis.....	33
2.1.2.8.	Determinar el tamaño muestral	33
2.1.3.	Principios básicos en el diseño de experimentos.....	34
2.1.3.1.	Aleatorizar.....	34
2.1.3.2.	Formación por bloques.....	34
2.1.3.3.	Realización de réplicas.....	34
2.2.	Tipos de experimentos	34
2.2.1.	Diseño completamente aleatorizado.....	34
2.2.2.	Diseño de bloques completos al azar.....	35
2.2.3.	Diseños factoriales.....	36
2.3.	Elementos de análisis de varianza.....	39
2.4.	Diseño de experimentos factorial para PLA y ABS	41
	Capítulo 3. Preparación de probetas para ensayo	47
3.1.	Tipos de ensayos para plásticos	47
3.1.1.	Ensayo de resistencia a la tracción	49
3.1.1.1.	Estudio de curva ingenieril para plásticos.....	50
3.1.2.	Ensayo de resistencia a la flexión.....	51
3.1.3.	Ensayo de resistencia al impacto	51
3.1.4.	Ensayo de resistencia a la compresión	52
3.1.5.	Ensayo de dureza	52
3.2.	Teoría de probetas impresas en 3D.....	52
3.2.1.	Estudio de la norma ASTM D638-03 [40].....	53
3.2.1.1.	Tipos de muestras.....	53

3.2.1.2. Número y velocidad de pruebas	54
3.2.2. Selección de la probeta para ensayo de tracción	55
3.3. Elaboración de muestras empleadas	57
3.3.1. Plan final de trabajo	57
3.3.2. Probeta tipo I	58
3.3.3. Probetas termoformadas	60
3.3.4. Probeta tipo I con agujero.....	61
Capítulo 4. Resultados y comparación del ensayo	63
4.1. Análisis por elementos finitos.....	63
4.1.1. Probeta tipo I	64
4.1.2. Probetas termoformadas	66
4.1.3. Probeta tipo I con agujero.....	69
4.2. Prueba de comparación ABS vs PLA	72
4.3. Prueba de uniformidad para maquinaria.....	74
4.4. Prueba de termoformado.....	75
4.5. Prueba de isotropía.....	76
4.6. Control de medidas de probetas para diseño experimental.....	77
4.7. Diseño de experimentos	78
4.8. Validación numérica de prótesis	81
4.8.1. Diseño mecánico de prótesis	82
4.8.2. Caso de uso: Reposo.....	83
4.8.2.1. Efecto en antebrazo	83
4.8.2.2. Efecto en mano.....	84
4.8.2.3. Efecto en dedos	85
4.8.2.4. Efecto en brazo.....	85
4.8.3. Caso de uso: Flexión.....	86
4.9. Esfuerzos permisibles	87
Conclusiones	93
Referencias.....	95
Anexos	
Planos	