



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

CENTRO DE POSGRADOS

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR**

II PROMOCIÓN

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE MAGISTER EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR**

**TEMA: DESARROLLO DE ÓRTESIS (FÉRULA) DE TOBILLO Y PIE
OBTENIDO MEDIANTE TÉCNICA DE ESCANEÓ, ANÁLISIS CAD/CAE Y
PROTOTIPADO RÁPIDO EN 3D**

AUTOR: ARÍZAGA CORDERO, XAVIER AUGUSTO

DIRECTOR: ING. CORDOVÉS GARCÍA ALEXIS PH.D.

SANGOLQUÍ

2019



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSGRADOS

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "**DESARROLLO DE ÓRTESIS (FÉRULA) DE TOBILLO Y PIE OBTENIDO MEDIANTE TÉCNICA DE ESCANEADO, ANÁLISIS CAD/CAE Y PROTOTIPADO RÁPIDO EN 3D**", fue realizado por el señor **ARÍZAGA CORDERO XAVIER AUGUSTO**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 18 de abril del 2018

Ing. Alexis Cordovés García Ph.D.

C.C.:1756673677



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSGRADOS

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **ARÍZAGA CORDERO XAVIER AUGUSTO**, con cédula de ciudadanía N° 0104159371, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **DESARROLLO DE ÓRTESIS (FÉRULA) DE TOBILLO Y PIE OBTENIDO MEDIANTE TÉCNICA DE ESCANEADO, ANÁLISIS CAD/CAE Y PROTOTIPADO RÁPIDO EN 3D**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 18 de abril del 2018

Ing. Xavier Augusto Arízaga Cordero

C.C.: 0104159371



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSGRADOS

AUTORIZACIÓN

Yo, **ARÍZAGA CORDERO XAVIER AUGUSTO**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación, **DESARROLLO DE ÓRTESIS (FÉRULA) DE TOBILLO Y PIE OBTENIDO MEDIANTE TÉCNICA DE ESCANEO, ANÁLISIS CAD/CAE Y PROTOTIPADO RÁPIDO EN 3D**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 18 de abril del 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Xavier A.', is written over a horizontal line.

Ing. Xavier Augusto Arízaga Cordero

C.C.: 01041589371

DEDICATORIA

Con admiración, amor y respeto a las personas que han convivido y enriquecido mi vida, mostrándome el ejemplo constante de superación.

AGRADECIMIENTO

A quienes brindan experiencia y apoyo incondicional en mi vida.

Mi agradecimiento es también para mi director de tesis, demás profesionales que a más de ser una guía fueron buenos amigos. Y a todas aquellas personas que con su valiosa colaboración hicieron posible el desarrollo del presente estudio.

ÍNDICE DE CONTENIDO	
CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESÚMEN	xviii
ABSTRACT	xix
CAPITULO 1 - MARCO TEÓRICO	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Desarrollo del problema.....	1
1.3 Formulación del problema	2
1.4 Hipótesis.....	2
1.5 Objetivos.....	2
1.5.1 Objetivo General.....	2
1.5.2 Objetivos específicos.....	2
1.6 Antecedentes.....	3
1.7 Justificación e Importancia	4
1.8 Alcance.....	7
1.9 Aplicación de órtesis de tobillo y pie	8
1.10 Aplicación de órtesis en el Ecuador.....	8
1.10.1 Objetivos de la intervención con órtesis.	10
1.10.2 Formas, tipos y dimensiones de órtesis.....	11
1.10.3 Ventajas de su aplicación.	13
1.10.4 Principales inconvenientes de su aplicación.....	14
1.10.5 Aplicación de las tecnologías de escaneo (particularidades de su aplicación..... con fines médicos)	14

1.10.6 Aplicación de las tecnologías CAD/CAE en el diseño biomecánico..... (aplicaciones en la medicina).....	17
1.11 Metodologías de prototipado rápido.....	19
1.11.1 Estereolitografía (SLA).....	20
1.11.2 Modelado por deposición de hilo fundido.....	20
1.11.3 Sinterización selectiva por láser.....	21
1.11.4 Fabricación por corte y laminado.....	22
1.12 Materiales para impresión 3D.....	22
1.13 Proceso de trabajo y material a emplearse para la impresión 3D de una.....	27
1.13.1 Adquisición de materiales y equipos.....	27
1.13.2 Requerimientos de software y compatibilidad de equipos.....	28
1.13.3 Selección del software 3d para modelado.....	30
CAPÍTULO 2	31
OBTENCIÓN DE IMÁGENES DE EXTREMIDAD MANUALMENTE Y MEDIANTE.....	31
ESCANEADO 3D, MODELADO DEL PRODUCTO (CAD), ANÁLISIS INGENIERIL.....	31
MECÁNICO (CAE) E IMPRESIÓN 3D.....	31
2.1 Captura de la información geométrica y dimensional de un tobillo y pie..... manualmente	31
2.2 Captura de la información geométrica y dimensional de un tobillo y pie..... mediante escáner 3D.....	32
2.3 Desarrollo del modelo geométrico de una órtesis de tobillo y pie..... mediante herramientas CAD.....	35
2.3.1 Posible modelo y diseño de órtesis.....	38
2.3.2 Apertura de Archivos Escaneados en formato de Compatibilidad para Diseño..... y posterior Análisis Mecánico en Solidworks 2017	42
2.3.3 Creación de material plástico PLA en Solidworks 2017.....	58
2.3.4 Análisis mecánico utilizando el complemento Solidworks Simulación.....	60
CAPÍTULO 3	76
EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL PROTOTIPO DESARROLLADO.....	76
(PRUEBAS DE CAMPO).....	76

3.1	Diseño 3D de probetas en plástico PLA para análisis de laboratorio.....	76
3.2	Configuración de parámetros para impresión 3D de Probetas.	78
3.2.1	Impresión de Probeta 1 con densidad de mallado interno al 5%, en plástico..... ABS.....	79
3.2.2	Impresión de Probeta 2 con densidad de mallado interno al 15%, en plástico..... ABS.....	81
3.2.3	Impresión de Probeta 3 con densidad de mallado interno al 5%, en plástico..... PLA.....	82
3.2.4	Impresión de Probeta con densidad de mallado interno al 15%, en plástico..... PLA.....	84
3.3	Ensayo mecánico.....	86
3.4	Corrección del modelo geométrico del prototipo.	96
3.5	Impresión de prototipo de órtesis en plástico PLA	100
3.6	Impresión de prototipo de órtesis en plástico ABS.....	103
3.7	Evaluación de desempeño del prototipo desarrollado (Pruebas de campo)	108
3.8	Propuesta de mejoras del diseño en la órtesis de tobillo y pie.....	111
3.9	Recomendaciones sobre el campo de aplicación de la órtesis de tobillo..... y pie desarrollada.....	117
CAPÍTULO 4.....		118
PROCEDIMIENTOS PARA EL DISEÑO Y ANÁLISIS DE COSTOS PARA.....	
PRODUCCIÓN DE ORTESIS DE TOBILLO Y PIE.....		118
4.1	Simbología ANSI para diagramas de procesos y elaboración de diagramas....	118
4.1.1	Diagrama de proceso para escaneo de tobillo y pie con XYZScan.	120
4.1.2	Diagrama de procedimiento para modelado en 3D con el software Solidworks..... 2017, partiendo de imágenes escaneadas en 3D.....	121
4.1.3	Diagrama de proceso de análisis mecánico de órtesis en Solidworks 2017	122
4.1.4	Diagrama de proceso para corrección de archivo *. Stl con geometría..... incorrecta.....	123
4.1.5	Diagrama de proceso para impresión de órtesis en 3D con software Cura..... 15.04.....	124

4.2	Análisis de costos de equipos, servicios de escaneo e impresión y materiales.	124
4.2.1	Costos de diseño e Impresión 3D a nivel nacional	125
4.2.2	Costo de Filamento a nivel nacional.	128
4.2.3	Costos de servicios de escaneo, diseño e impresión 3D	129
4.2.3.1	Amortización de la impresora y escáner 3D.	129
4.2.3.2	Costo de consumo de impresora 3D.	130
4.2.3.3	Costo de reparaciones (mantenimiento) de la impresora.	137
4.2.3.4	Costo de preparación y post-procesado.	138
4.2.3.5	Costo de adquisición de imágenes.	138
4.2.3.6	Costo de diseño de pieza (precios aproximados)	138
4.2.3.7	Costo de puesta en marcha	139
4.2.3.8	Costo de la no calidad.	139
4.3	Análisis técnico económico de la implementación de los resultados.	139
	ANÁLISIS DE RESULTADOS	144
	CONCLUSIONES	146
	RECOMENDACIONES	148
	BIBLIOGRAFÍA	150

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Rango de calificación</i>	42
Tabla 2	<i>Puntuación de acuerdo a características de cada modelo</i>	42
Tabla 3	<i>Valores para curva Esfuerzo deformación de probeta de plástico PLA con... 5% de mallado interno</i>	91
Tabla 4	<i>Valores para curva Esfuerzo vs Deformación de probeta de plástico PLA con... 15% de mallado interno</i>	92
Tabla 5	<i>Valores para curva Esfuerzo vs Deformación de probeta de plástico ABS con... 5% de mallado interno</i>	94

Tabla 6 <i>Valores para curva Esfuerzo vs Deformación de probeta de plástico ABS.....</i>	
<i>con 15% de mallado interno</i>	95
Tabla 7 <i>Costos de equipos.....</i>	125
Tabla 8 <i>Costos de servicio de diseño e impresión 3D en Cuenca</i>	127
Tabla 9 <i>Costos de servicio de diseño e impresión 3D en Quito y Guayaquil</i>	127
Tabla 10 <i>Precios de Filamentos en Ecuador.....</i>	128
Tabla 11 <i>Consumo total de energía de los equipos.....</i>	134
Tabla 12 <i>Datos de interpolación para calcular el costo de 240.03 KWH.....</i>	134
Tabla 13 <i>Consumo total de energía de los equipos.....</i>	136
Tabla 14 <i>Datos de interpolación para calcular el costo de 10.24 KWH.....</i>	137
Tabla 15 <i>Costo de órtesis impresa en plástico PLA, considerando poca destreza en.....</i>	
<i>el software CAD/CAM.....</i>	141
Tabla 16 <i>Costo de órtesis impresa en plástico PLA, considerando alta destreza en.....</i>	
<i>el software CAD/CAM.....</i>	142
Tabla 17 <i>Costo de órtesis impresa en plástico ABS, considerando la reducción de.....</i>	
<i>la escala del diseño</i>	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Prueba de prótesis en hospital Isidro Ayora</i>	9
Figura 2 <i>Causas que provocan deformación de tobillo y pie</i>	10
Figura 3 <i>Órtesis para corrección de columna “Corsé de Boston”</i>	12
Figura 4 <i>Órtesis de tobillo y pie con articulación.....</i>	12
Figura 5 <i>Órtesis de tobillo y pie para niños.....</i>	12
Figura 6 <i>Escaneo e impresión de un feto en 3D.....</i>	15
Figura 7 <i>Aplicaciones de escaneo e impresión 3D en la medicina.</i>	16
Figura 8 <i>Análisis de tensión del elemento finito de una prótesis de pie.....</i>	18
Figura 9 <i>Análisis de desplazamientos de la articulación de tobillo.</i>	18
Figura 10 <i>Principales tipos de tecnología de prototipado rápido.</i>	19
Figura 11 <i>Estereolitografía.....</i>	20

Figura 12 Deposición de hilo fundido.....	21
Figura 13 Sinterización por láser.	21
Figura 14 Corte láser y laminado.....	22
Figura 15 Fichas de Lego impresas en plástico ABS.	22
Figura 16 Rueda dentada y estructura impresas en plástico PLA	23
Figura 17 Envase impreso en plástico PVA.....	24
Figura 18 Impresión de envase en plástico de alta densidad	24
Figura 19 Diseño de prenda de vestir	25
Figura 20 Impresión de prenda de vestir en plástico Nylon	25
Figura 21 Impresión de envase en plástico de alta densidad	26
Figura 22 Plástico PET triturado, convertido en filamento e impresión 3D	26
Figura 23 Zapatos impresos en plástico ninja Flex.....	27
Figura 24 Kit de impresora 3D Anycubic	28
Figura 25 Escáner 3D de la marca XYZscan.....	28
Figura 26 Características de computadora	29
Figura 27 Características de software y hardware para escáner 3D	30
Figura 28 Logo software Solidworks.....	30
Figura 29 Logo software Rhinoceros.....	30
Figura 30 Logo software Ansys Mechanical	31
Figura 31 Dimensiones de tobillo y pie tomadas manualmente.....	31
Figura 32 Busto obtenido en modo cabeza	32
Figura 33 Extremidad obtenida en modo cabeza	33
Figura 34 Escaneo en modalidad cuerpo	33
Figura 35 Imagen obtenida en modalidad cuerpo.....	34
Figura 36 y 37 Imágenes frontales obtenidas de la extremidad derecha en..... modalidad de escaneo cuerpo	34
Figura 38 y 39 Imágenes superiores obtenidas de la extremidad derecha en..... modalidad de escaneo cuerpo	34
Figura 40 y 41 Imágenes laterales obtenidas de la extremidad derecha en..... modalidad de escaneo cuerpo	35

Figura 42 Archivos de imagen escaneadas en formatos *.obj y *.stl	35
Figura 43 y 44 Músculos dorsiflexores del tobillo y Movimientos del tobillo	36
Figura 45 Fases de apoyo	37
Figura 46 Ciclo de marcha, apoyo y balanceo	38
Figura 47 Estática del pie	38
Figura 48 Órtesis AFO con articulación	39
Figura 49 Órtesis AFO con rígida de 90°	40
Figura 50 Estática del pie	41
Figura 51 Complemento Scanto3d	43
Figura 52 Apertura de archivos para malla	44
Figura 53 Visualización de modelo en malla.....	44
Figura 54 Asistente para preparación de malla	45
Figura 55 Configuración de parámetros en asistente de malla	46
Figura 56 Configuración de orientación en asistente para preparación de	46
Figura 57 Remoción de geometrías extrañas en asistente para preparación de malla ..	47
Figura 58 Simplificación de nube de puntos en asistente para preparación de malla ..	48
Figura 59 Suavizado global en asistente para preparación de malla.....	49
Figura 60 Relleno de taladros.....	49
Figura 61 y 62 Finalizado de asistente para preparación de malla y visualización.....	50
Figura 63 Configuración de parámetro “sección”, en asistente para curvas	50
Figura 64 Configuración de numero de planos y ajuste del cierre de curvatura	51
Figura 65 Creación de planos paralelos a líneas de croquis para equidistancia	51
Figura 66 Creación de equidistancias a 6mm.....	52
Figura 67 Creación de plano rotado 20° con referencia del plano lateral	52
Figura 68 Croquisado de estructura con forma de bota.....	53
Figura 69 Corte de tobillo y pie con la herramienta Corte-Extruir	54
Figura 70 Visualización de corte de tobillo y pie con malla.....	54
Figura 71 Cortes para redondeos de geometría	55
Figura 72 Croquisado y cortes de agujeros en geometría	55

Figura 73 Aplicación de la herramienta redondeo con diámetros de 10mm..... en geometría	56
Figura 74 Aplicación de la herramienta redondeo con diámetro de 7mm en geometría	56
Figura 75 Aplicación de la herramienta redondeo con diámetro de 3mm en geometría	57
Figura 76 Croquisado y corte de agujeros para soporte de velcro en geometría	57
Figura 77 Redondeo de 2mm de agujeros para soporte de velcro en geometría	58
Figura 78 Características mecánicas del plástico PLA	59
Figura 79 Características mecánicas del plástico PLA según foro de Solidworks	59
Figura 80 Creación de nuevo material plástico PLA en Solidworks	60
Figura 81 Diagrama de cuerpo libre con fuerza de 620N	61
Figura 82 Características de peso y estatura en personas.....	62
Figura 83 Diagrama de cuerpo libre con fuerza de 774.99N	63
Figura 84 Activación de complemento para simulación.....	63
Figura 85 Inicio de nuevo estudio para simulación	64
Figura 86 Aplicación de material para simulación mecánica	65
Figura 87 Características mecánicas del plástico PLA en librería de Solidworks 2017	65
Figura 88 Configuración del tipo de sujeción en superficie.....	66
Figura 89 Configuración del tipo de carga y su magnitud en superficie.....	67
Figura 90 Configuración del espesor de vaciado en 15mm	67
Figura 91 Acceso a configuración de malla interna para simulación	68
Figura 92 Configuración de densidad de malla interna para simulación.....	68
Figura 93 Mallado interno para simulación	69
Figura 94 Simulación de tensiones (Von Misses) con carga de 620N	69
Figura 95 Simulación de desplazamiento (Resistencia) con carga de 620N	70
Figura 96 Simulación de deformación unitaria con carga de 620N.....	70
Figura 97 Simulación de tensiones (Von Misses) con carga de 774.99N	71
Figura 98 Simulación de desplazamiento (Resistencia) con carga de 774.99N	71
Figura 99 Simulación de deformación unitaria con carga de 774.99N.....	72
Figura 100 Simulación de tensiones (Von Misses) con carga de 620N	72
Figura 101 Simulación de desplazamiento (Resistencia) con carga de 620N	73

Figura 102 Simulación de deformación unitaria con carga de 620N.....	73
Figura 103 Simulación de tensiones (Von Misses) con carga de 774.99N.....	74
Figura 104 Simulación de desplazamiento (Resistencia) con carga de 774.99N.....	74
Figura 105 Simulación de deformación unitaria con carga de 774.99N.....	75
Figura 106 Máquina de ensayo a compresión marca ACCU-TEK touch 350.....	77
Figura 107 Diseño de probeta rectangular en Solidworks 2017.....	77
Figura 108 Configuración de relleno de malla (Fill Density).....	78
Figura 109 Configuración de temperatura de impresión.....	78
Figura 110 Configuración de espesor y margen de la base.....	79
Figura 111 Configuración de relleno de malla (Fill Density) con el 5% para la probeta 1.....	79
Figura 112 Configuración de la adhesión a la plataforma.....	80
Figura 113 Configuración de temperatura de extrucción y cama caliente.....	80
Figura 114 Espesor de mallado (Fill Density) al 5% en probeta 1.....	80
Figura 115 Impresión 3D de probeta 1 en plástico ABS.....	81
Figura 116 Configuración de relleno de malla (Fill Density) con el 15% para la probeta 2.....	81
Figura 117 Espesor de mallado (Fill Density) al 15% en probeta.....	82
Figura 118 Impresión 3D de probeta 2 en plástico ABS.....	82
Figura 119 Configuración de relleno de malla (Fill Density) con el 5% para la probeta 3.....	83
Figura 120 Configuración de la adhesión a la plataforma.....	83
Figura 121 Configuración de temperatura de extrucción y cama caliente.....	83
Figura 122 Espesor de mallado (Fill Density) al 5% en probeta 3.....	83
Figura 123 Impresión 3D de probeta 3 en plástico PLA.....	84
Figura 124 Configuración de relleno de malla (Fill Density) con el 15% para la probeta 4.....	84
Figura 125 Espesor de mallado (Fill Density) al 15% en probeta 4.....	85
Figura 126 Impresión 3D y de probeta 4 en plástico PLA.....	85
Figura 127 Peso de probeta en plástico ABS con 15% de espesor de malla.....	86
Figura 128 Peso de probeta en plástico ABS con 5% de espesor de malla.....	86

Figura 129 Peso de probeta en plástico PLA con 15% de espesor de malla	87
Figura 130 Peso de probeta en plástico PLA con 5% de espesor de malla	87
Figura 131 Probetas con sus características de mallado interno, tipo y peso	88
Figura 132 Ensayo con probeta PLA 5% de mallado interior	88
Figura 133 Ensayo con probeta PLA 15% de mallado interior.....	89
Figura 134 Ensayo con probeta ABS 5% de mallado interior	89
Figura 135 Ensayo con probeta ABS 15% de mallado interior	89
Figura 136 Probeta fracturada en ensayo de compresión	90
Figura 138 Curva Esfuerzo vs Deformación en ensayo de compresión de probeta..... de plástico PLA con 5% de mallado interno	92
Figura 139 Máxima carga soportada en compresión por la probeta de..... plástico PLA con 15% de mallado interno	93
Figura 140 Curva Esfuerzo vs Deformación en ensayo de compresión de probeta..... de plástico PLA con 15% de mallado interno	93
Figura 141 Máxima carga soportada en compresión por la probeta de plástico ABS..... con 5% de mallado interno.....	94
Figura 142 Curva Esfuerzo vs Deformación en ensayo de compresión de probeta..... de plástico PLA con 5% de mallado interno	95
Figura 143 Máxima carga soportada en compresión por la probeta de plástico ABS..... con 15% de mallado interno.....	96
Figura 144 Curva Esfuerzo vs Deformación en ensayo de compresión de probeta..... de plástico PLA con 15% de mallado interno	96
Figura 145 Opciones de guardado de imágenes digitalizadas en formatos..... (* .obj, * .stl, * .ply).....	97
Figura 146 Logotipo de software Netfabb Studio Basic 4.9.	97
Figura 147 Configuración de parámetros básicos para corregir geometrías erróneas.... por malla	98
Figura 148 Configuración de malla interna previo a reparación.....	98
Figura 149 Aplicación de reparación	99
Figura 150 Exportación de archivo reparado a formato * . Stl	99
Figura 151 Configuración de espesor y margen de la base	100
Figura 152 Configuración de espesor de mallado (Fill Density) al 15%.....	101

Figura 153 Configuración de temperatura de extrucción	101
Figura 155 Tiempo de impresión y cantidad de material PLA necesario	102
Figura 156,157 y 158 Proceso de impresión de prototipo en PLA.....	103
Figura 159 y 160 Primer intento de impresión con mallado al 15% y T= 70°C.....	103
Figura 161 y 162 Segundo intento de impresión con mallado al 15% y T= 80°C	104
Figura 163 y 164 Primer intento de impresión con mallado al 15% y T= 90°C.....	104
Figura 165 Configuración de espesor y margen de la base	105
Figura 166 Configuración de espesor de mallado (Fill Density) al 8%.....	105
Figura 167 Configuración de temperatura de extrucción y de cama caliente	106
Figura 168 Trayectoria de la impresión en líneas rojas y visualización del espesor..... de mallado interno al 8% en líneas amarillas y verdes.....	106
Figura 169 Reducción de escala, tiempo de impresión y cantidad de material..... ABS necesario.....	107
Figura 170, 171 y 172 Proceso de impresión de prototipo en ABS	107
Figura 173 Fijación de tobillo con el prototipo de órtesis y la cinta velcro.	108
Figura 174 Diagrama de cuerpo libre con fuerza de 620N	109
Figura 175 y 176 Prueba de soporte de carga de 620N en el prototipo de órtesis.....	109
Figura 177 y 178 Desplazamiento con el prototipo de órtesis.	110
Figura 179 Distancia a extender para recubrir planta de pie	112
Figura 180 Distancia a extender la parte inferior de la base.....	112
Figura 181 Plantilla de 10 mm agregada en base	113
Figura 182 Ficha técnica de materiales para órtesis con espesores	114
Figura 183 Parte interna que debe recubrirse con gasa.....	115
Figura 184 Gasa colocada en interior con Cianoacrilato	115
Figura 185 Agujeros innecesarios en la base de la órtesis.....	116
Figura 186 Agujeros a tapar en la base de la órtesis.....	116
Figura 187 Base de caucho antideslizante Colocada	117
Figura 188 Diagrama matriz con detalle	118
Figura 189 Simbología de la norma ANSI	119
Figura 190 Diagrama de proceso de escaneo con software XYZ Scan Handy.	120

Figura 191	Diagrama de proceso de modelado de órtesis con software CAE.....	121
Figura 192	Diagrama de proceso de análisis mecánico de órtesis	122
Figura 193	Diagrama de proceso de reparación de geometría en archivo 3d	123
Figura 194	Diagrama de proceso de impresión de órtesis 3d con software..... Cura 14.04	124
Figura 195	Centro de diseño e impresión Sais 3D	126
Figura 196	Centro de diseño e impresión Maker Group	126
Figura 197	Centro de diseño e impresión Andina 3D	127
Figura 198	Características de la impresora Anycubic Kossel Linear	131
Figura 199	Costo del KWH en Suramérica	134

RESUMEN

En el Ecuador existen muchas personas con problemas anatómicos en las extremidades inferiores provocados por diversas enfermedades, las casas fabricantes de órtesis existentes en el país proveen una gran variedad de modelos, para mejorar su ergonomía, estética y ajuste de medidas utilizan técnicas de moldeo mediante yeso, no se aplican técnicas de escaneo 3D y posterior desarrollo CAD/CAM/CAE. El objetivo es obtener un prototipo de órtesis de tobillo y pie aplicando técnicas de escaneo 3D, tecnología CAD/CAE y prototipado rápido en plástico ABS y PLA. Mediante el escaneo 3D se digitalizan las en formatos (*.obj, *.stl, *.ply), aplicando software Solidworks 2017 con su complemento Scanto3d creamos una geometría de órtesis que se ajusta a la medida de la persona, posteriormente realizamos el análisis mecánico lo que nos permite garantizar que el plástico PLA y ABS soporte cargas de 620N y 774.99N que son las fuerzas del cuerpo sobre la órtesis, tomando en cuenta que el software Solidworks no permite un análisis biomecánico completo. Además de esto hemos logrado diseñar una órtesis con los requerimientos y forma geométrica deseada por el paciente. Los archivos (*.stl) fueron corregidos con el software Netfabb previo a la impresión 3D. Los tiempos de obtención y desarrollo de órtesis son cortos, si tenemos varias órdenes de producción los costos se reducen lo que permite entregar calidad. Para la impresión 3D de elementos ortésicos se debe considerar el tipo de impresora 3D a utilizar por las medidas físicas, los materiales externos para el acabado y la preparación del mismo.

PALABRAS CLAVE:

- **ESCÁNER 3D**
- **IMPRESORA 3D**
- **ESCANEEO 3D**
- **CAMA CALIENTE**
- **ADHERENCIA**

ABSTRACT

In Ecuador there are many people with anatomical problems in the lower limbs caused by various diseases, the orthosis manufacturers existing in the country provide a great variety of models, to improve their ergonomics, aesthetics and adjustment of measures using plaster molding techniques, 3D scanning techniques and subsequent CAD / CAM / CAE development are not applied. The goal is to obtain a prototype of ankle and foot orthosis using 3D scanning techniques, CAD / CAE technology and rapid prototyping in ABS and PLA plastic. By means of the 3D scan the images are formatted (* .obj, *.stl, *.ply), by applying software Solidworks 2017 with its Scanto3d add-on we create an orthotic geometry that fits the person's measure, then we perform the analysis mechanical, which allows us to guarantee that PLA and ABS plastic supports loads of 620N and 774.99N which are the forces of the body on the orthosis, taking into account that Solidworks software does not allow a complete biomechanical analysis. In addition to this we have been able to design an orthosis with the requirements and geometric form desired by the patient. The files (*.stl) were corrected with Netfabb software prior to 3D printing. The times of obtaining and development of órtesis are short, if we have several orders of production the costs are reduced what allows to deliver quality. For 3D printing of ortesic elements, consider the type of 3D printer to be used by the physical measurements, the external materials for the finishing and the preparation of the same.

KEYWORDS:

- **3D SCAN**
- **3D PRINTER**
- **SCANTO3D**
- **HEATBED**
- **ADHERENCE**

CAPITULO 1-MARCO TEÓRICO

1.1 Planteamiento del problema

¿Será posible una solución alternativa de las órtesis de tobillo y pie, fabricarlos en plástico ABS y PLA, para su posterior producción en serie al aplicar tecnologías de escaneo 3D, tecnología CAD/CAE y prototipado rápido, en las condiciones de la ciudad de Cuenca?

1.2 Desarrollo del problema

En la vida cotidiana podemos ver que las órtesis de tobillo y pie son muy ocupadas y forman parte de la estructura anatómica de las personas que tienen problemas de deformaciones en sus extremidades inferiores debido a ciertas enfermedades. En la mayoría de casos podemos ver aplicaciones de varios materiales plásticos, metálicos y nylon, considerando que algunos de estos materiales se deterioran por diversos factores se requiere su reparación; generalmente se tiene que recurrir a la casa fabricante para poder encontrar el repuesto o un producto nuevo, en muchos casos dichas casas fabricantes no tienen en stock, ya no existen u otras simplemente no elaboran más el producto y su línea de repuestos. En la actualidad por medio de la globalización se puede comprar por internet el artículo nuevo o el repuesto que se necesita, pero esto implica costos y tiempo, también se puede recurrir al fabricante local pudiendo tener un precio elevado y su tiempo de entrega demorado.

En este sentido, la tendencia a nivel mundial es reutilizar los productos y diseñar sus componentes en materiales más asequibles y amigables con el medio ambiente. Quedando todavía una parte de la población que prefiere desechar y comprar nuevos productos.

Para dar una solución al problema planteado, especialmente en la ciudad de Cuenca, se puede utilizar un escáner 3D simple, los softwares CAD/CAE, una impresora 3D de volumen de impresión 15cmx15cmx15cm.

1.3 Formulación del problema

- a) ¿La órtesis de tobillo y pie, soportará las cargas a las que están sometidas durante su funcionamiento?
- b) ¿Es factible utilizar material plástico ABS o PLA para la producción de órtesis de tobillo y pie o sus componentes en pequeñas series?
- c) ¿El escaneo 3D de un tobillo y pie nos permitirá adaptar, modificar un diseño y prototipo de órtesis adecuadamente a la anatomía de la persona?
- d) ¿La persona se adaptará al uso de la órtesis de tobillo y pie en los materiales propuestos?
- e) ¿Será factible la aplicación del proyecto en la ciudad de Cuenca desde el punto de vista técnico-económico?

1.4 Hipótesis

La aplicación de técnicas de escaneo 3D, tecnologías CAD/CAE y el estudio de los materiales ABS y PLA para la creación de un modelo de órtesis de tobillo y pie con la obtención de un prototipo, posibilitará el estudio de materiales alternativos para estos objetos y la organización de su producción en serie.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Obtener un prototipo de órtesis de tobillo y pie aplicando técnicas de escaneo 3D, tecnologías CAD/CAE, y prototipado rápido en plástico ABS y PLA.

1.5.2 Objetivos específicos

- a) Obtener el modelo geométrico en 3D de una órtesis de tobillo y pie mediante la técnica de escaneo 3D y realizar un diseño en CAD.
- b) Evaluar el comportamiento del modelo de la órtesis de tobillo y pie, ante el sistema de cargas al que estará sometido de acuerdo a su función, para los

plásticos ABS y PLA disponibles en el mercado, mediante el análisis numérico con herramientas CAE.

- c) Fabricar el prototipo de la órtesis de tobillo y pie mediante impresión 3D.

- d) Evaluar el comportamiento de los materiales que componen el prototipo mediante ensayos mecánicos.

- e) Probar el prototipo en persona voluntaria y evaluar su comportamiento.

- f) Evaluar la factibilidad técnico-económica de acometer la producción en serie de órtesis de tobillo y pie por el procedimiento descrito para las condiciones estudiadas.

1.6 Antecedentes.

(Diario el Telégrafo, 2015) menciona que en el país se están destinando 110 millones de dólares para la creación de tres fábricas de Ortesis y prótesis ubicadas en Cuenca, Loja y Quito. Permitiendo cambiar la vida y devolver sonrisas a las personas con discapacidad.

(Espinosa, Arroyo, Maroto, Molina, Palacios, 2010) hablan sobre los conocimientos básicos de las patologías más prevalentes en Rehabilitación Infantil, tanto en el campo diagnóstico como en el de la valoración funcional, planteamiento de objetivos terapéuticos y herramientas para conseguirlos.

(Diario la República, 2015) hace referencia a la marca Baby3dPrint, misma que ha desarrollado un escáner en 3D para mujeres en período de embarazo.

(Luna, Medina, Soledispa, 2016) mencionan que la utilización de las impresoras 3D en diversos campos se ha vuelto muy importante en la actualidad y aún más cuando es empleado en la rama de la medicina. En todo el mundo más de mil millones de personas conviven con algunas deficiencias, entre estas, cerca de 200 millones presentan problemas funcionales y este en un número creciente y preocupante. Por lo

tanto, al haber un gran número de personas con alguna deficiencia, se requiere el uso de ayudas para compensar la falta de algún miembro funcional.

(Jiménez, Fernández de la Puente, Llorente, 2012) en este artículo se detallan los 4 métodos básicos de prototipado rápido que son la Estereolitografía, Sinterizado por láser, Manufactura de laminado y Deposición por hilo fundido (FDM). Detallando las características principales, con sus ventajas y desventajas.

(Llorca, 2016) Hace hincapié en los materiales para impresión 3D, se destacan materiales como el plástico ABS que posee tres grandes componentes como el Acrilonitrilo, butadieno y estireno, el plástico PLA que se deriva del maíz y la resina epóxica que es producida en base a plantas. Con sus características, accesos en el mercado y las dificultades que se presentan en el momento de la impresión. También se reporta que la industria de la impresión 3D es lucrativa y que genera 188.5 millones de euros.

(Olmos, 2015) Destaca que el PLA es un plástico muy utilizado en la impresión 3D (por no decir que es el más empleado en el medio) por sus propiedades, que son muy amigables con todo lo que se te ocurra, es un material resistente y flexible. Mayormente utilizado para imprimir piezas más artísticas y detalladas, siendo así un plástico extremadamente útil. Las temperaturas que requiere para ser impreso varían desde 180^a-200^ac Según lo consideres. Un material amigable para el usuario y el medio ambiente, ya que no es para nada toxico (aunque ten en cuenta que los químicos para darle color si pueden serlo) solo toma tus precauciones y trata de no ingerirlo.

1.7 Justificación e Importancia

Generalmente cuando las personas sufren de enfermedades como pie de Charcót, pie equino, espolón calcáneo, etc. Existe un deterioro que provoca deformación y posterior amputación en las extremidades inferiores que son parte vital para su movilidad, muchas prótesis, órtesis y zapatillas especiales son utilizadas para corregir los diversos tipos de deformidades y permitir movilidad de las extremidades inferiores. Dichos artefactos contienen materiales mixtos y accesorios plásticos o metálicos por lo

que reemplazarlos es costoso o no existen en stock teniendo que importarlos retrasando así tratamientos y empeorando la salud de muchas personas. Considerando las normas de calidad ecuatorianas y las normas de diseño mecánico en muchos aspectos exigen un alto nivel de calidad en su acabado. La propuesta de construir un prototipo de órtesis de tobillo y pie es interesante ya que se pueden bajar los costos, elaborar distintos diseños y construir cualquier parte con materiales disponibles en el mercado. Otra consideración es la de construir dichas órtesis en series pequeñas para que las personas puedan tener un fácil acceso y después promocionarlos en otras regiones.

Con la información revisada y el análisis de artículos, en el país no existen estudios sobre la aplicación de plásticos ABS y PLA para la creación de órtesis de tobillo y pie u otros dispositivos, tampoco se menciona un proceso para producir en serie partiendo de del escaneo y prototipado en impresión 3D.

La técnica de escaneo 3D y prototipado 3D mediante deposición de hilo fundido es relativamente nueva en nuestro medio. Se pueden combinar ambas técnicas para obtener un proceso bien definido de producción de tirajes cortos y concluir con un producto novedoso que sea asequible en precio y tiempo.

Las experiencias obtenidas durante la realización de trabajos relacionados con el diseño de piezas grandes, pequeñas y los conocimientos adquiridos en el transcurso de la maestría en Manufactura y Diseño Asistido por Computador constituyen las bases formativas para el desarrollo de la presente investigación.

Se ha conversado con proveedores de tecnología de prototipado 3D en la ciudad de Quito y con profesionales en la rama de la medicina en la especialidad de traumatología en la ciudad de Cuenca, que han mencionado carencia, falencias y disponibilidad de materiales en cuanto al diseño de prótesis, órtesis, zapatillas y otros dispositivos que pueden ser de mucha ayuda para personas con deterioro de extremidades. También se menciona la carencia de producción serial, considerándose lo siguiente:

- Los materiales comúnmente utilizados en el desarrollo de órtesis de tobillo y pie para personas con atrofia y deformación de extremidades inferiores pueden tener componentes plásticos y metálicos.
- No se tiene conocimiento de trabajos precedentes en la fabricación de órtesis para extremidades inferiores, en este caso para tobillo y pie en plásticos ABS y PLA, tampoco de su producción en pequeñas cantidades aplicando la técnica de escaneo 3D y las tecnologías descritas; en la ciudad de Cuenca, como parte de tareas de diseño, optimización, reparación, reposición o de desarrollo de nuevos productos y sus componentes.

A partir de estas consideraciones se ha llegado a la conclusión que el desarrollo de una órtesis (férula) de tobillo y pie obtenido mediante técnica de escaneo con análisis CAD/CAE y prototipado rápido en 3d, obtenida a partir de materiales plásticos ABS y PLA; su producción en serie de manera rentable, podrá dar un plus al sector de la industria de diseño mecánico y medicinal del país. Según la experiencia mundial este tipo de productos está siendo utilizado en muchos campos de la medicina ya sea aplicada a humanos y animales con buenos resultados.

En principio, los ingenieros industriales, mecánicos y diseñadores están siempre abiertos a considerar nuevas ofertas que constituyan alternativas a los productos tradicionales. En este sentido, se ha considerado la posibilidad de obtener una propuesta de desarrollo de órtesis de tobillo y pie a partir de la formalización de un procedimiento, que permita la personalización del diseño y la producción en serie de estos artículos, incluso para reponer partes deterioradas o el perfeccionamiento de los actuales diseños, con la finalidad de mejorar sus prestaciones desde el punto de vista anatómico, funcional y estético. Ello podrá estimular la apertura de nuevos emprendimientos como parte del interés en fortalecer la matriz productiva del sector de la construcción en el país.

1.8 Alcance

El presente estudio se pretende aplicar en la Ciudad de Cuenca, teniendo un alcance para las personas que sufren dolencias como pie de Charcót, pie equino, espolón calcáneo, etc.

Se pretende efectuar el estudio con técnicas de escaneo 3D, diseño, impresión en 3D, mediante la aplicación de herramientas CAD/CAE. Después de las pruebas con herramienta CAE podremos ensamblar un prototipo con las partes impresas y los accesorios que sean necesarios utilizando herramientas convencionales para armado (taladro, destornilladores, entonarla, etc.). Es importante analizar las posibilidades de desarrollo de este producto en las condiciones de la pequeña empresa Cuencana, con la finalidad de generar una alternativa de solución a partir de un nuevo emprendimiento en el sector manufacturero, un sector emergente con gran influencia en el fortalecimiento de la matriz productiva del país.

Muchas personas en los últimos años han sufrido de enfermedades como la diabetes, problemas de circulación, deformidades, etc. Que terminan dañando las extremidades inferiores provocando su deformación permanente y su posterior amputación. Existen ciertos tratamientos dependiendo del tipo de enfermedad para corregir deformaciones sobre todo en las piernas, tobillos y pies, estos tratamientos consisten en colocar ortesis (férulas) para su corrección incluyendo mecanismos pequeños para movilidad y sujeción.

En el mercado nacional se encuentran ortesis (férulas) de varias tallas por estatura, pero no se pueden encontrar por el tamaño de deformación que provocan ciertas enfermedades en las extremidades inferiores, además son importadas y en ciertos casos el tiempo de adquisición y disponibilidad de estas o de un mecanismo que las componen puede ser extensa. Cuando no se pueden reparar o adaptar, se tiende a comprar nuevas, llegando costar desde \$90.00 hasta \$200.00 dependiendo del tipo, tamaño, material y funcionalidad.

1.9 Aplicación de órtesis de tobillo y pie.

Las órtesis de pie y tobillo permiten la corrección de ciertas deformaciones provocadas por enfermedades y lesiones por actividad física. Deben ser cuidadosamente diseñadas y elaboradas con parámetros, materiales y técnicas recomendadas por especialistas, por los potenciales clientes y las casas fabricantes.

Pese a que existen muchas investigaciones, no se puede mejorar con precisión ciertas dolencias del cuerpo humano como la deformación en el tobillo y pie. Por más que se tengan materiales como silicona, plástico y contengan varias articulaciones; neumáticas o hidráulicas con microprocesadores no es suficiente.

La evolución de materiales en la era espacial y nuevas tecnologías han permitido que en la actualidad se pueda devolver al paciente la oportunidad de vivir una vida plena lo más cercana a la normalidad.

La realidad de ECUADOR y su limitación de recursos económicos y tecnológicos han sido un obstáculo para que se pueda brindar esta oportunidad a cada uno de sus pacientes con un servicio que dignifique a las personas sin la necesidad de recurrir a servicios denigrantes por su condición de discapacidad.

1.10 Aplicación de órtesis en el Ecuador.

Existen datos acerca de la construcción de órtesis (férulas) desde la edad media, en la actualidad en el Ecuador se ha tratado de potenciar este campo. En el año 2011 el gobierno hizo una inversión mediante la misión Manuela Espejo y la Vicepresidencia de la república en la cual se contaba con 110 millones de dólares de presupuesto y parte de este iba destinado a la creación tres fábricas de órtesis y prótesis en Cuenca, Loja y Quito. En cada unidad se invertiría 300 mil dólares, además, se contrató gente capacitada que pueda intervenir en la elaboración de los implementos que cambiarán la vida de las personas con discapacidad.



Figura 2 Prueba de prótesis en hospital Isidro Ayora

Fuente: (Telégrafo, D. E. 03 de 05 de 2015)

Finalmente, la fábrica de órtesis y prótesis del Hospital General Isidro Ayora en Loja es una de las tres existentes en el país. Las otras fábricas están ubicadas en el Hospital Abel Gilbert Pontón, de Guayaquil, y en el Centro de Rehabilitación Integral Especializado (CRIE), en Conocoto, al sureste de Quito.¹

En el Ecuador no existe un registro unificado nacional de cuantas personas tienen deformación de sus extremidades, cuales son las principales enfermedades que las provocan y cuantas órtesis (férulas) y prótesis se han aplicado para corregir deformidad, existen ciertas fundaciones u hospitales privados que llevan registros independientes como el hospital Alcívar y el Centro Integral del Pie.

Las principales causas de deformación de tobillo y pie se pueden apreciar en el siguiente cuadro:

¹ Taller de Ortesis y Prótesis Devuelven Sonrisas



Figura 3 Causas que provocan deformación de tobillo y pie
Fuente: (R., 2016)

Los datos que se pueden encontrar en la región del Austro ecuatoriano específicamente en la ciudad de Cuenca acerca de discapacidad son los que proporciona el Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades.

Las órtesis aplicadas en pacientes dentro del Ecuador han sido construidas con técnicas de moldeado en yeso en algunos casos y en otros simplemente se aplican las que ya están fabricadas en medidas estándares teniendo que hacer modificaciones sobre la marcha lo cual causa incomodidad para el paciente.

1.10.1 Objetivos de la intervención con órtesis.

Su función principal es la prevención de las contracturas y deformidades, las órtesis protegen los tejidos cartilaginosos y blandos de los efectos de la deformación,

pueden estabilizar las estructuras óseas durante el crecimiento y finalmente brindan una óptima alineación conjunta, sobre todo en las articulaciones, alineando los músculos que las recubren.

Protección de los músculos débiles, por hipotonía o por desuso muscular prolongado. Control de las desviaciones relacionadas con trastornos del tono muscular. El alineamiento estructural también reduce la necesidad de buscar la estabilidad compensatoria.²

1.10.2 Formas, tipos y dimensiones de órtesis.

Los tipos de deformaciones en la anatomía humana pueden ser variadas y provocadas por diversos factores entre estos las enfermedades y los accidentes. Son prescritas por médicos especialistas, fundamentalmente traumatólogos y rehabilitadores. En el Atlas de las órtesis y dispositivos de ayuda podemos obtener una clasificación precisa de estos dispositivos.

- a) Órtesis Vertebrales
- b) Órtesis de las extremidades superiores
- c) Órtesis de las extremidades inferiores
- d) Órtesis pediátricas
- e) Dispositivos de ayuda

Las órtesis de pueden ser usadas en pacientes con problemas neurológicos, tales como evento vascular cerebral, traumatismo encefálico craneal, parálisis cerebral, lesiones medulares y de nervios periféricos que implican las extremidades inferiores, además la diabetes tipo II que deriva en pie de Charcót. A continuación, se pueden observar algunos modelos:

² Rehabilitación Infantil

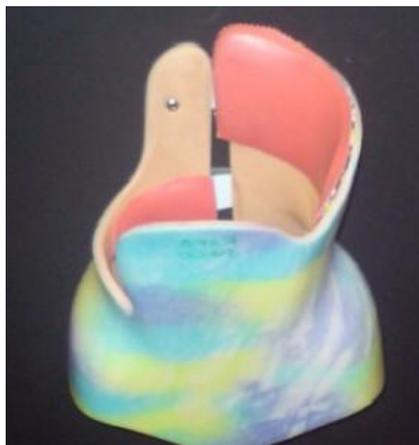


Figura 4 Órtesis para corrección de columna “Corsé de Boston”.
Fuente: (Espinosa & Arroyo, 2010)

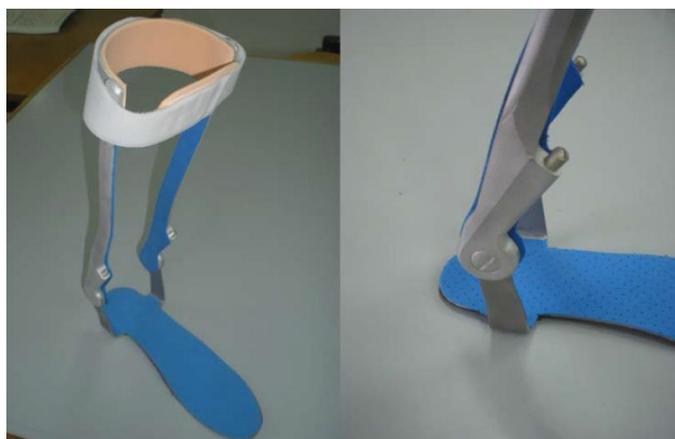


Figura 5 Órtesis de tobillo y pie con articulación.
Fuente: (Medicalexpo, 2015)



Figura 6 Órtesis de tobillo y pie para niños.
Fuente: (Medicalexpo, 2015)

Las órtesis presentadas anteriormente son creadas en plástico y metal, estas parten siempre de radiografías o tomografías, pero no se han aplicado tecnologías de escaneo 3D.

Para desarrollar una órtesis según la Sociedad Americana de Terapeutas de Mano, en el año 1992, se definió el Sistema de Clasificación de Órtesis S.C.S. (System Classification Splint), en cuatro características a continuación descritas:

- a) **Lugar anatómico:** Engloban las áreas afectadas en el diseño de la órtesis como, por ejemplo: articulaciones o segmentos corporales. Ejemplo de una férula articular es una inmovilizadora de muñeca y no articular un brazalete de húmero.
- b) **Dirección cinemática:** Consiste en que las áreas contenidas en el diseño de la órtesis, tiene un componente cinemático en relación a la funcionalidad articular. Ejemplos de éstos son: órtesis de flexo-extensión, pronación, supinación, separación y aproximación, etc.
- c) **Propósito fundamental:** Muestra si la órtesis facilita la movilización, inmovilización o restringe la movilidad.
- d) **Inclusión de articulaciones secundarias:** Se refiere a las articulaciones involucradas en el diseño ortésico que no están relacionadas directamente a la principal.

1.10.3 Ventajas de su aplicación.

Considerando que existen muchos diseños de órtesis, cada una con sus características de funcionalidad para su aplicación en tobillo y pie nombramos los aspectos positivos.

- El dispositivo ayuda en la marcha evitando que el tobillo y pie se deslicen bruscamente hacia los lados evitando las rozaduras o presiones innecesarias.
- Cuando el moldeado es casi perfecto, el paciente sentirá como una segunda piel.
- El material aplicado para su construcción es por lo general liviano, provocando un mínimo esfuerzo al levantar la extremidad. Se usan refuerzos y materiales que amortigüen el rozamiento.

- La órtesis es fácil de lavar, poner y quitar.
- Los sistemas de fijación proporcionan ergonomía a la persona con discapacidad.
- Las órtesis pueden ser temporales devolviendo la confianza de la persona.

1.10.4 Principales inconvenientes de su aplicación.

Las órtesis son construidas para dar comodidad y mejora a los pacientes en cuanto al control de deformidades, sujeción y permiten movimiento. En ciertos aspectos no todas terminan siendo de gran ayuda presentando inconvenientes que provocan incomodidad. Se considera los siguientes aspectos negativos:

- Por los materiales usados en su fabricación las órtesis pueden provocar mucha sudoración que puede infectar heridas y presentar malos olores.
- Los dispositivos que se utilizan para sujeción no siempre logran su cometido por lo que pueden provocar presiones extras en los lugares de sujeción.
- El aspecto estético es importante en la parte psicológica del paciente, lamentablemente con las tecnologías existentes se pueden construir órtesis aproximadas a la realidad funcional de una extremidad o parte del cuerpo, pero no son exactamente iguales.

1.10.5 Aplicación de las tecnologías de escaneo (particularidades de su aplicación con fines médicos)

La tecnología de escaneo es utilizada desde los años 80 empezando por dos dimensiones, dentro de la industria para el análisis de componentes mecánicos, en la medicina con las radiografías. A la mitad de los años 90 se creó el escáner portátil en dos dimensiones lo que permitía acceder a información mucho más rápido y con facilidad desde cualquier hogar u oficina. Con el pasar de los años esta tecnología fue mejorando y cada vez aplicada en otros usos a la medicina la cual se ha convertido en el pilar fundamental del desarrollo de la tecnología 3D.³

³ Convertir una ecografía 3D o 4D en una imagen física

En el 2008 surgieron las ecografías en 3D, que supuso un gran avance en el sector de la medicina.

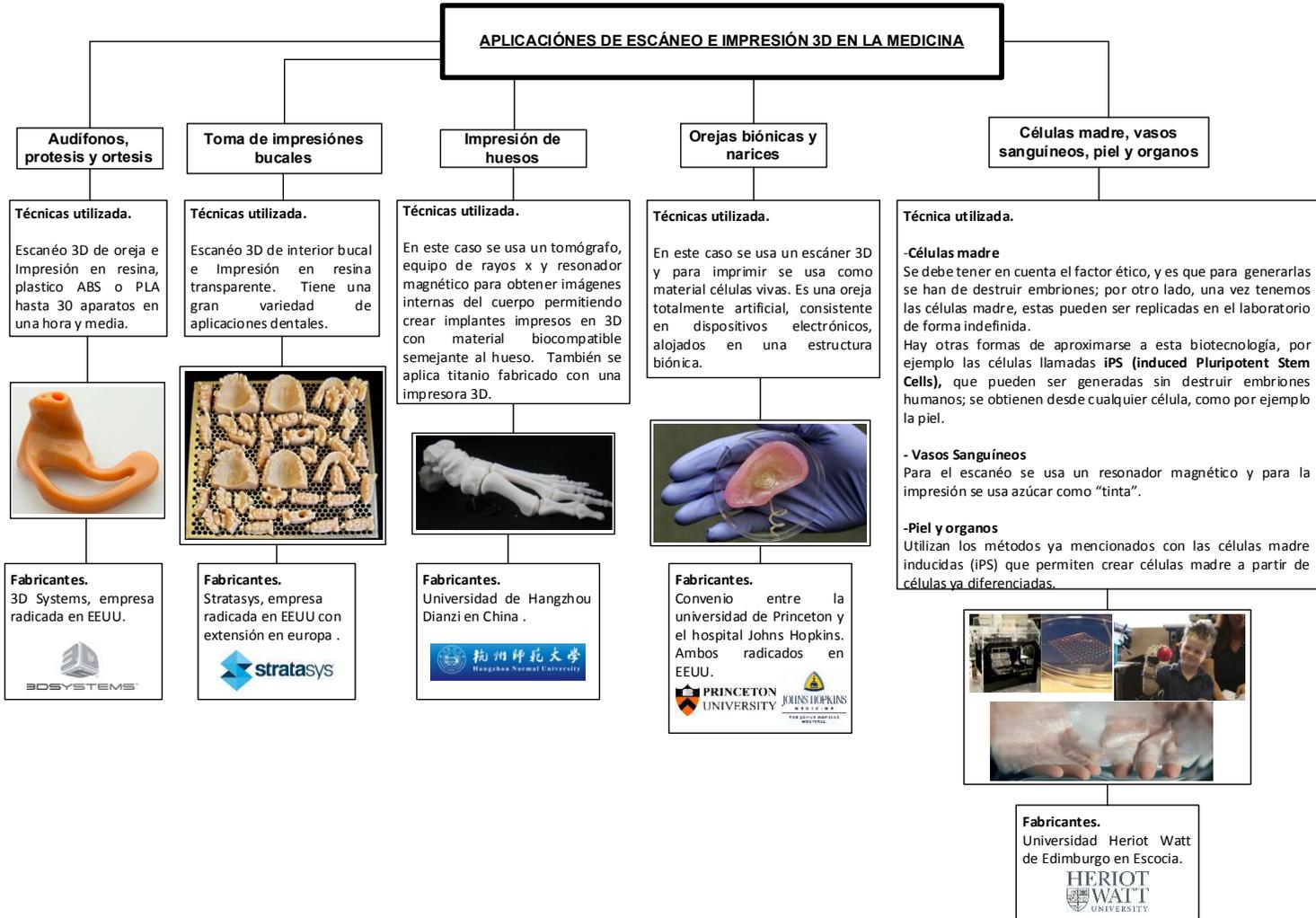
El año 2013 se produjo un nuevo paso: la impresión en tres dimensiones de un feto mediante el escaneo siendo su principal objetivo detectar malformaciones en los natos, así como posibles complicaciones en el parto. De esta manera podrían ayudar al personal médico a dar un mejor seguimiento del periodo de gestación del bebé.⁴



Figura 7 Escaneo e impresión de un feto en 3D.
Fuente: (Baby3DPrint, 2014)

⁴ Los Beneficios de las Impresoras 3D como Herramienta de Innovación en la Medicina

Figura 8 Aplicaciones de escaneo e impresión 3D en la medicina.
Fuente: (www.impresiontredse.com, 2013)



El interés por los escáneres 3D ha crecido rápidamente, permitiendo que el mercado ofrezca a menores precios y una variedad de modelos. Mediante un escaneo del objeto se obtienen las medidas exactas y se imprime instantáneamente o puede hacerse ajustes en su tamaño, funcionalidad y ergonomía, pudiendo ser personalizable. El país que más invierte en investigación sobre esta tecnología es E.E.U.U marcando la directriz a nivel mundial.

1.10.6 Aplicación de las tecnologías CAD/CAE en el diseño biomecánico (aplicaciones en la medicina)

La aplicación de tecnologías CAD/CAE consiste en aplicar un prototipado virtual, siendo el máximo exponente de las aplicaciones de CAD y de modelado de Sólidos.

Por prototipado virtual se entiende el disponer del modelado sólido en un computador que nos permita hacer simulaciones y cálculos y diversas pruebas según materiales, condiciones de trabajo, modificación de cotas y formas, Elementos Finitos, renderizados virtuales con distintas texturas y materiales, animaciones, pruebas que nos permitirán depurar los modelos antes de su ejecución material.

Dentro del área de la medicina podemos nombrar a las ramas de biomedicina y la biomecánica donde se aplican tecnologías CAD/CAE que están ligadas en muchos aspectos.

- **Biomedicina.** - Engloba los campos de la odontología, bioquímica, biología, histología, genética, embriología, anatomía, fisiología, patología, zoología, botánica y microbiología.
- **Biomecánica.** - Es un área interdisciplinaria de conocimiento que estudia las estructuras de carácter mecánico que existen en los seres vivos, fundamentalmente el cuerpo humano. La biomecánica se apoya en diversas ciencias de la biomedicina.

Los procedimientos de elementos finito dentro de la tecnología CAD/CAE tal y como se entiende hoy en día son relativamente modernos y han permitido un gran desarrollo de prótesis, órtesis y artículos de fijación en el cuerpo humano. Su nacimiento y desarrollo es una consecuencia de la disponibilidad de herramientas electrónicas de cálculo cada vez más potentes.⁵

Esta tecnología tiene el objetivo, siempre, de reducir los tiempos de rehabilitación y fisioterapia de un paciente o de puesta de producto en el mercado como podemos visualizar en las fotos 8 y 9.

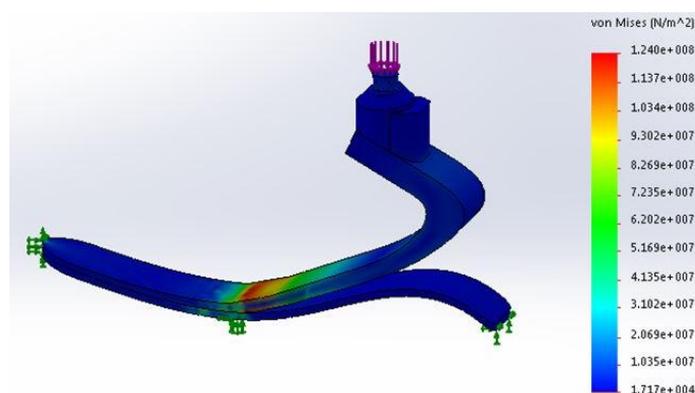
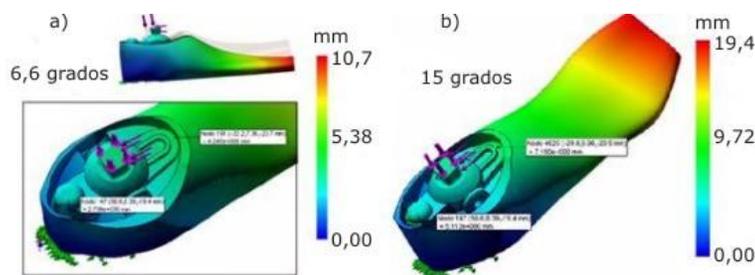


Figura 9 Análisis de tensión del elemento finito de una prótesis de pie.

Fuente: (biomechanicaldesign.wordpress.com, 2015)



a: ángulo de entrada 6,6 grados; b: ángulo de entrada 15 grados.

Figura 10 Análisis de desplazamientos de la articulación de tobillo.

Fuente: (biomechanicaldesign.wordpress.com, 2015)

⁵ Método de elementos finitos en pie protésico

1.11 Metodologías de prototipado rápido.

El prototipado rápido es un procedimiento mediante el cual se introducen coordenadas matemáticas, creadas mediante técnicas CAD/CAM, que son procesadas para realizar modelos a escala.

Desde el principio el ser humano ha tenido la voluntad de reproducir, de crear imagen y semejanza las formas ideadas, siendo este proceso laborioso dependiendo del avance tecnológico en cada época.⁶

En el año 1983 surge en EEUU la primera empresa llamada 3dSystems que manejaba la tecnología CAD/CAM/CAE. Con el transcurso de los años se refinan gran parte de estas tecnologías a nivel industrial y surgen interesantes proyectos paralelos hasta la actualidad. (Sanchez & Llorente, 2014)

La tecnología 3D de prototipado rápido involucra la impresión, digitalizado de imágenes y mecanizado CNC, al ser tecnologías nuevas y en desarrollo tenían altos costos por lo que, en 2005 el Dr. Bowyer (Universidad de Bath, UK) desarrolla la primera impresora 3D con capacidad de imprimir casi la totalidad de las piezas que la componen. Este hecho constituye la entrada del Open-source en la historia de la impresión tridimensional y un gran paso hacia su normalización en el mercado. Basándose en el proyecto RepRap, surgen a su vez varios proyectos con la misma idea, favorecer el desarrollo de esta tecnología y acercarla al mayor número posible de comunidades. De entre todos sobresale Makerbot Industries, y su modelo Makerbot. En la siguiente figura podemos ver la clasificación de las cuatro principales tecnologías de prototipado rápido

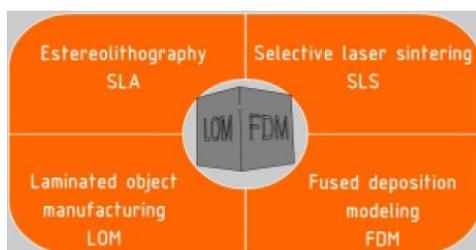


Figura 11 Principales tipos de tecnología de prototipado rápido.

Fuente: (Sanchez & Llorente, 2014)

⁶ Técnicas de Prototipado Rápido

Dentro de las tecnologías de prototipado rápido 3D podemos considerar cuatro principales métodos de impresión:

1.11.1 Estereolitografía (SLA)

Charles Hull inventa el método en 1984, el cual era un proceso de impresión que consiste en solidificar una resina foto curable (resinas epoxi y acrílicas) en estado líquido mediante la acción de un láser ultravioleta.

Esto fue orientado a construir maquetas para la prueba de prototipos antes de su fabricación en cadena. Ese mismo año crea 3DSystems, empresa líder en el mercado que permitió la utilización a nivel industrial de este proceso.⁷



Figura 12 Estereolitografía

Fuente: (Sanchez & Llorente, 2014)

1.11.2 Modelado por deposición de hilo fundido.

En los años 90, S. Scott Crump, desarrolló la técnica de Fused Deposition Modeling (FDM), que consistía en la creación de objetos tridimensionales mediante la superposición de capas de material fundido que posteriormente solidificaba con la forma deseada. Con el tiempo este método permitió una mayor difusión de la impresión 3D abaratando costes y permitiendo a pequeños usuarios y talleres no industriales tener acceso a esta tecnología para fines propios.

⁷ Técnicas de Prototipado Rápido

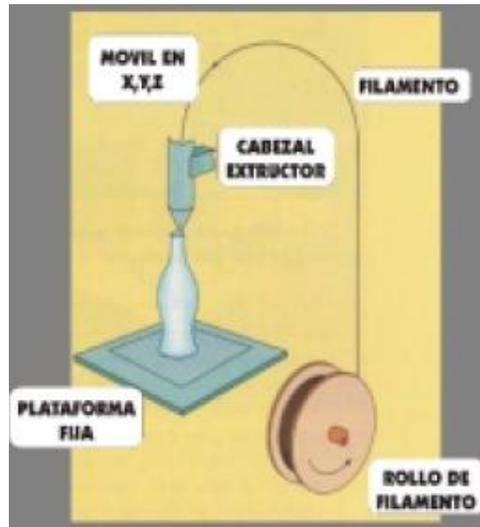


Figura 13 Deposición de hilo fundido.

Fuente: (Sanchez & Llorente, 2014)

1.11.3 Sinterización selectiva por láser.

Es un proceso similar al de Estereolitografía con la diferencia que se utiliza polvo en vez de resina líquida. Este consiste en un láser que transfiere energía al polvo haciendo que se polimerice. Después se sumerge en un líquido que hace que las zonas polimerizadas se solidifiquen.

Una vez impresas todas las capas sólo hay que sacar la pieza. Con ayuda de un aspirador se retira el polvo sobrante, que se reutilizará en futuras impresiones.



Figura 14 Sinterización por láser.

Fuente: (Sanchez & Llorente, 2014)

1.11.4 Fabricación por corte y laminado.

Esta técnica consiste en la creación de prototipos rápidos a través de la superposición y pegado sucesivo de láminas de papel movidas por rodillos y cortadas por láser.



Figura 15 Corte láser y laminado.

Fuente: (Sanchez & Llorente, 2014)

1.12 Materiales para impresión 3D.

La mayoría de estos materiales pueden tener origen plástico, resina y en menor cantidad origen metálico.

a) Plástico ABS. - Se trata de un termoplástico compuesto por tres grandes componentes: Acrilonitrilo, butadieno y estireno; cada uno de los cuales le aporta características distintas. Este derivado del petróleo todavía es considerado por la resistencia que ofrece ante grandes impactos y dureza.⁸



Figura 16 Fichas de Lego impresas en plástico ABS.

Fuente: (Llorca, 2015)

⁸ Cuáles son los Mejores Materiales para Imprimir

Características de los componentes del plástico ABS.

Acrilonitrilo. - Proporciona rigidez, estabilidad ante las altas temperaturas y fortaleza ante los ataques químicos.

Butadieno. - Da tenacidad ante las bajas temperaturas y le da la protección necesaria ante los impactos.

Estireno. - Mejora la resistencia mecánica y el brillo, entre otros.

b) Plástico PLA (Poliácido Láctico). - Se crea a partir de recursos naturales y renovables como las raíces de la tapioca, la caña de azúcar y el almidón de maíz. Su principal virtud, evidentemente, es que se trata de un compuesto biodegradable, no contaminante.⁹



Figura 17 Rueda dentada y estructura impresas en plástico PLA

Fuente: (Olmos, 2015)

Es fácil usarlo para imprimir porque funciona a temperaturas más bajas que el ABS (oscilan entre los 190 y 200 grados aproximadamente) pero resulta bastante frágil y su vida útil es menor. Se lo puede encontrar en muchos envases de productos alimenticios.

⁹ Filamentos para impresión 3d

c) Plástico PVA (Alcohol Polivinilo). - Es un plástico biodegradable que se gasta, principalmente, en impresoras de cabezas múltiples a modo de estructura para aquellas zonas más frágiles. Opera con temperaturas de fusión que rondan los 180 grados y resulta perfecto para objetos complejos. Por desgracia, se disuelve en agua y es propenso a absorberla.

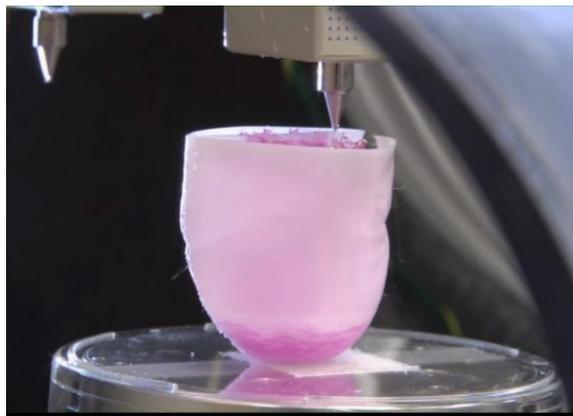


Figura 18 Envase impreso en plástico PVA

Fuente: (Goodrich, 2013)

d) Plástico HDPE (Polietileno de alta densidad). - Resiste especialmente bien ante los disolventes y pegamentos. No se utiliza demasiado porque tiene tendencia a encogerse y no es reciclable. Su fusión se produce cuando alcanza los 225 grados. Posee además excelente resistencia térmica y química, muy buena resistencia al impacto y no desprende gases tóxicos el momento de su impresión.



Figura 19 Impresión de envase en plástico de alta densidad

Fuente: (Goodrich, 2013)

e) Plástico NYLON (Poliamida). - Es un polímero sintético que pertenece al grupo de las poliamidas, como fibra se obtiene muy buenos acabados en impresión 3D, pero presenta algunos inconvenientes: tiende a encogerse, curvarse, no se adhiere bien al aluminio ni al cristal de la impresora 3D, y tampoco es biodegradable. Se fundiona entre los 240 y 250 grados.

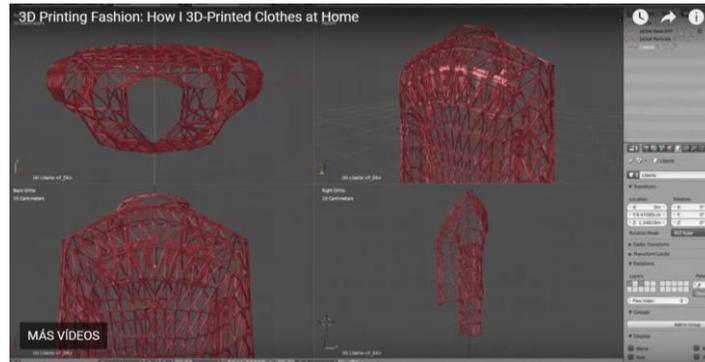


Figura 20 Diseño de prenda de vestir
Fuente: (Wilbur, 2015)



Figura 21 Impresión de prenda de vestir en plástico Nylon
Fuente: (Wilbur, 2015)

f) Plástico HIPS (High Impact Polystyrene). - Es un termoplástico obtenido por polimerización de alta resistencia al impacto. Es conocido como “Poliestireno de alto impacto” y se utiliza como material de soporte en impresiones de ABS o PLA. Necesita las mismas temperaturas de fundición del ABS. Generalmente, se combina con él ABS para hacer piezas que tienen espacios huecos en su interior. Tiene una densidad de 1,04 g/cm y aguanta mal la luz ultravioleta.

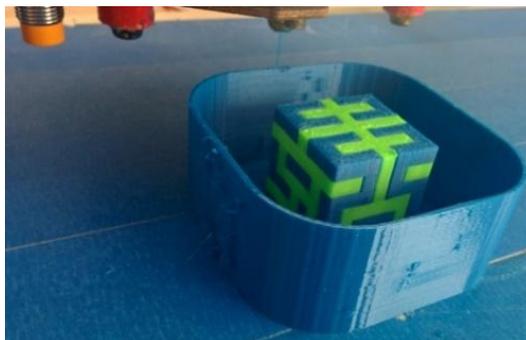


Figura 22 Impresión de envase en plástico de alta densidad
Fuente: (Circuitgrove, 2017)

Aunque la mayoría de sus propiedades mecánicas y físicas (rigidez, resistencia a tracción y a impacto, estabilidad térmica,...) son similares a las del ABS, hay una característica que lo hace diferente respecto a todos los demás que es su solubilidad en D-Limoneno, permitiendo realizar formas irrealizables con un material de soporte soluble y que se harán realidad una vez se sumerja la pieza en D-Limoneno (Sustancia natural que se extrae de los cítricos) y el HIPS desaparezca, quedando la pieza sin ningún material de soporte y con una gran calidad superficial.

g) Plástico PET (tereftalato de polietileno). - Para poder imprimirlo en 3D se procesa el material desperdiciado después de la inyección del plástico, tiene un especial protagonismo en la industria embotelladora y envases similares, su principal virtud es que puede cristalizar y dar lugar a piezas transparentes de buen acabado y resistentes. Posee una densidad de 1,45 g/cm y actúa con temperaturas de fusión idénticas a las del PLA.



Figura 23 Plástico PET triturado, convertido en filamento e impresión 3D
(www.redautogestionadaconsumo.wordpress.com, 2017)

h) Plástico Ninja Flex. - Es un elastómero termoplástico (TPE) al que se le añade un agente químico (plastificante), para aumentar su flexibilidad y reducir la temperatura de fundido y la viscosidad que permite que las impresoras 3d puedan fundirlo y darle la forma deseada. Nos brinda la posibilidad de fabricar elementos con una flexibilidad sorprendente, manejables. El filamento en sí mismo tiene una consistencia parecida a la de una cuerda de goma y se funde como el PLA.



Figura 24 Zapatos impresos en plástico ninja Flex
Fuente: (www.quecartucho.es, 2015)

1.13 Proceso de trabajo y material a emplearse para la impresión 3D de una órtesis basado en técnicas de escaneo.

1.13.1 Adquisición de materiales y equipos.

Dentro del Ecuador es más barato y fácil conseguir el plástico PLA en rollos de diámetro de filamento de 2mm y 1.75mm para impresión 3d.

Para el desarrollo de la presente investigación se procedió a la adquisición en EEUU de una impresora 3D de marca Anycubic tipo Kossel Lineal en kit, un escáner 3D de la marca XYZPrinting, dos rollos de plástico PLA (Poliácido Láctico). Un CPU desktop con características de séptima generación adquirido en Ecuador.

Se describen los costos en el siguiente cuadro de cada elemento, además los costos de envío de los rollos de plástico dentro del Ecuador.

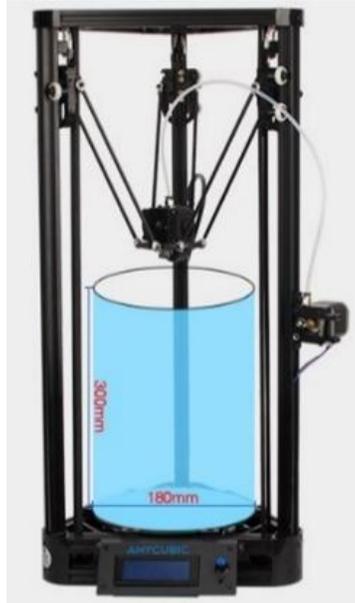


Figura 25 Kit de impresora 3D Anycubic

Fuente: (www.anycubic3d.com, 2016)



Figura 26 Escáner 3D de la marca XYZscan

Fuente: (www.xyzprinting.com, 2015)

1.13.2 Requerimientos de software y compatibilidad de equipos.

Para el funcionamiento correcto de los equipos adquiridos, se necesita la actualización del software de computación hasta Windows 8.1 o 10, cabe mencionar que por conflictos de seguridad el Windows 10 bloquea algunos de los programas que son craqueados y los cierra automáticamente.

En el caso del escáner XYZ necesita un controlador especial de profundidad de cámara F200, el cual no es compatible con algunas versiones de Windows por lo que hay que buscar actualizaciones.

En cuanto al kit de impresora 3D Anycubic es muy fácil el ensamble y configuración del software, permite imprimir lo que podamos imaginar claro con un limitante en las dimensiones de las piezas y con un acabado no muy preciso en cuanto a su textura en la parte de sujeción a la base con cama caliente.

The image shows a screenshot of the Windows System Information page. At the top, there is a teal header with the word "Sistema". Below it, a breadcrumb trail reads "Inicio > Sistema y seguridad > Sistema". A blue link "Ver información básica acerca del equipo" is visible. The page is divided into several sections by horizontal lines:

- Edición de Windows:** Windows 8.1 Pro, © 2013 Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.
- Sistema:**
 - Procesador: Intel(R) Core(TM) i5-7400 CPU @ 3.00GHz 3.00 GHz
 - Memoria instalada (RAM): 16,0 GB (15,9 GB utilizable)
 - Tipo de sistema: Sistema operativo de 64 bits, procesador x64
 - Lápiz y entrada táctil: La entrada táctil o manuscrita no está disponible para esta pantalla
- Configuración de nombre, dominio y grupo de trabajo del equipo:**
 - Nombre de equipo: INTEL
 - Nombre completo de equipo: INTEL
 - Descripción del equipo:
 - Grupo de trabajo: WORKGROUP
- Activación de Windows:** Windows está activado [Lea los Términos de licencia del software de Microsoft](#)
- Id. del producto: 00261-50000-00000-AA989

Figura 27 Características de computadora

El escáner 3D de XYZPrinting nos permite tres modos de escaneo: Cabeza, Objeto y Cuerpo. El volumen de escaneo máximo es de 100cm (Profundidad.) x 100cm (Ancho.) x 200cm (Altura.). Los objetos grandes también se pueden escanear en modo Cuerpo.

Para su correcta instalación y funcionamiento debemos considerar los requisitos de software y hardware de la siguiente tabla:

Versión de Windows		Especificaciones mínimas	
Especificaciones mínimas	<ul style="list-style-type: none"> •SO compatibles: Windows 8.1/10 (64 bits) •Procesador: Intel® Core™ i5 de la 4ª generación o posterior •4 GB de RAM básica (se recomienda 8 GB de RAM) 	Especificaciones mínimas	<ul style="list-style-type: none"> •SO compatibles: Mac OS X 10.10, 10.11, 10.12 •Procesador: Intel® Core™ i5 de la 4ª generación o posterior •4 GB de RAM básica (se recomienda 8 GB de RAM) •GPU: Intel HD Graphics 4000
Especificaciones recomendadas	<ul style="list-style-type: none"> •GPU: NVIDIA GeForce GTX 750 ti (sobremesa) •NVIDIA GeForce GTX 840m (portátil) •VRAM: 2 GB de VRAM 	Dispositivos compatibles	MacBook Pro (Early 2013), iMac (Early 2013) o más adelante

Figura 28 Características de software y hardware para escáner 3D

Fuente: (www.xyzprinting.com, 2015)

1.13.3 Selección del software 3d para modelado.

Dentro de los softwares de modelado en 3D CAD/CAM/CAE estudiados se pueden considerar Solidworks, Mathcad, Matlab, Rhinoceros, Ansys Mechanical, Siemens Nx. En las fotos 25, 26 y 27 se detallan algunos de sus logos.

Solidworks, Ansys Mechanical y Siemens Nx son softwares paramétricos, además del modelado permiten la simulación de esfuerzos, análisis de torsión, tracción, tensión y otras herramientas como fresado CNC.

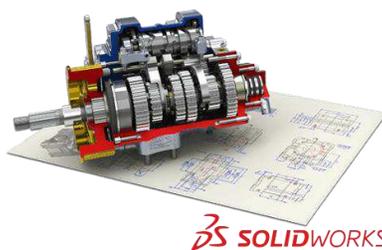


Figura 29 Logo software Solidworks.

Fuente: (www.solidworks.com/, 2017)



Figura 30 Logo software Rhinoceros.

Fuente: (www.rhino3d.com/es/, 2017)



Figura 31 Logo software Ansys Mechanical
Fuente: (www.ansys.com, 2017)

El software elegido para el modelado geométrico es Solidworks debido a que es un programa completo, con características de manejo CAD/CAE simples, modelado paramétrico, compatibilidad de archivos, simulaciones y facilidad para conseguir el software dentro del mercado nacional.

CAPITULO 2 - OBTENCIÓN DE IMÁGENES DE EXTREMIDAD MANUALMENTE Y MEDIANTE ESCANEO 3D, MODELADO DEL PRODUCTO (CAD), ANÁLISIS INGENIERIL – MECÁNICO (CAE) E IMPRESIÓN 3D.

2.1 Captura de la información geométrica y dimensional de un tobillo y pie manualmente

Se procedió a tomar las dimensiones en milímetros de diámetro, ancho y longitud de pantorrilla, tobillo y pie manualmente, como se observa en las fotos a continuación:

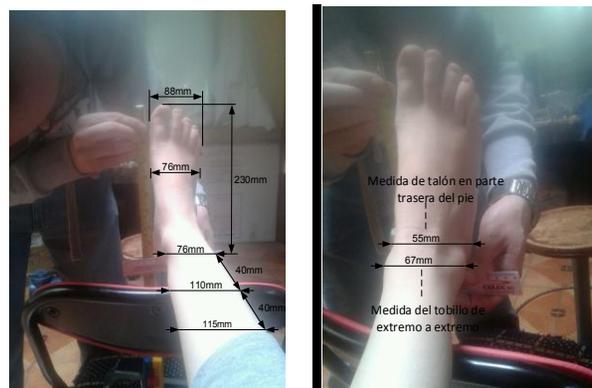


Figura 32 Dimensiones de tobillo y pie tomadas manualmente

2.2 Captura de la información geométrica y dimensional de un tobillo y pie mediante escáner 3D.

Para el uso del escáner 3D es importante seguir las instrucciones detalladamente, sobre todo en las distancias de escaneo y movimiento de los objetos. Las imágenes escaneadas y procesadas en el software se pueden grabar en formatos (*.obj, *.stl, *.ply).

Es necesaria la presencia de dos personas para el proceso de escaneo, la persona que controla el escáner y la que controla las distancias en la pantalla. La obtención de imágenes de extremidades del cuerpo, fue mediante la opción modo cuerpo, que tiene el software XYZ Handy Scan. A continuación, se describen las tres modalidades de escaneo 3D:

a) Modo Cabeza.

Esta opción permite capturar bustos como se aprecia, con claridad en la figura 32 y depende de la experiencia de la persona que manipula el escáner. También permite la captura de extremidades en menores distancias, pero con calidad media como se aprecia en la figura 33.

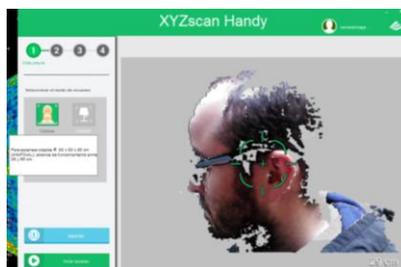


Figura 33 Busto obtenido en modo cabeza

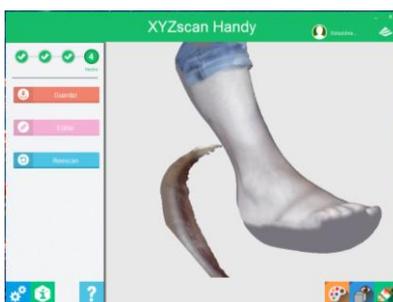


Figura 34 Extremidad obtenida en modo cabeza

En esta modalidad los bustos u objetos a ser escaneados deben tener dimensiones máximo de 40cm x 40cm x 25cm y la distancia del escáner hacia el objeto debe ser de 25cm a 50cm.

b) Modo objeto.

Esta opción permite escanear objetos de hasta 30cm de largo por 60cm ancho y 60cm de profundidad, la distancia del escáner hacia el objeto debe ser de 25cm a 50cm. La calidad de las imágenes es buena.

c) Modo Cuerpo.

Podemos obtener imágenes de las extremidades de 40cm de largo por 70cm de ancho y 70cm de profundidad. La distancia de escaneo máxima hacia el objeto es de 70cm permitiendo una calidad aceptable.



Figura 35 Escaneo en modalidad cuerpo

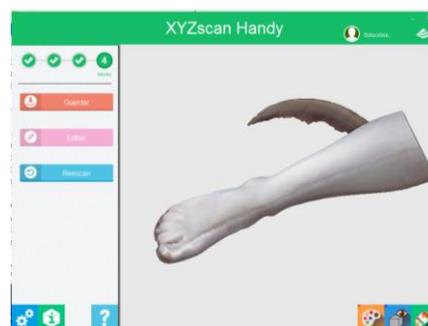


Figura 36 Imagen obtenida en modalidad cuerpo

Para la captura de imágenes consideramos una persona de sexo femenino con edad de 27 años, con peso de 63Kg y una estatura de 1.60m, con tendencia a inflamación de las articulaciones inferiores (tobillo y pie) debido a varices.

Hemos realizado seis tomas de imágenes con el escáner 3D de la extremidad inferior derecha, específicamente rodilla, tobillo y pie para poder tener un mejor criterio de selección de imágenes y aplicación de la geometría en el programa de diseño 3D.

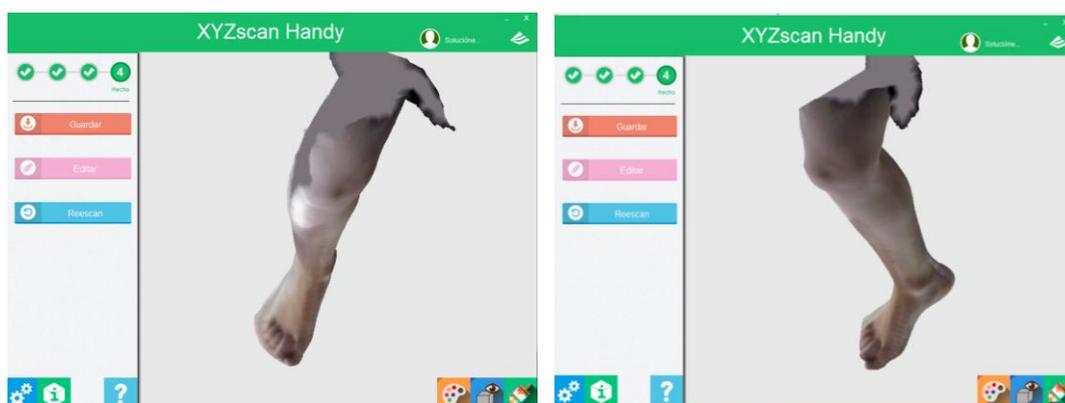


Figura 37 y 38 Imágenes frontales obtenidas de la extremidad derecha en modalidad de escaneo cuerpo

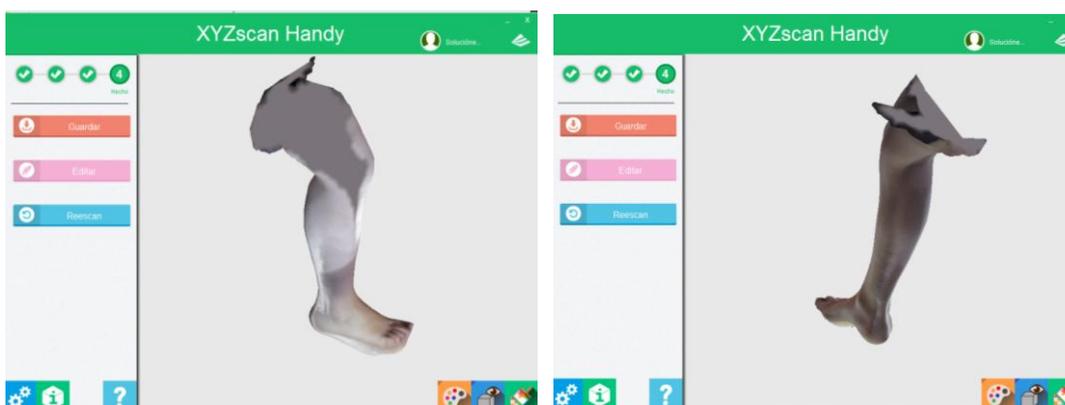


Figura 39 y 40 Imágenes superiores obtenidas de la extremidad derecha en modalidad de escaneo cuerpo

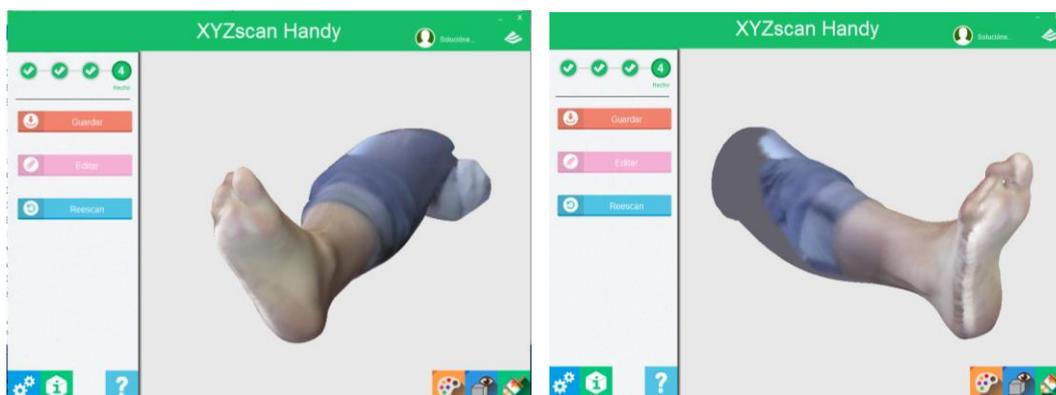


Figura 41 y 42 Imágenes laterales obtenidas de la extremidad derecha en modalidad de escaneo cuerpo

El software de escaneo no permite visualizar dimensiones de los objetos. Las imágenes obtenidas procedimos a grabar en formato (*.obj y *.stl) para tener una mejor compatibilidad de archivos como observamos a continuación.



Figura 43 Archivos de imagen escaneadas en formatos *.obj y *.stl

2.3 Desarrollo del modelo geométrico de una órtesis de tobillo y pie mediante herramientas CAD.

En el desarrollo del modelo geométrico partiendo de las imágenes obtenidas mediante el escáner 3D es importante considerar lo siguiente:

a) Anatomía.

El tobillo y pie lesionado puede influir de forma notable en las actividades del individuo afectado por ello debemos tener en cuenta los músculos dorsiflexores del tobillo.

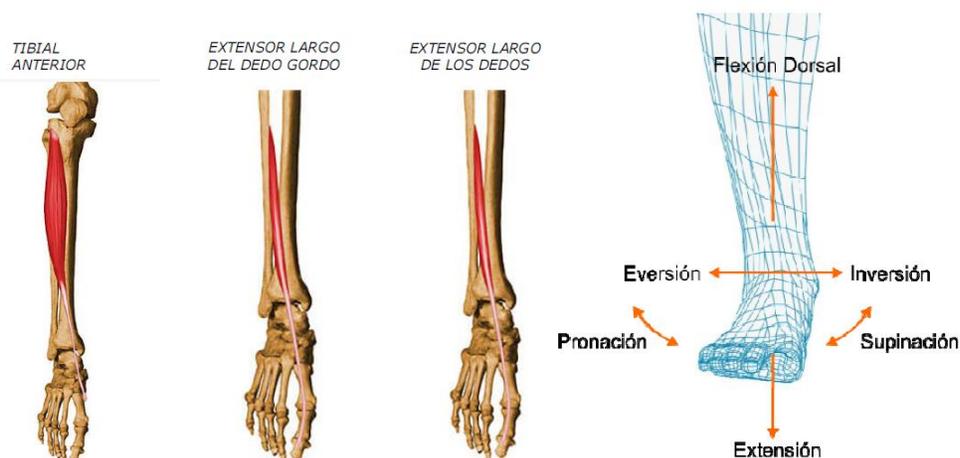


Figura 44 y 45 Músculos dorsiflexores del tobillo y Movimientos del tobillo

Fuente: (www.atletismoparacueros.blogspot.com, 2014)

La articulación de tobillo y pie es bipartida y compleja, capaz de moverse en cuatro direcciones: dorsiflexión, flexión plantar o extensión, eversión e inversión.¹⁰

b) Funcionamiento del tobillo y pie.

El ciclo de movimiento del tobillo y pie comienza cuando el pie contacta con el suelo y termina con el siguiente contacto con el suelo del mismo pie. Los dos mayores componentes del ciclo de la marcha son: la fase de apoyo o portante y la fase de balanceo u oscilante. Una pierna está en fase de apoyo cuando está en contacto con el suelo y está en fase de balanceo cuando no contacta con el suelo.

Hay cinco momentos que son útiles al subdividir la fase de apoyo:

- 1) **Contacto del talón.** - Se refiere al instante en que el talón de la pierna de referencia toca el suelo.
- 2) **Apoyo plantar.** - Se refiere al contacto de la parte anterior del pie con el suelo.
- 3) **Apoyo medio.** - Ocurre cuando el trocánter mayor está alineado verticalmente con el centro del pie, visto desde un plano sagital.
- 4) **Elevación del talón.** - Ocurre cuando el talón se eleva del suelo.
- 5) **Despegue del pie.** - Ocurre cuando los dedos se elevan del suelo.

¹⁰ Músculos dorsiflexores y movimientos de tobillo

La fase de apoyo puede también dividirse en intervalos con los términos de aceptación de:

- 1) **Peso.** - Empieza en el contacto del talón y termina con el apoyo plantar.
- 2) **Apoyo medio.** - Empieza con el apoyo plantar y termina con la elevación del talón al despegue del talón.
- 3) **El despegue.** - Se extiende desde la elevación de los dedos.

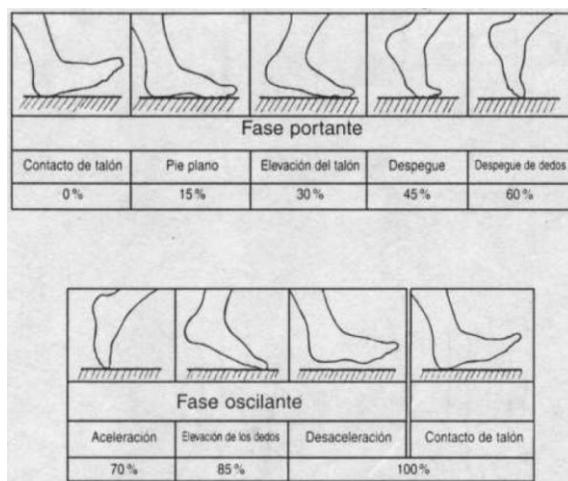


Figura 46 Fases de apoyo
Fuente: (Ching, 2014)

La fase de balanceo puede dividirse en tres intervalos designados con los términos de aceleración, balanceo medio y deceleración. Cada una de estas subdivisiones constituyen aproximadamente un tercio de la fase de balanceo.³¹

- 1) **El primer tercio.** - Referido como periodo de aceleración, se caracteriza por la rápida aceleración del extremo de la pierna inmediatamente después de que los dedos dejan el suelo.
- 2) **Durante el tercio medio.** - En el intervalo del balanceo medio, la pierna balanceada pasa a la otra pierna, moviéndose hacia delante de la misma, ya que está en fase de apoyo.
- 3) **El tercio final.** - Se caracteriza por la desaceleración de la pierna que se mueve rápidamente cuando se acerca al final del intervalo.

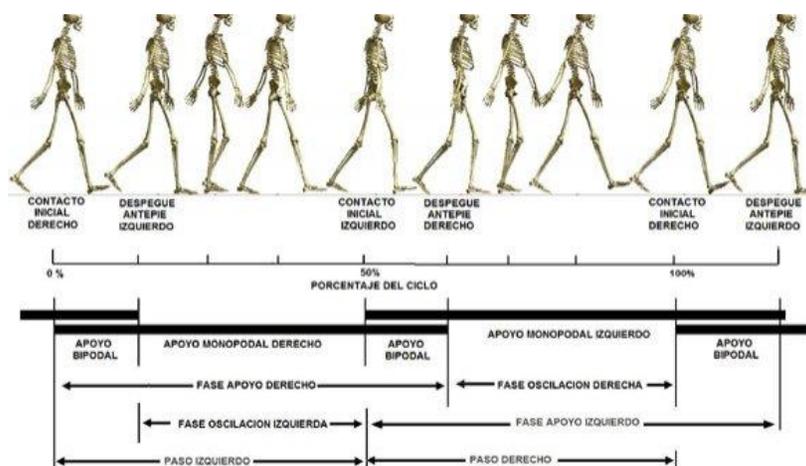


Figura 47 Ciclo de marcha, apoyo y balanceo

Fuente: (Pedro, 2015)

c) Biomecánica del tobillo y pie.

La biomecánica del pie y el tobillo es compleja, el pie es una parte mecánica integral de la extremidad inferior y es necesario para una marcha suave y estable. El tobillo transfiere la carga de la extremidad inferior al pie e influye íntimamente en la orientación del pie con el suelo.

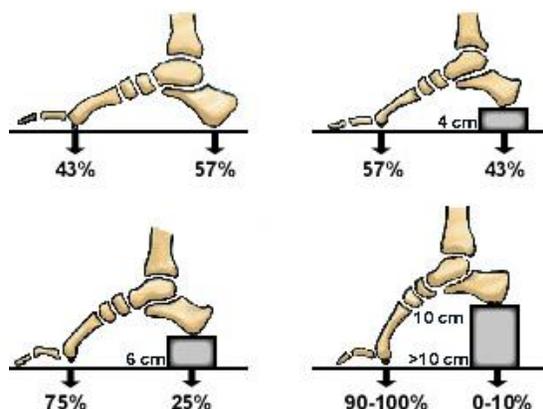


Figura 48 Estática del pie

Fuente: (www.proelitefitness.com, 2011)

2.3.1 Posible modelo y diseño de órtesis.

En la actualidad, los modelos de órtesis AFO rígidos y articulados son frecuentemente prescritos en niños y adolescentes con parálisis espástica.

Los órtesis AFO rígidas, son las más restrictivas en el movimiento de tobillo, ya que fija el tobillo normalmente a 90°, y limita tanto el movimiento en flexión plantar como la flexión dorsal. Este modelo ha sido considerado para mejorar la estabilidad durante la marcha, por lo evidenciado en la normalización de los parámetros de la marcha. La órtesis AFO articulado permite la flexión dorsal libre en la fase de apoyo y limita la flexión plantar en el nivel predeterminado (generalmente 90°). Este modelo ha sido considerado para normalizar el movimiento de tobillo durante la fase da apoyo y para facilitar la realización del desarrollo de las habilidades motrices.¹¹

a) Órtesis móvil (modelo AFO con articulación).

Son un desarrollo de la empresa Becker Orthopedic conjuntamente con el ingeniero norteamericano Carlson que consiste en unas piezas de uretano en las que en su interior llevan unos ejes especiales que permiten su flexión.



Figura 49 Órtesis AFO con articulación

Fuente: (www.entislaboratorio.com, 2018)

Sobre el molde de escayola (yeso) se coloca el maniquí que es utilizado en el proceso de fabricación cuando se requiere una articulación flexible. Se moldea el plástico encima del positivo, se extrae el vacío y se espera que enfríe. Cuando enfría el plástico se corta y se saca el maniquí introduciendo en su lugar la articulación.

Ventajas.

¹¹ Rehabilitación temprana

- Provee su propia alineación sin perder la elongación de la articulación. El núcleo de esta unidad retarda la elongación y mejora la resistencia.
- Su diseño inclinado provee fuerza para la asistencia al movimiento similar al que tradicionalmente proveen las articulaciones metálicas de tobillo con asistencia a la dorsiflexión.
- Maneja materiales resistentes y asépticos
- Es dinámica, puede manejarse articulada o fija a 90°

Desventajas.

- No tiene sistema de sujeción en la parte superior e inferior del tobillo, provocando desajuste con la extremidad.
- El proceso de elaboración requiere de materiales como un maniquí, escayola y herramientas de medición.
- Una vez solidificado el plástico no se pueden hacer variaciones a la geometría.
- La escayola puede provocar sudoración e irritación y no se usa con zapatos.

b) Órtesis de 90° rígida (modelo AFO sin articulación).

Las órtesis rígidas o anti equinas tipo (Rancho de los amigos) son dinámicas y están fabricadas en termoplástico rígido (polipropileno o polietileno), a modo de un solo cuerpo, que cubre la zona dorsal de la pantorrilla (desde debajo del peroné), salva maléolos y llega hasta la planta del pie (cubriéndola total o parcialmente), con lo que mantiene la flexión del tobillo a 90°.



Figura 50 Órtesis AFO con rígida de 90°

Fuente: (www.protesica.com.co, 2015)

En esta órtesis se diferencian tres partes, la pieza de plástico moldeado, generalmente polipropileno, por poseer mayor capacidad de recuperación, la forma la estructura principal y el cierre de tipo velcro-astracán.

Ventajas.

- Se trata de una órtesis dinámica, que aplica fuerzas externas sobre el segmento del pie y pierna, con lo que estabiliza las articulaciones del tobillo y del pie.
- Se utilizan materiales suaves en la parte interior, que brindan comodidad y confort.
- Es liviana y segura, puede tener de dos a tres sistemas de cierre garantizando la sujeción del pie.
- Actúan tres fuerzas que generan un momento corrector, que se opone a la caída del pie.

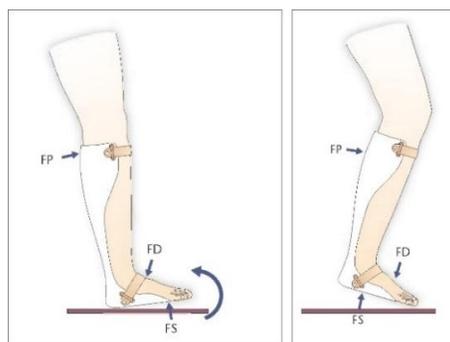


Figura 51 Estática del pie

Fuente: (www.protesica.com.co, 2015)

Desventajas.

- No permite articulación de tobillo, por lo que sí es un tratamiento largo solo se debe usar durante la primera fase de incapacidad.
- No puede ser usada con zapato.
- Una vez dada la forma, no se pueden hacer modificaciones geométricas.
- No puede ser usada en otros pacientes a menos que tengan las mismas dimensiones, lo que es poco probable.

De la órtesis descritas anteriormente se analizó la estructura, material, apariencia, seguridad, función y se compara en una tabla con puntuación del 1 al 5.

Tabla 1

Rango de calificación

PUNTUACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	MALO
2	REGULAR
3	BUENO
4	MUY BUENO

Tabla 2

Puntuación de acuerdo a características de cada modelo

<u>Modelo</u>	Estructura resistente	Material ligero	Apariencia	Seguridad al momento de apoyar el pie	Función proteger tobillo y pie	TOTAL PUNTUACIÓN
Órtesis móvil (Modelo AFO)	3	5	3	4	4	3.8 / 5
Órtesis de 90° rígida (modelo AFO)	4	5	3	5	5	4.4 / 5

Para el desarrollo del diseño de órtesis nos basamos en la necesidad anatómica, estética del paciente y considerando que la órtesis rígida obtuvo mejor puntuación.

2.3.2 Apertura de Archivos Escaneados en formato de Compatibilidad para Diseño y posterior Análisis Mecánico en Solidworks 2017

Para el proceso de imágenes y modelado geométrico de lo que hemos escaneado esto debemos seguir los siguientes pasos:

a) Apertura de archivos con la opción Scanto3d.

Solidworks posee una herramienta que no está a simple vista, la cual me permite modelar geometrías y modificarlas estructuralmente a partir de imágenes escaneadas considerando las unidades o permitiendo cambiarlas, dicha herramienta se llama Scanto3d la cual hay que activarla en los complementos del software como se aprecia en la figura 51. Para abrir el archivo se seleccionó el formato “Archivos de Malla” (*.3ds, *.obj, *.stl, *.wrl, *.ply, *.ply2). Obteniendo la malla como se aprecia en la figura 52.

La visualización de la imagen en malla se aprecia en la figura 53.

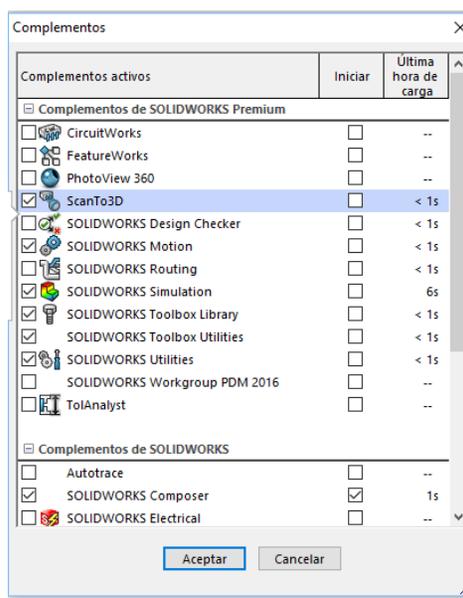


Figura 52 Complemento Scanto3d.

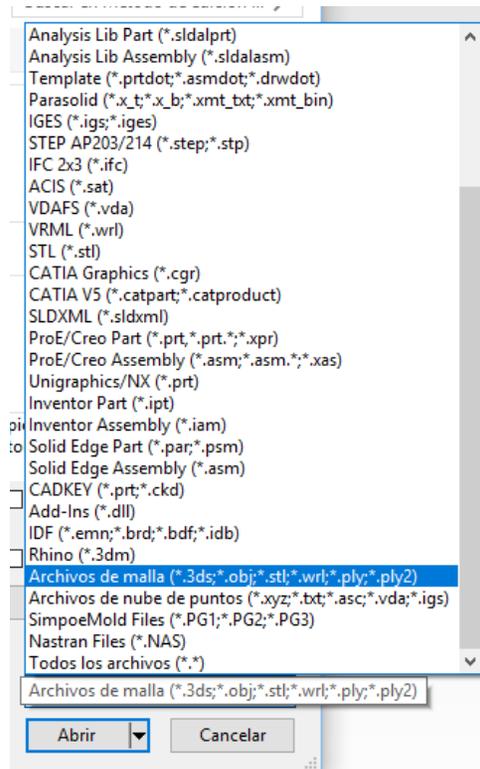


Figura 53 Apertura de archivos para malla

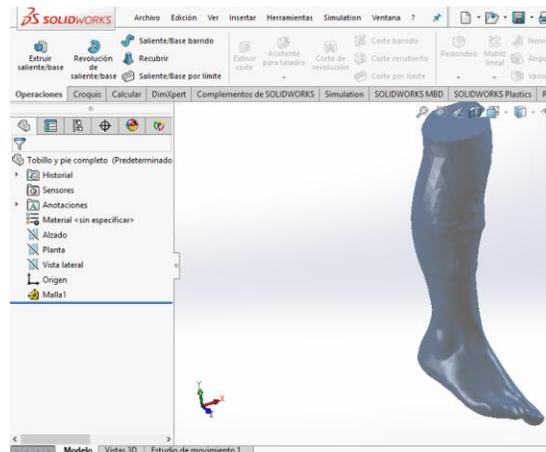


Figura 54 Visualización de modelo en malla

b) Apertura de asistente de preparación de malla.

Para configurar malla seguimos los siguientes pasos:

- 1. Asistente para creación de malla.** Es necesario abrirlo, este nos permitirá definir la cantidad de la nube de puntos en el interior de la imagen escaneada como se aprecia en la figura 54. Por defecto de cálculo nos asigna automáticamente la cantidad de caras como se detalla en la figura 55.

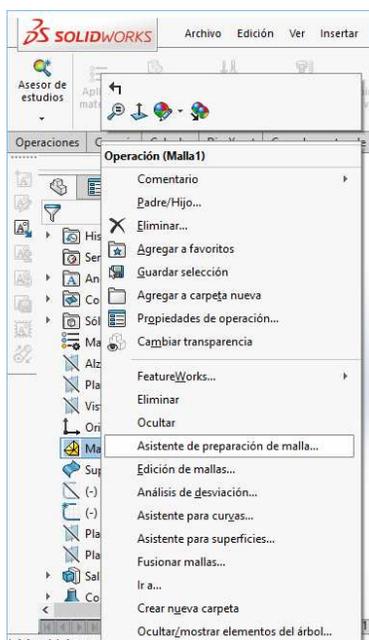


Figura 55 Asistente para preparación de malla

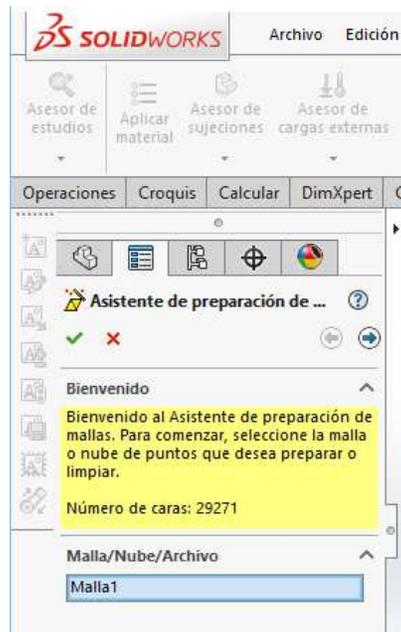


Figura 56 Configuración de parámetros en asistente de malla

2. Orientación de la malla. Se debe seleccionar la opción ninguna para que el programa ajuste la orientación de la malla por defecto como apreciamos en la figura 56.

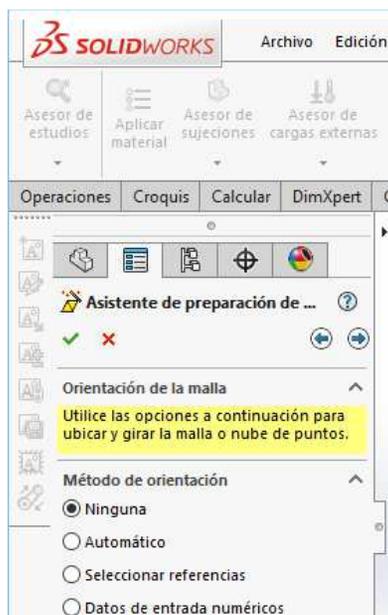


Figura 57 Configuración de orientación en asistente para preparación de malla

3. Remoción de datos extraños. Permite eliminar geometrías extrañas que no desean ser malladas, en este caso la imagen no tenía geometrías raras como se observa en la figura 57, por lo que se continuó al siguiente paso.

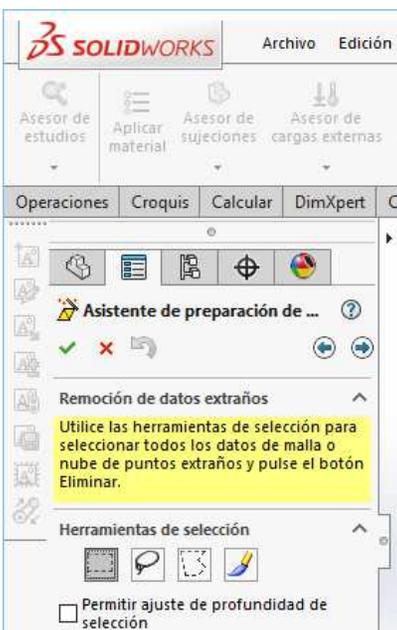


Figura 58 Remoción de geometrías extrañas en asistente para preparación de malla

4. Simplificación de nube de puntos. Inicialmente la nube tiene una cantidad de puntos de 29271 que es el 100%, se le redujo al porcentaje al 75% lo que nos da una cantidad de 7317 puntos, como se aprecia en la figura 58. En este caso es aconsejable reducir la mayor cantidad de puntos posible ya que hará que el computador ocupe menos recursos.

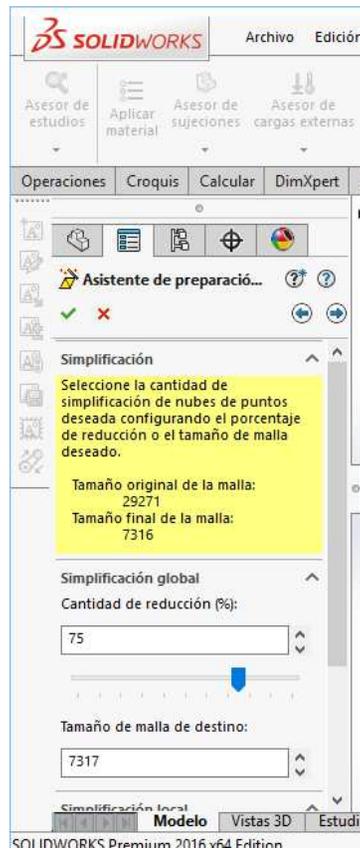


Figura 59 Simplificación de nube de puntos en asistente para preparación de malla

5. Suavizado. Al utilizar esta herramienta se inspecciono visualmente la malla para corregir ciertas deformaciones internas, en este caso la geometría tiene pequeñas anomalías por lo que se ajustamos el suavizado a la mitad como se puede observar en la figura 59.

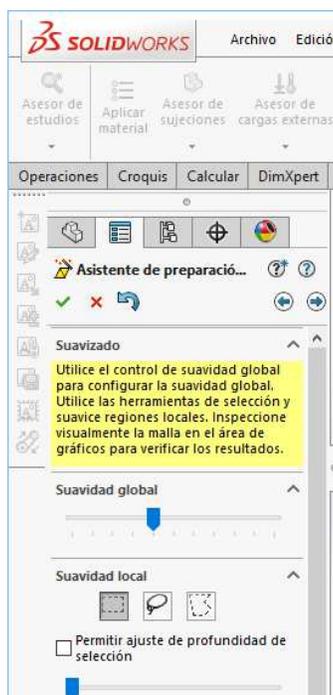


Figura 60 Suavizado global en asistente para preparación de malla

- 6. Llenar taladros.** Esta opción reconoce automáticamente los agujeros grandes, en el caso de la malla obtenida reconoció dos y los procede a rellenar como se aprecia en la figura 60.

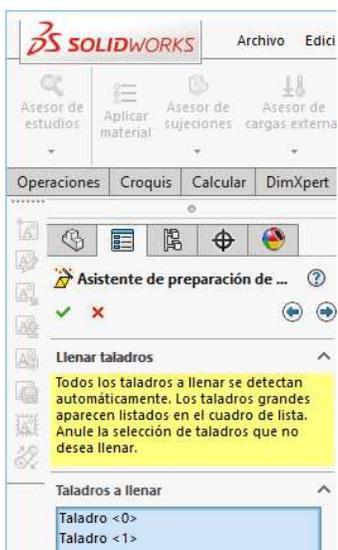


Figura 61 Relleno de taladros

7. **Fin de la creación de malla.** Una vez configurada toda la malla, damos por finalizado el procedimiento de preparación de malla como se aprecia en las figuras 61 y 62.

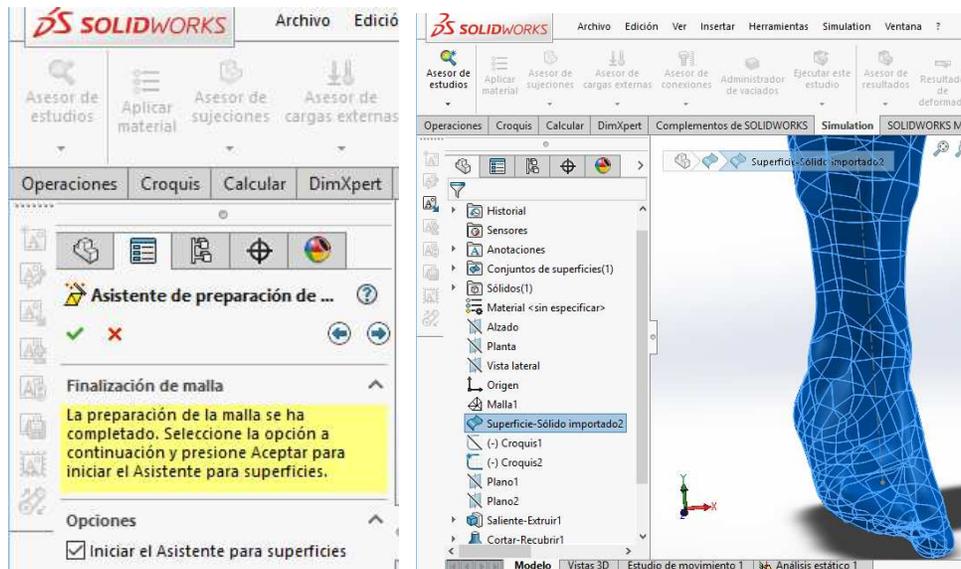


Figura 62 y 63 Finalizado de asistente para preparación de malla y visualización

c) **Apertura de Asistente para curvas.**

Para crear planos en los que se pueda generar los croquis alrededor de la geometría escaneada, nos dirigimos al asistente de curvas, y configuramos los parámetros iniciales teniendo en cuenta la vista planta por método de creación de la sección.

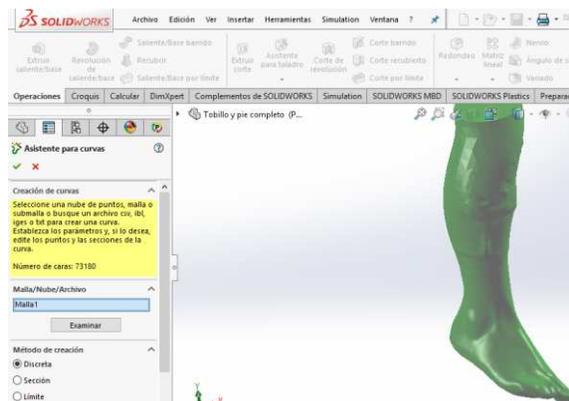


Figura 64 Configuración de parámetro “sección”, en asistente para curvas

Se consideró la distancia entre planos de 20 mm, el punto de inicio en el centro del plano planta, el número de planos a crear es 10 y el cierre de curvaturas lo configuramos en el valor más ajustado.

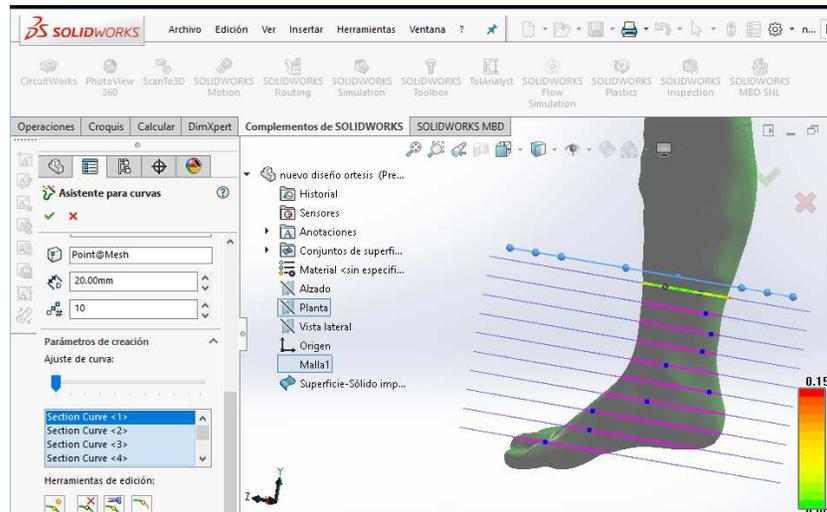


Figura 65 Configuración de número de planos y ajuste del cierre de curvatura

Dentro del asistente para curvas debemos tomar en cuenta los siguientes aspectos:

a. Geometría de Referencia 1.

En la opción geometría de referencia se procedió a crear diez planos paralelos al plano de planta, a una distancia de 20mm c/u.

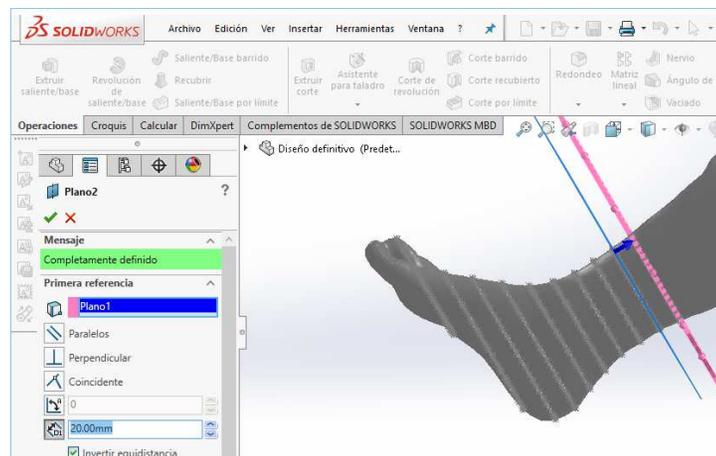


Figura 66 Creación de planos paralelos a líneas de croquis para equidistancia

b. Equidistancia.

En cada plano se aplicamos equidistancia a las curvas ajustadas a una distancia de 6mm, debido a que este espesor nos permitirá colocar gasa dentro de la órtesis en caso de necesitarla y a su vez nos facilitó realizar un corte recubierto en la geometría.

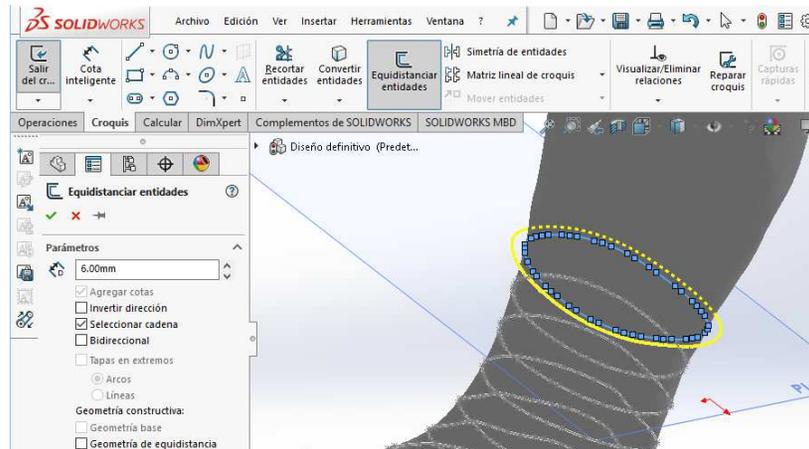


Figura 67 Creación de equidistancias a 6mm

c. Geometría de Referencia 2.

Para dar una forma de tobillo y pie es necesario crear una geometría en forma de bota. Pero para esto se creamos una geometría de referencia, en la que creó un plano paralelo al pie aplicando una rotación de 20° con respecto al plano o vista lateral.



Figura 68 Creación de plano rotado 20° con referencia del plano lateral

d. Croquisado de bota.

Con el plano paralelo ya creado y considerando las dimensiones máximas que la impresora 3D permite, croquisamos una bota, mediante puntos en intersección con la malla del pie desplazados a 40mm, dos líneas rectas verticales, la una separada a 8mm del talón y dos líneas horizontales entre las distancias de las curvas ajustadas. Para dar la forma definitiva se aplicamos la herramienta Spline, la cual permite unir los puntos distanciados y procedimos a utilizar la herramienta corté de entidades.

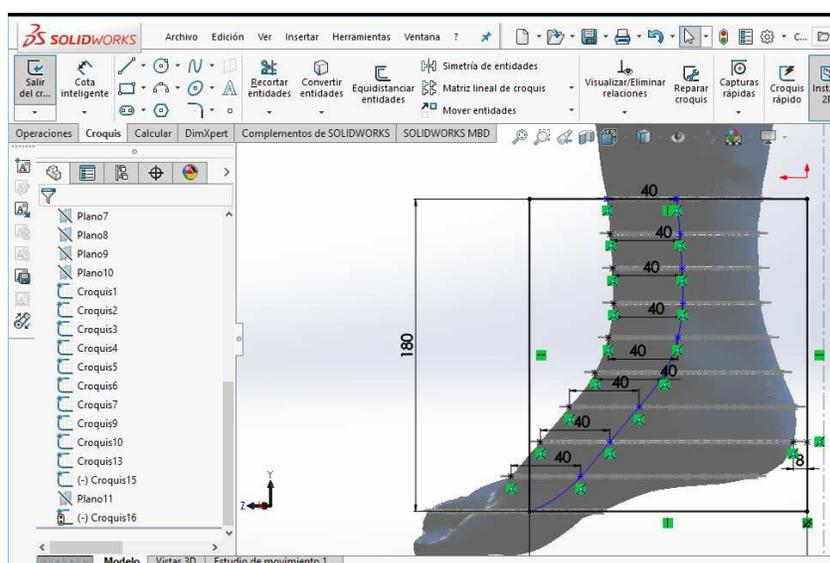


Figura 69 Croquisado de estructura con forma de bota

Finalmente obtuvimos la geometría una bota sin agujeros interiores, aplicando la extrucción del croquis realizado anteriormente.

e. Herramienta Corte Recubierto.

Se aplicó la herramienta de corte recubierto en las líneas equidistanciadas a 6mm de las curvas ajustadas obteniendo un hueco con la forma del tobillo y pie como se aprecia en las figuras 69 y 70.

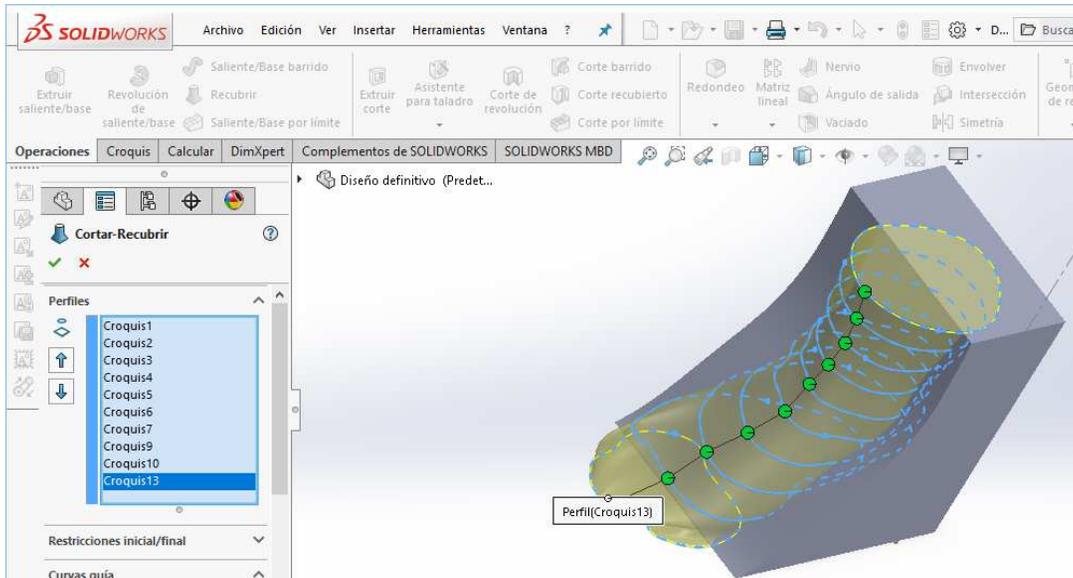


Figura 70 Corte de tobillo y pie con la herramienta Corte-Extruir

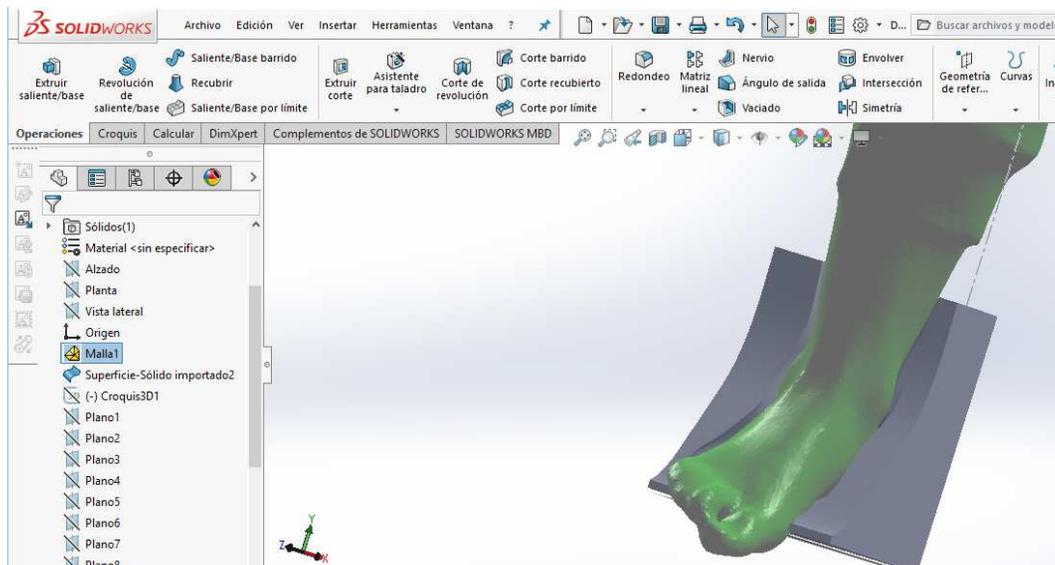


Figura 71 Visualización de corte de tobillo y pie con malla

f. Croquisado y corte para redondeo.

En la geometría obtenida dibujamos una semicircunferencia de 15mm de diámetro a 20mm de distancia desde la punta y aplicamos la opción de extruir corte para obtener una superficie de la punta redondeada y remoción de geometría no deseada.

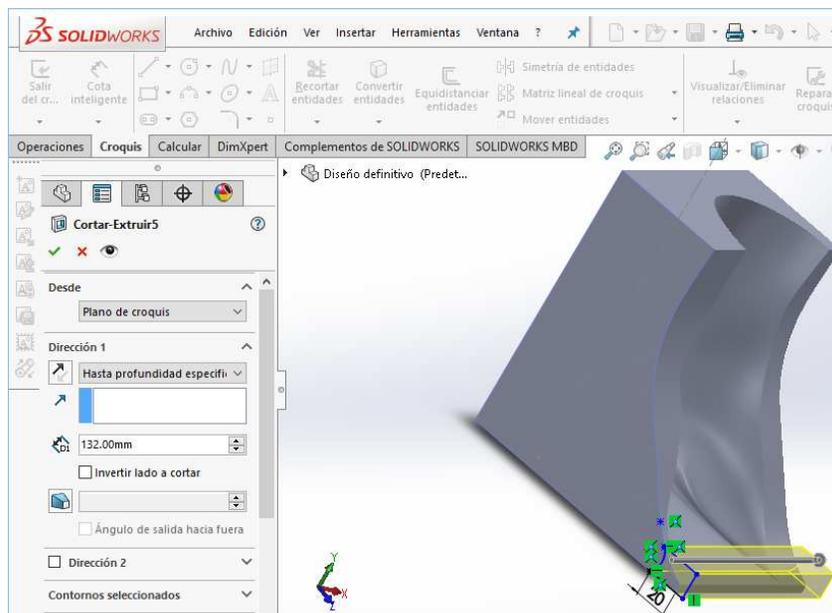


Figura 72 Cortes para redondeos de geometría

g. Croquisado y corte de agujeros.

Realizamos un croquis de agujeros de 11mm de diámetro, a los que se aplicó la herramienta de matriz lineal en las cuatro caras de la geometría y procedimos a utilizar la opción extruir corte, estos agujeros son importantes para evitar el sudor.

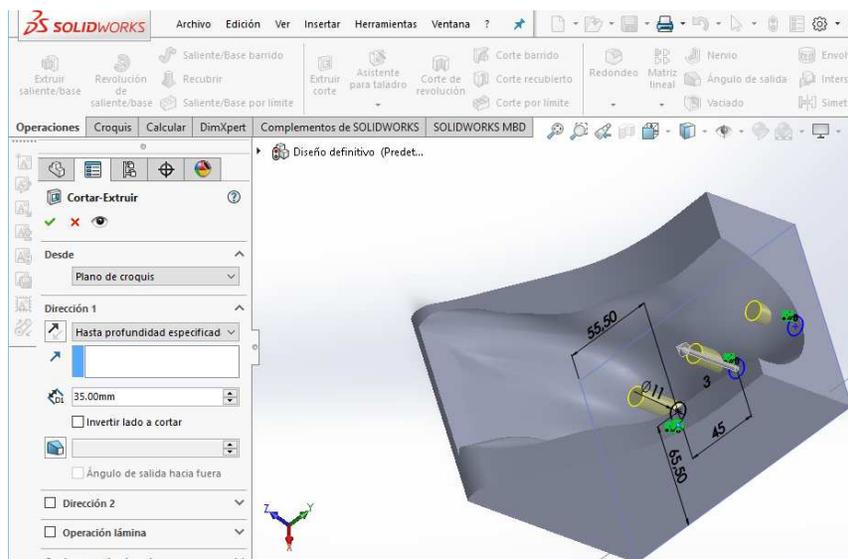


Figura 73 Croquisado y cortes de agujeros en geometría

h. Redondeos de Geometría.

Utilizando la herramienta de redondeos con diámetros que van desde 1mm hasta los 40mm, las aristas complejas se redondearon para mejorar la apariencia.

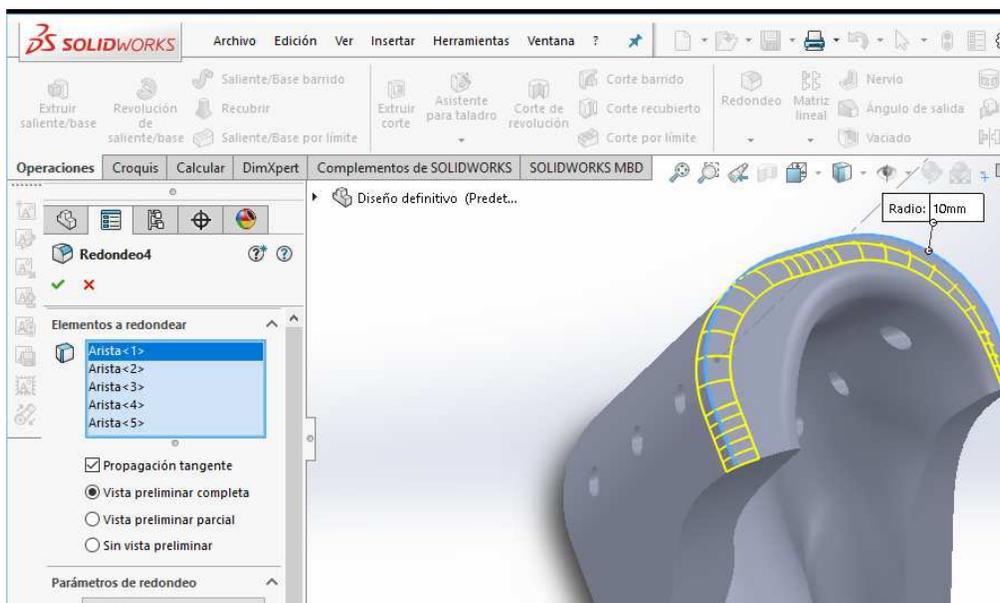


Figura 74 Aplicación de la herramienta redondeo con diámetros de 10mm en geometría

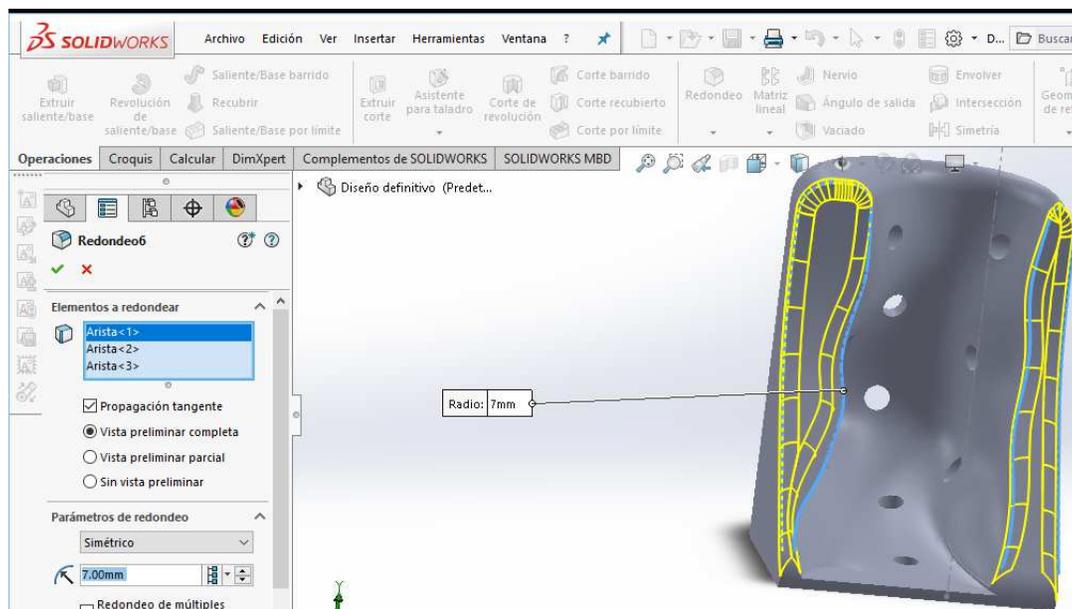


Figura 75 Aplicación de la herramienta redondeo con diámetro de 7mm en geometría

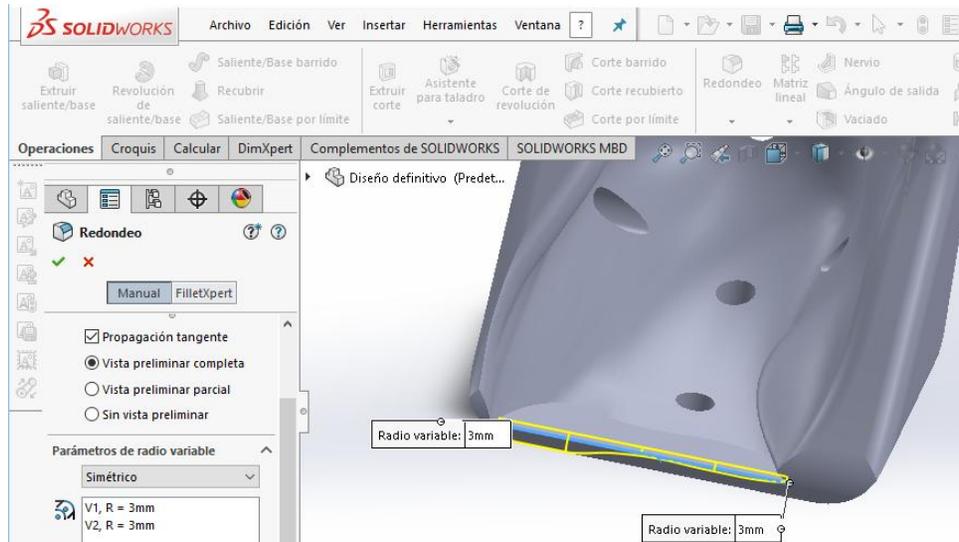


Figura 76 Aplicación de la herramienta redondeo con diámetro de 3mm en geometría

i. Croquisado y corte de agujeros para Velcro.

Croquisamos dos agujeros rectangulares de 20 mm x 2.5 mm a una distancia de los bordes de 5mm en la parte superior e inferior de la órtesis, aplicando la herramienta matriz lineal en ambas caras laterales y usamos la herramienta extruir corte. Estos agujeros son necesarios para poder colocar las cintas velcro.

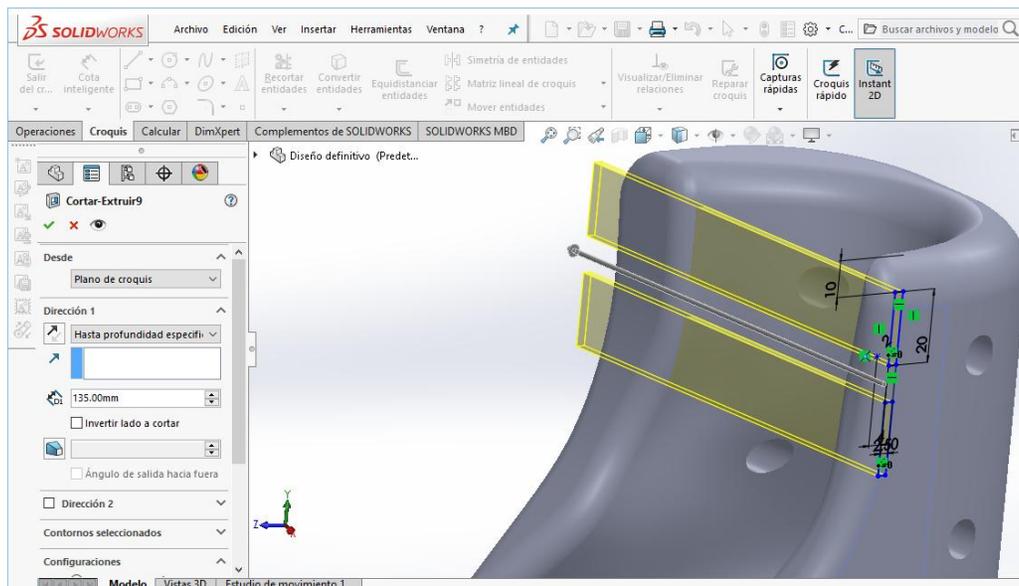


Figura 77 Croquisado y corte de agujeros para soporte de velcro en geometría

Para dar facilidad de penetración a la cinta velcro y proporcionar una mejor estética de la órtesis, realizamos un redondeo de las aristas horizontales de los agujeros rectangulares.

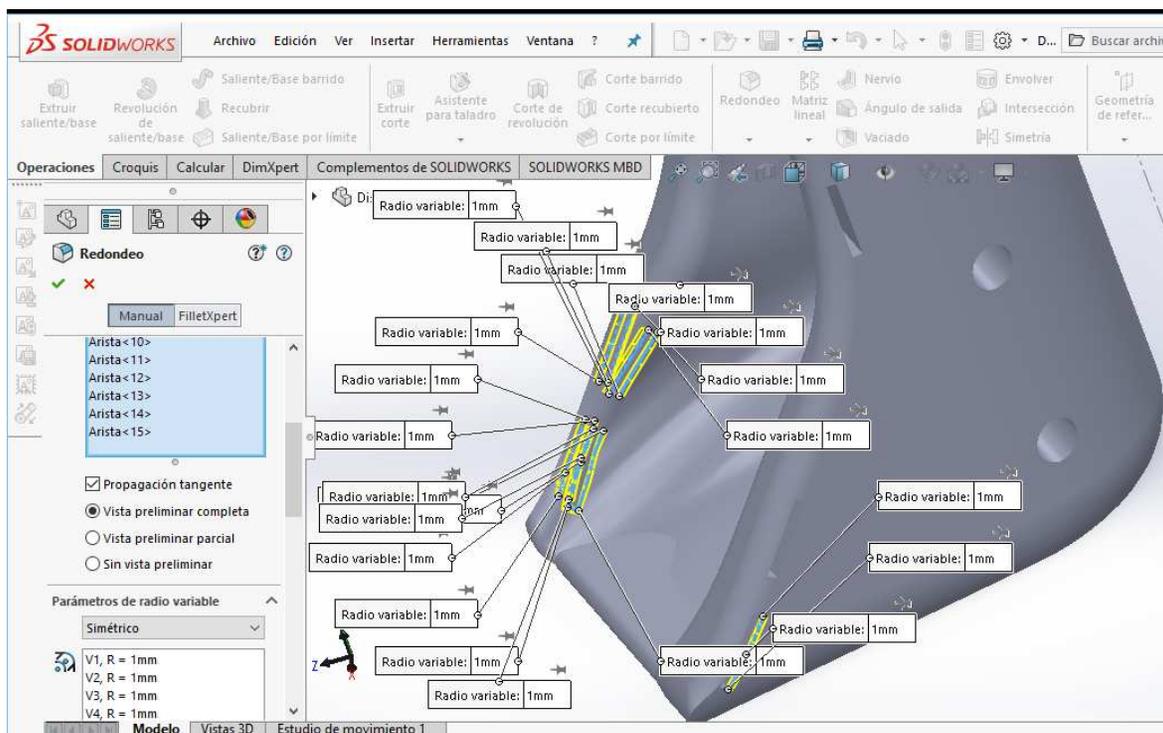
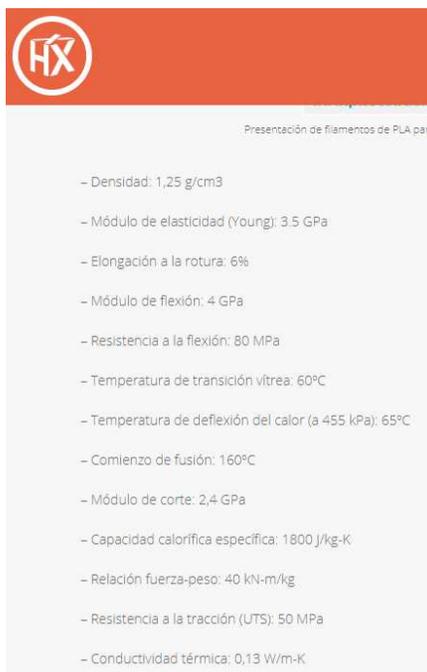


Figura 78 Redondeo de 2mm de agujeros para soporte de velcro en geometría

2.3.3 Creación de material plástico PLA en Solidworks 2017.

El plástico PLA no viene cargado por defecto en la librería de Solidworks 2017, por lo tanto, es necesario revisar las características mecánicas del plástico PLA; las cuales se pueden encontrar en internet desde el foro de Solidworks o páginas recomendadas.



Presentación de filamentos de PLA para

- Densidad: 1,25 g/cm³
- Módulo de elasticidad (Young): 3.5 GPa
- Elongación a la rotura: 6%
- Módulo de flexión: 4 GPa
- Resistencia a la flexión: 80 MPa
- Temperatura de transición vítrea: 60°C
- Temperatura de deflexión del calor (a 455 kPa): 65°C
- Comienzo de fusión: 160°C
- Módulo de corte: 2,4 GPa
- Capacidad calorífica específica: 1800 J/kg-K
- Relación fuerza-peso: 40 kN-m/kg
- Resistencia a la tracción (UTS): 50 MPa
- Conductividad térmica: 0,13 W/m-K

Figura 79 Características mecánicas del plástico PLA

Fuente: (www.hxx.es, 2015)

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.24 - 1.26 g/cc	0.0448 - 0.0455 lb/in ³	ISO 1183
Water Vapor Transmission	98.0 g/m ² /day	6.31 g/100 in ² /day	ASTM F1249
Oxygen Transmission Rate	860 cc/m ² /day	55.4 cc/100 in ² /day	dry; ASTM D3985
Melt Flow 	<= 2.5 g/10 min @Load 2.16 kg, Temperature 190 °C	<= 2.5 g/10 min @Load 4.76 lb, Temperature 374 °F	ISO 1133
	2.4 - 5.2 g/10 min @Load 5.00 kg, Temperature 190 °C	2.4 - 5.2 g/10 min @Load 11.0 lb, Temperature 374 °F	ISO 1133
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Shore D	59	59	ISO 868
Tensile Strength	27.0 - 35.0 MPa	3920 - 5080 psi	ISO 527
Tensile Strength, Ultimate	27.0 - 35.0 MPa	3920 - 5080 psi	ISO 527
Elongation at Break	250 - 320 %	250 - 320 %	ISO 527
Tensile Modulus	0.520 - 0.750 GPa	75.4 - 109 ksi	ISO 527
Dart Drop Total Energy	380 J/cm	0.712 ft-lb/mil	DIN 53373
Thermal Properties	Metric	English	Comments
Melting Point	110 - 120 °C	230 - 248 °F	DSC
	140 - 155 °C	284 - 311 °F	DSC
Vicat Softening Point	68.0 °C	154 °F	A/50; ISO 306
Optical Properties	Metric	English	Comments
Haze	85 %	85 %	ASTM D1003

Figura 80 Características mecánicas del plástico PLA según foro de Solidworks

Fuente: (www.my.solidworks.com, 2018)

Ingreso de material a analizar.

Dentro del archivo en el software nos desplazamos a la parte izquierda del menú y seleccionamos la opción material sin especificar, donde se desplegará una lista de materiales que viene por defecto en el software, en esta opción creamos un nuevo material con las características mecánicas necesarias tomadas de las figuras 80.

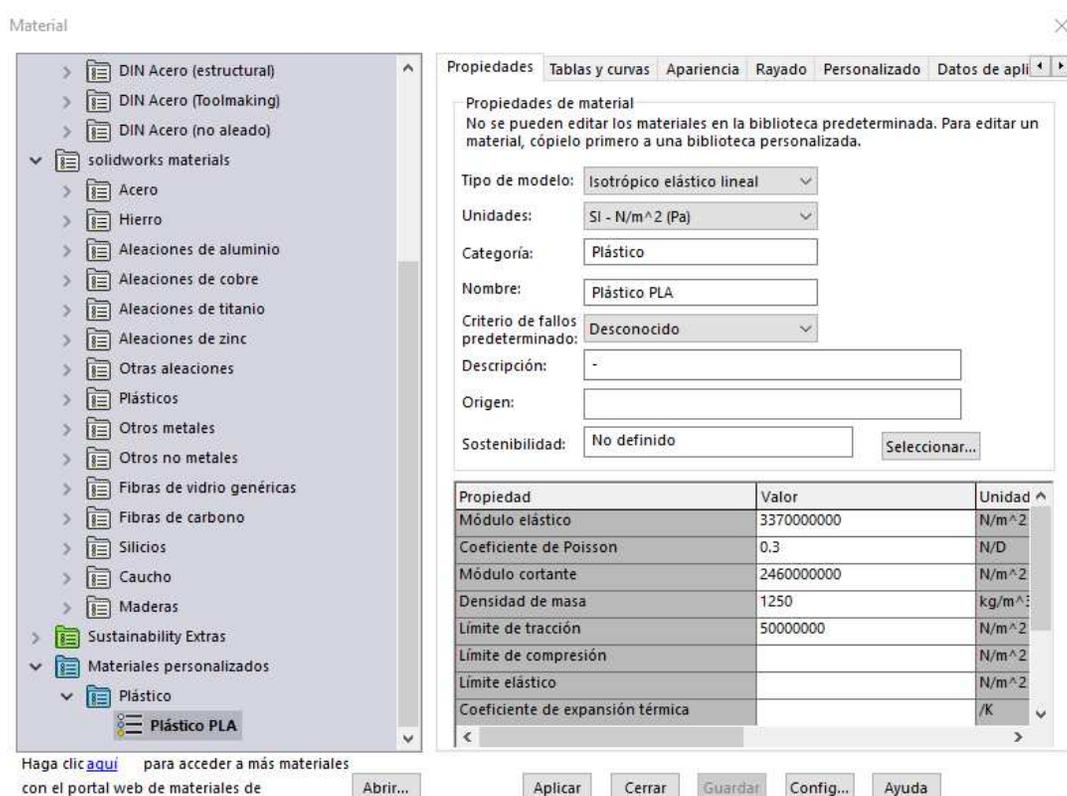


Figura 81 Creación de nuevo material plástico PLA en Solidworks

2.3.4 Análisis mecánico utilizando el complemento Solidworks Simulación.

Para el análisis ingenieril (CAE), tenemos el Solidworks y también el software Ansys Mechanical. El diseño lo realizamos en Solidworks por lo tanto aplicamos la simulación estática en el mismo.

La órtesis diseñada es estática, según la biomecánica analizada anteriormente, planteamos que la única fuerza que se ejerce sobre la órtesis es la que el cuerpo realiza en forma vertical basándonos en su peso.

Para ello tenemos el siguiente diagrama de cuerpo libre:

Altura = 1.60m Masa o peso de la persona = 63.21 Kg

Gravedad = 9.81 m/s²

$$Fy = m * g \quad Fy = 63.21Kg * 9.81m/s^2 \quad Fy = 620N$$

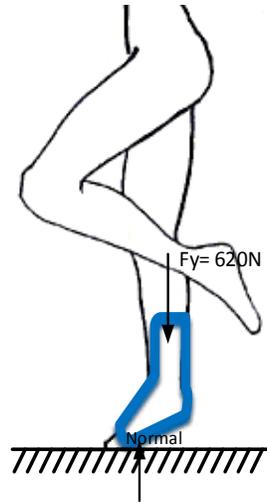


Figura 82 Diagrama de cuerpo libre con fuerza de 620N

$$\sum Fx = 0$$

$$\sum Fy = 0 \quad -Fy + Normal = 0$$

$$-618.03 + Normal = 0 \quad N = 618.03N$$

Es importante diseñar el material para que soporte pesos más grandes con lo cual tendremos un factor de seguridad bueno y la garantía de que la órtesis no se romperá. En la figura 82 podemos ver valores de masa corporal.

PESO IDEAL

Peso ideal para hombre				Peso ideal para Mujer			
Altura	Bajo	Medio	Alto	Altura	Bajo	Medio	Alto
1.52 mts	58 kgs	61 kgs	65 kgs	1.42 mts	35 kgs	38 kgs	41 kgs
1.55 mts	60 kgs	63 kgs	66 kgs	1.45 mts	37 kgs	40 kgs	43 kgs
1.57 mts	61 kgs	64 kgs	67 kgs	1.47 mts	39 kgs	42 kgs	44 kgs
1.60 mts	63 kgs	65 kgs	69 kgs	1.50 mts	41 kgs	43 kgs	46 kgs
1.63 mts	64 kgs	67 kgs	70 kgs	1.52 mts	43 kgs	45 kgs	48 kgs
1.65 mts	65 kgs	68 kgs	72 kgs	1.55 mts	44 kgs	47 kgs	50 kgs
1.68 mts	67 kgs	69 kgs	73 kgs	1.57 mts	46 kgs	49 kgs	52 kgs
1.70 mts	68 kgs	71 kgs	74 kgs	1.60 mts	48 kgs	51 kgs	53 kgs
1.73 mts	69 kgs	72 kgs	76 kgs	1.63 mts	50 kgs	53 kgs	55 kgs
1.75 mts	71 kgs	73 kgs	77 kgs	1.65 mts	52 kgs	54 kgs	57 kgs
1.78 mts	72 kgs	75 kgs	78 kgs	1.68 mts	53 kgs	56 kgs	59 kgs
1.80 mts	73 kgs	76 kgs	80 kgs	1.70 mts	55 kgs	58 kgs	61 kgs
1.83 mts	74 kgs	77 kgs	81 kgs	1.73 mts	57 kgs	60 kgs	63 kgs
1.85 mts	76 kgs	79 kgs	82 kgs	1.75 mts	59 kgs	62 kgs	64 kgs

Figura 83 Características de peso y estatura en personas

Fuente: (www.hospitalmetropolitano.org, 2016)

Por lo que podemos considerar a una mujer de 1.85m de altura que tiene un peso promedio de 79kg.

Altura = 1.85m Masa o peso de la persona = 79 Kg

Gravedad = 9.81 m/s²

$$F_y = m * g$$

$$F_y = 79Kg * 9.81m/s^2$$

$$F_y = 774.99N$$

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_y = 0 \quad -F_y + Normal = 0$$

$$-774.99 + Normal = 0 \quad N = 774.99N$$

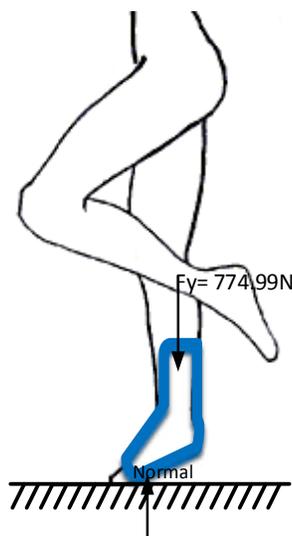


Figura 84 Diagrama de cuerpo libre con fuerza de 774.99N

Para la simulación en Solidworks es necesario activar los complementos de análisis mecánico. Para ello nos desplazamos a la herramienta complementos, en la cual activamos la simulación.

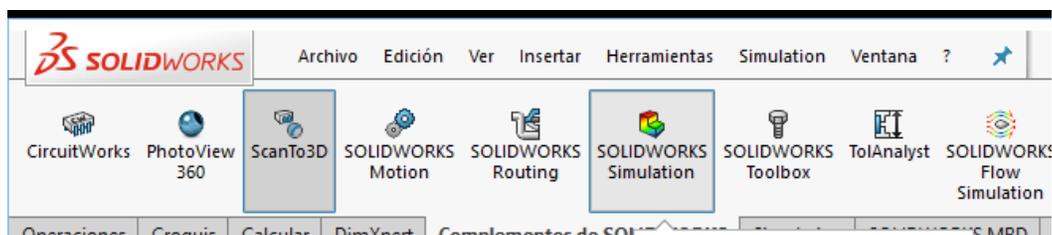


Figura 85 Activación de complemento para simulación

Una vez activado el complemento seguimos los siguientes pasos para el análisis mecánico con ambos plásticos y las dos cargas:

a) Selección del tipo de estudio mecánico.

En el tipo de estudio mecánico se tiene siete opciones, para el análisis de la órtesis, seleccionamos la opción estático, como se aprecia en la figura 85.

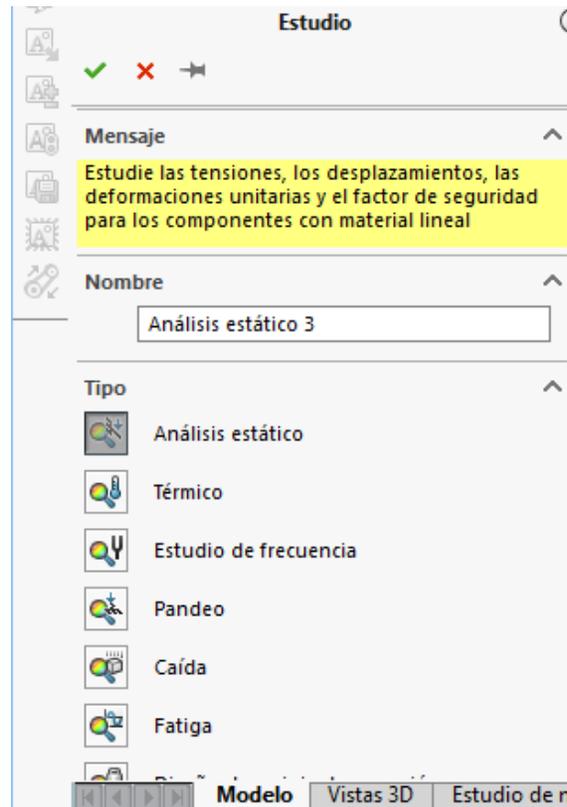


Figura 86 Inicio de nuevo estudio para simulación

b) Aplicación de material para elemento.

En el menú de simulación configuramos el material con el que deseamos hacer la simulación, para asignar el material nos desplazamos al icono llamado diseño, en la parte izquierda del panel, damos clic derecho en la opción aplicar el material a todos los sólidos y obtenemos un cuadro en el cual se visualizan las librerías de todos los materiales existentes cargados con sus propiedades mecánicas, visuales y personalizadas.

Nos desplazamos a la sección de plásticos y observamos que el plástico PLA que fue creado anteriormente ya se visualiza, mientras que el plástico ABS si está en la librería.

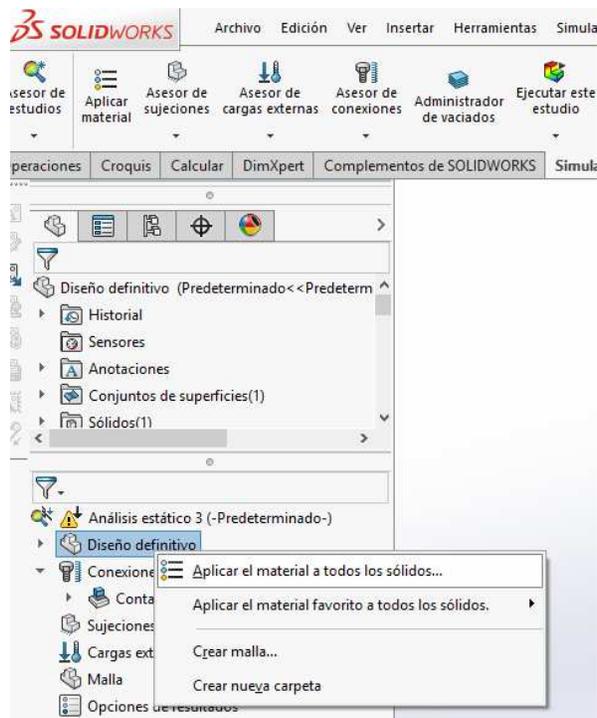


Figura 87 Aplicación de material para simulación mecánica

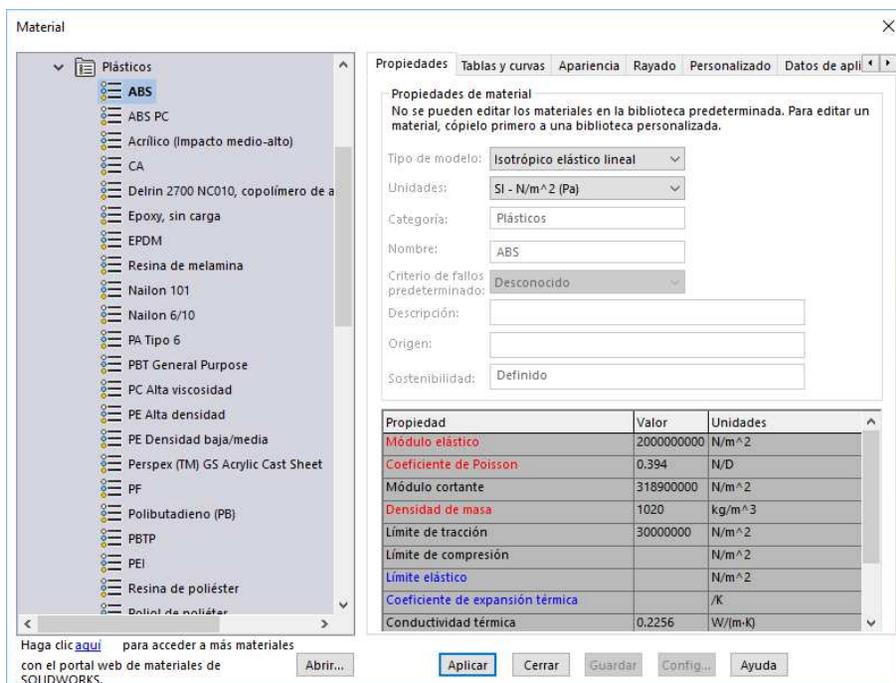


Figura 88 Características mecánicas del plástico PLA en librería de Solidworks 2017

Las unidades de ambos materiales están en el sistema internacional, siendo los datos más importantes para la simulación de los plásticos el módulo elástico en (N/m^2), coeficiente de Poisson en (N/D) y módulo de corte también en (N/m^2).

c) Sujeciones para el elemento.

En el menú de simulación podemos configurar el tipo y número de sujeciones, para el caso de la órtesis se seleccionó la base plana que es la que soportará el peso del cuerpo.

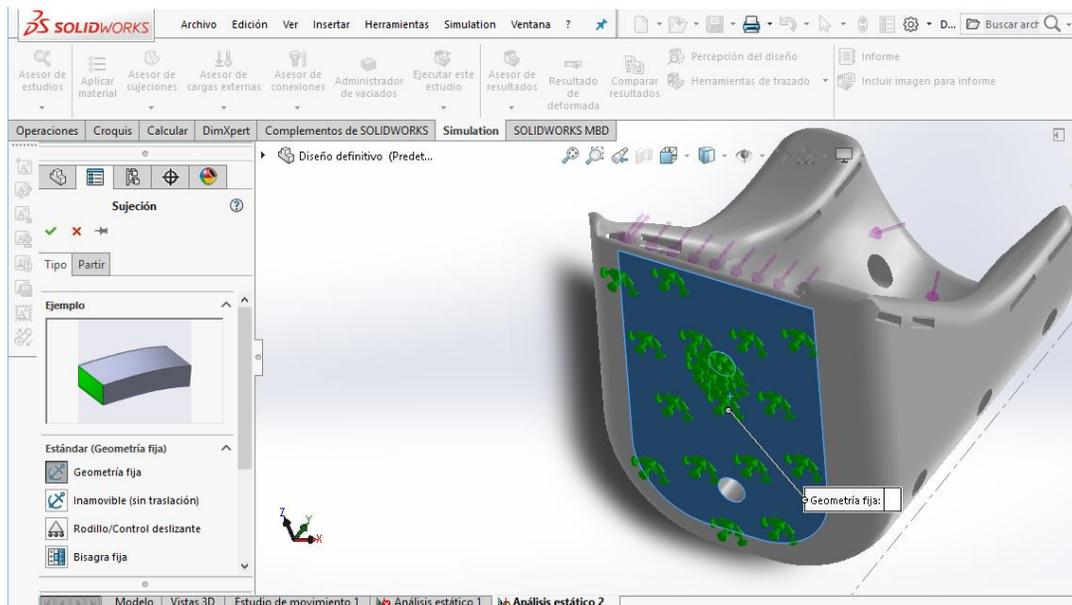


Figura 89 Configuración del tipo de sujeción en superficie

d) Cargas que soporta el elemento.

En el menú de simulación también podemos configurar el tipo, el número de cargas, el tipo de sistema de unidades y el valor total aplicado. Para ambas simulaciones en la órtesis se seleccionó las cargas de 620N y 774.99N con el sistema internacional de unidades. Ambas cargas son distribuidas a lo largo de la sección interior que tiene la forma escaneada del tobillo y pie la cual soportará el peso del cuerpo.

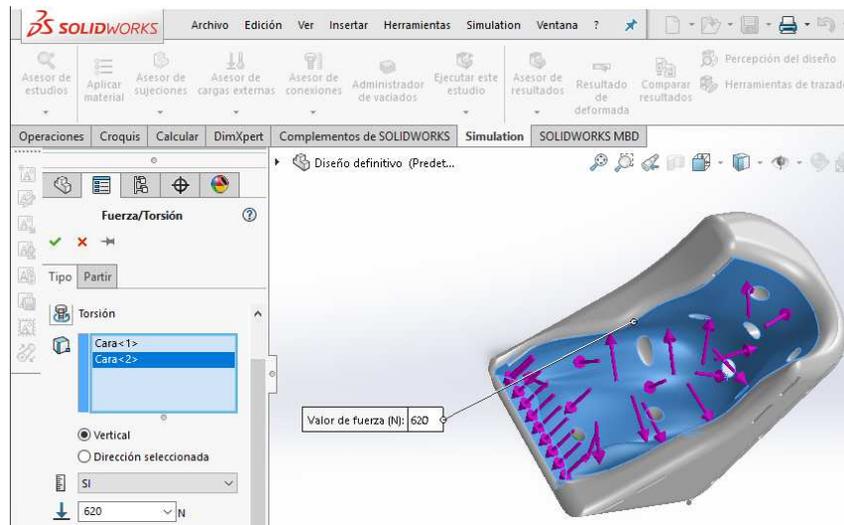


Figura 90 Configuración del tipo de carga y su magnitud en superficie

e) Administrador de Espesores

Previo a la simulación debemos dirigirnos a la opción de administrador de espesores (vaciados) la cual nos permite configurar el tamaño final de la malla. Para la simulación asignamos un valor de espesor de 15mm, que es un valor que permite apreciar la deformación a simple vista. Se puede aplicar valores mayores, pero demanda mayor tiempo de proceso por parte del programa.

En la configuración del espesor de 15 mm, el computador demora 20 minutos en procesar la información.



Figura 91 Configuración del espesor de vaciado en 15mm

f) Densidad de Malla.

Creamos y configuramos la densidad de la malla entre gruesa y fina, de acuerdo a como deseamos visualizar el estudio. Se escogió un valor intermedio para la generación de la misma.

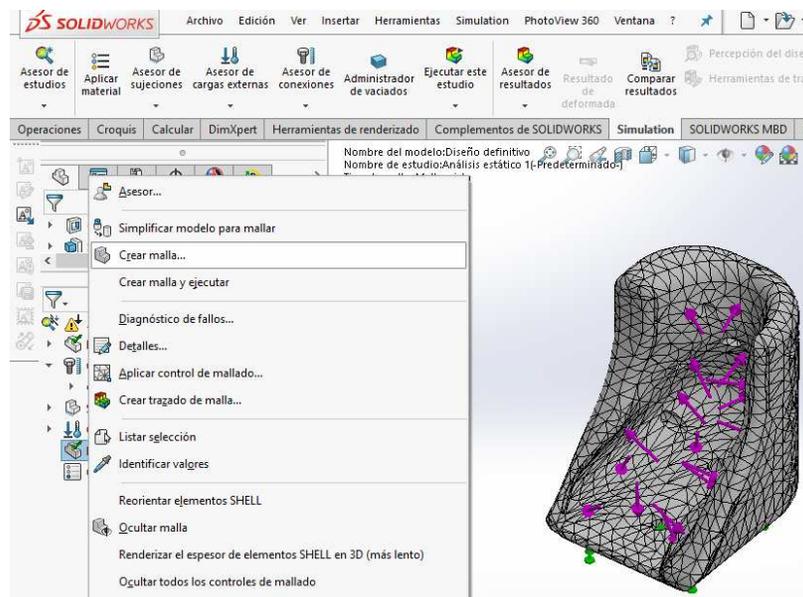


Figura 92 Acceso a configuración de malla interna para simulación

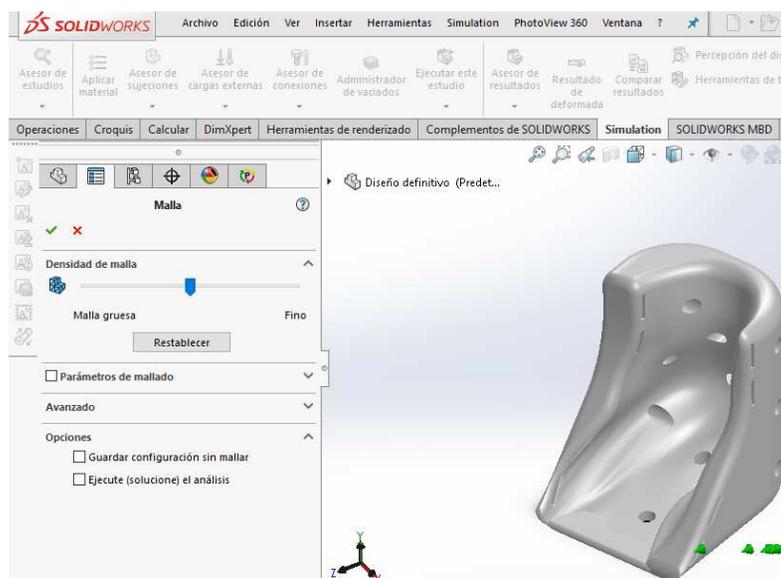


Figura 93 Configuración de densidad de malla interna para simulación

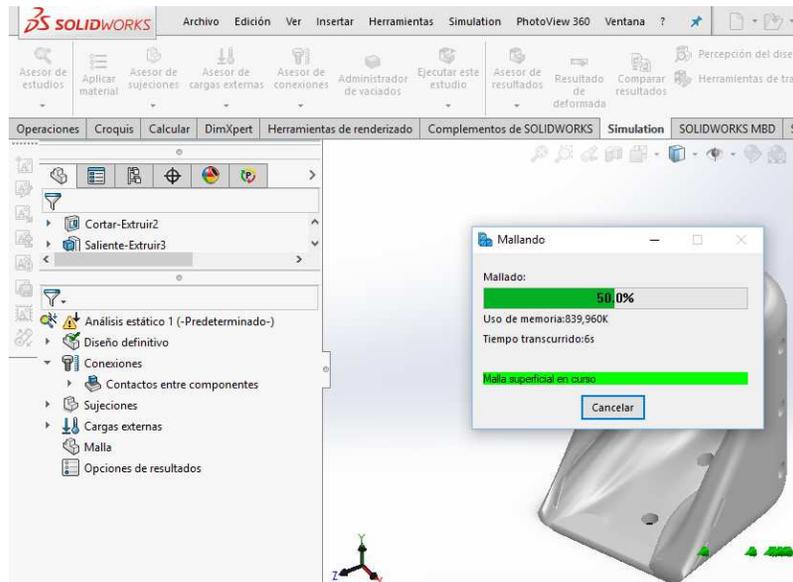


Figura 94 Mallado interno para simulación

g) Ejecución de la Simulación Mecánica.

1. Simulación mecánica para plástico ABS con carga de 620N.

Ejecutamos el estudio para plástico ABS con la carga de 620N y después de aproximadamente 7 minutos observamos el análisis de tensiones (Von Misses) en la figura 94, el análisis de desplazamiento (resistencia) en la figura 95, y por último el análisis de deformación unitaria en la figura 96.

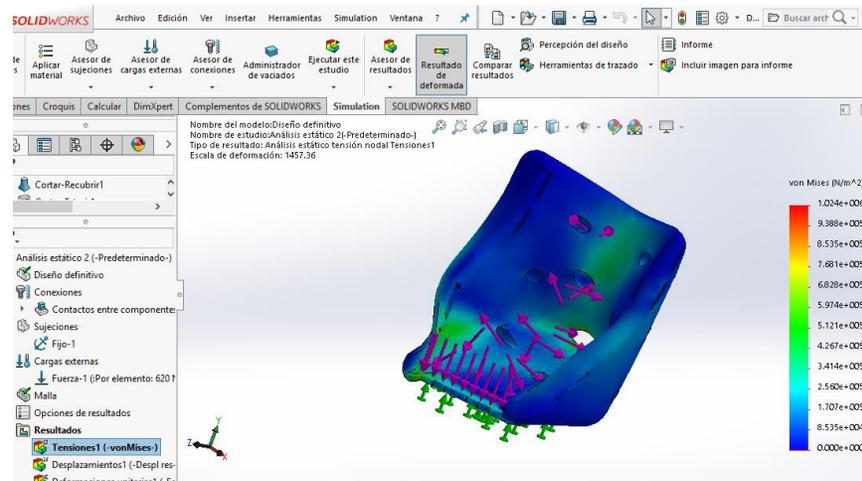


Figura 95 Simulación de tensiones (Von Misses) con carga de 620N

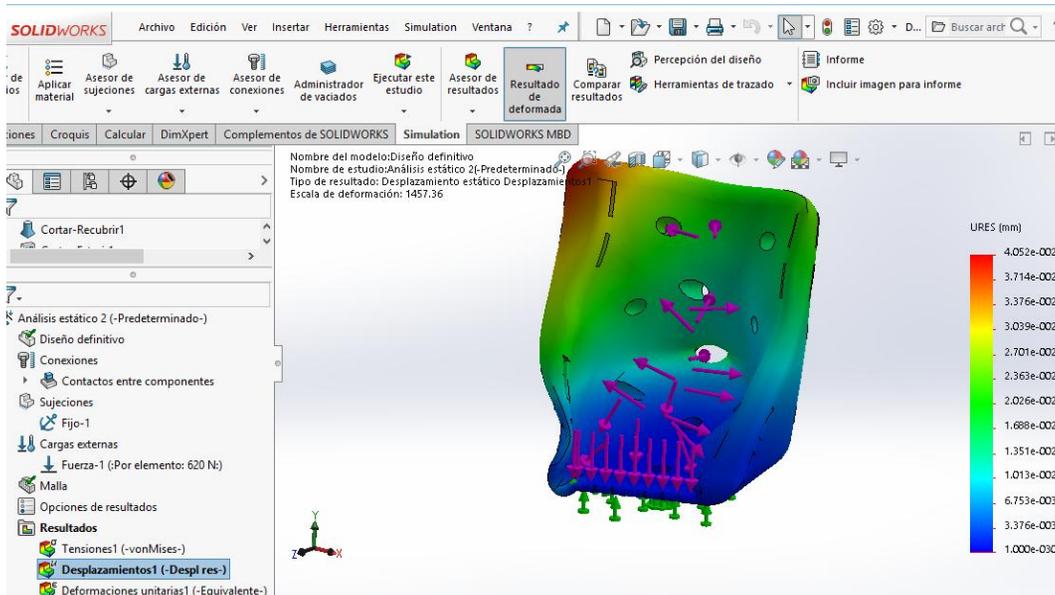


Figura 96 Simulación de desplazamiento (Resistencia) con carga de 620N

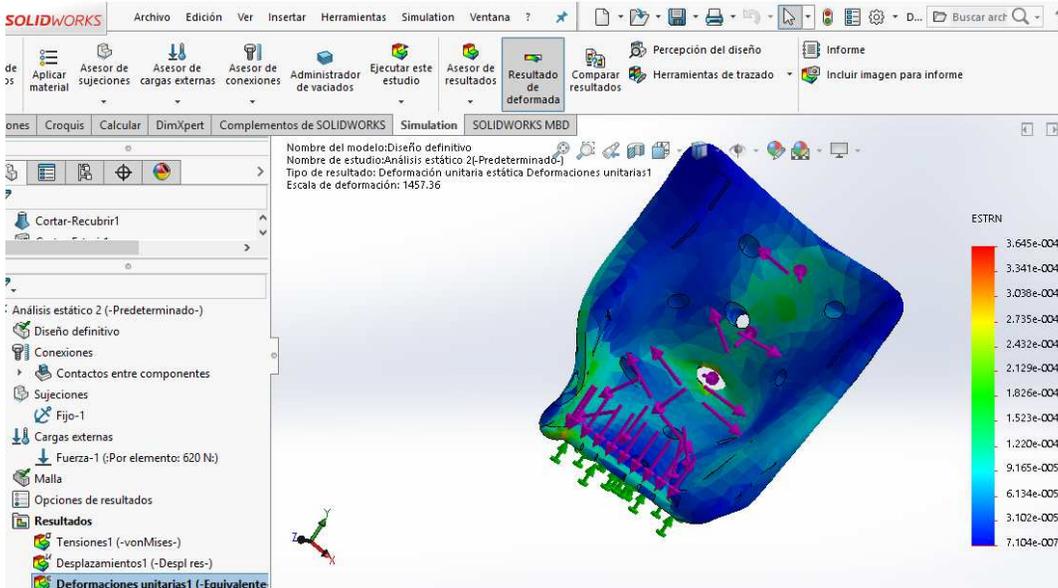


Figura 97 Simulación de deformación unitaria con carga de 620N

2. Simulación mecánica para plástico ABS con carga de 774.99N.

Podemos visualizar el análisis de tensiones (Von Mises) en la figura 97, el análisis de desplazamiento (resistencia) en la figura 98, y por último el análisis de deformación unitaria en la figura 99.

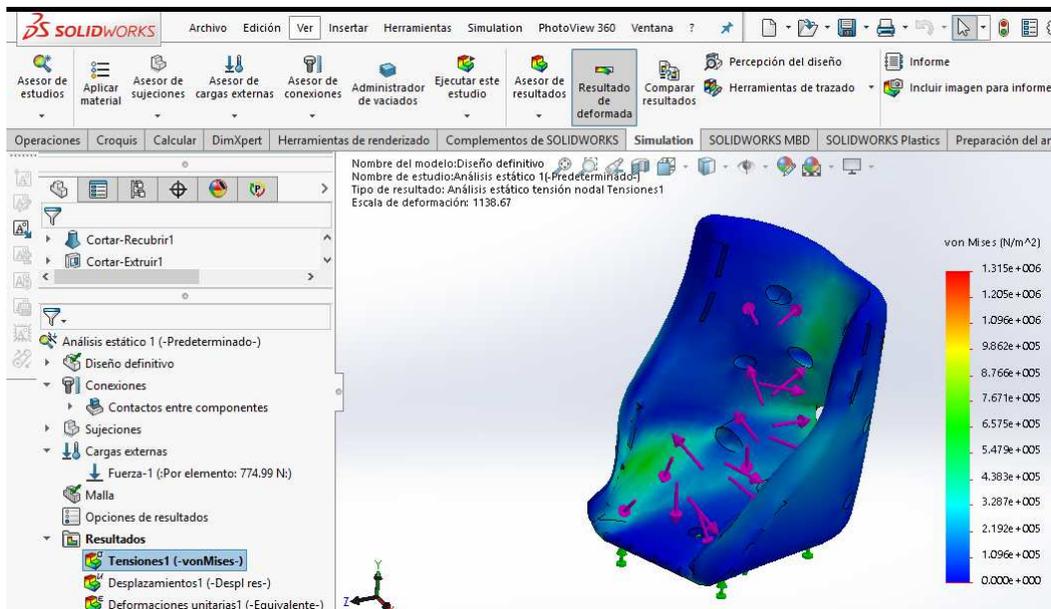


Figura 98 Simulación de tensiones (Von Mises) con carga de 774.99N

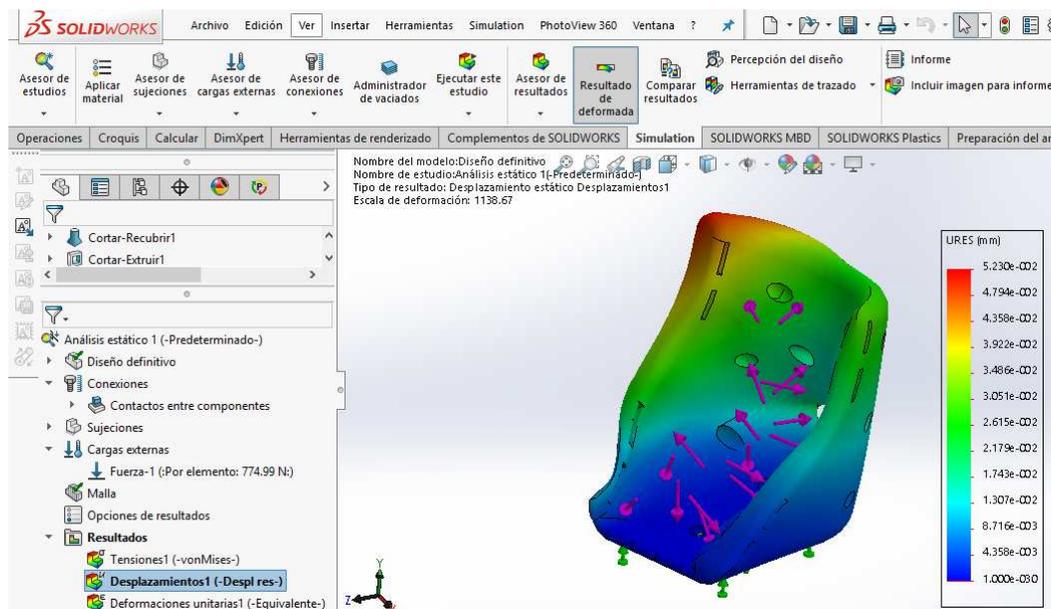


Figura 99 Simulación de desplazamiento (Resistencia) con carga de 774.99N

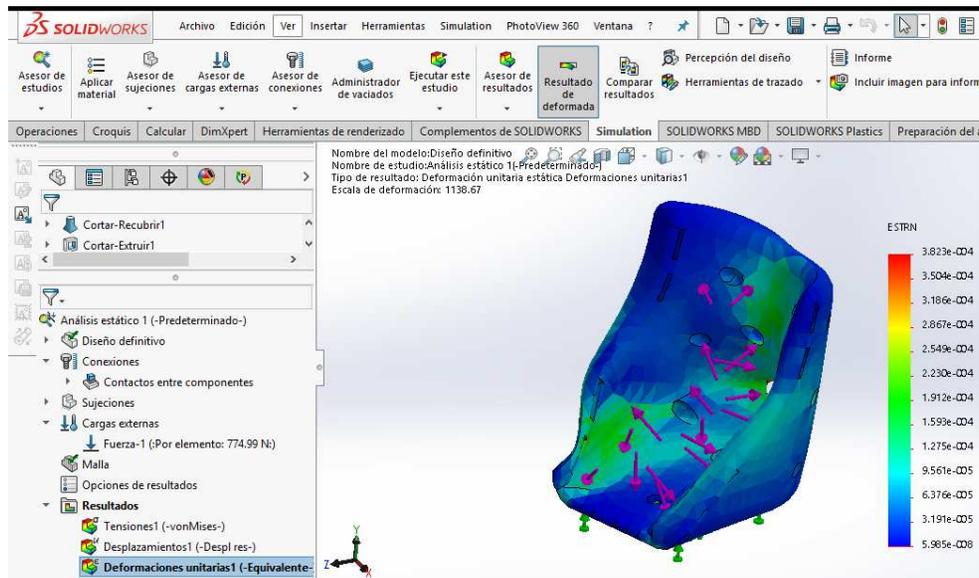


Figura 100 Simulación de deformación unitaria con carga de 774.99N

3. Simulación mecánica para plástico PLA con carga de 620N.

Podemos visualizar el análisis de tensiones (Von Mises) en la figura 100, el análisis de desplazamiento (resistencia) en la figura 101, y por último el análisis de deformación unitaria en la figura 102.

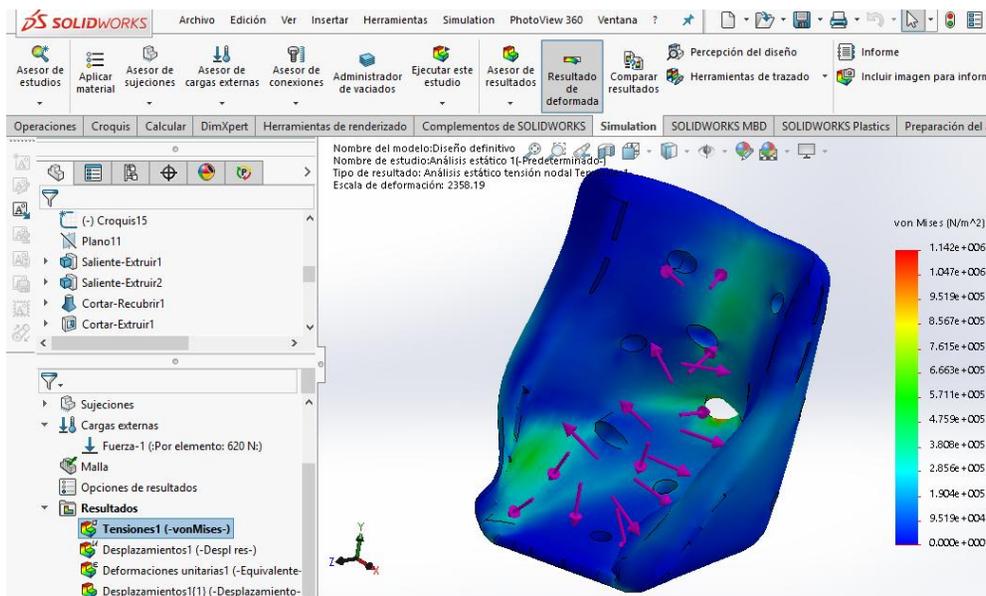


Figura 101 Simulación de tensiones (Von Mises) con carga de 620N

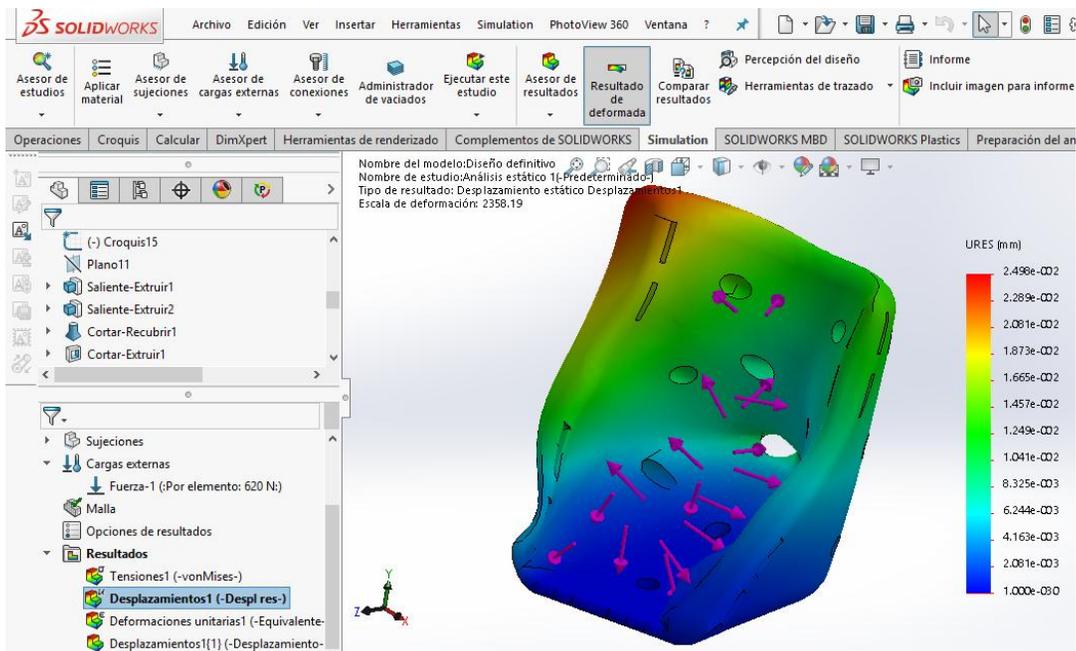


Figura 102 Simulación de desplazamiento (Resistencia) con carga de 620N

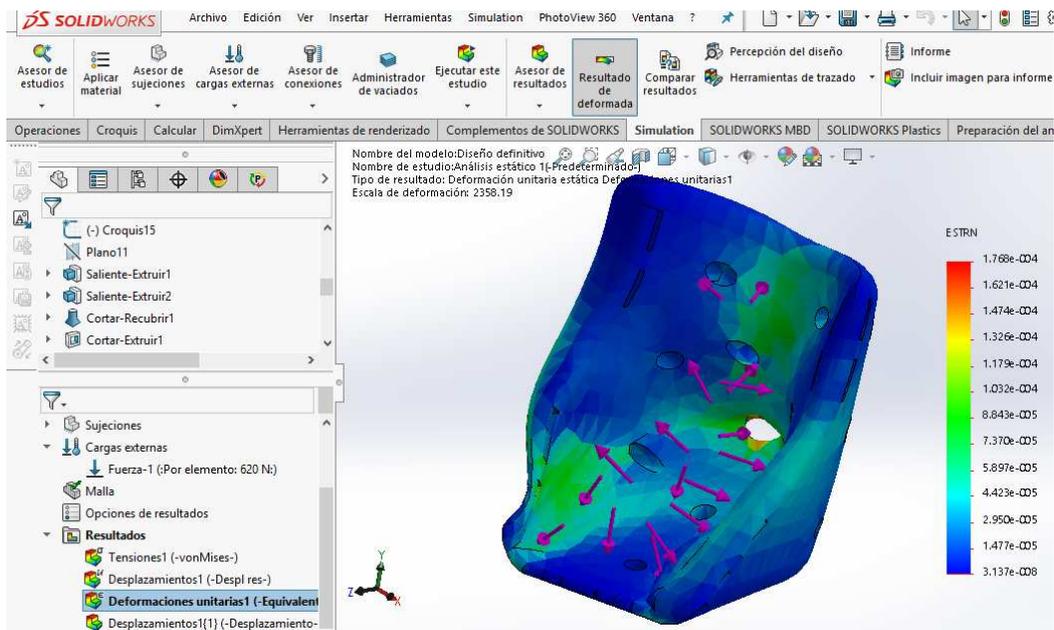


Figura 103 Simulación de deformación unitaria con carga de 620N

4. Simulación mecánica para plástico PLA con carga de 774.99N

Podemos visualizar el análisis de tensiones (Von Misses) en la figura 103, el análisis de desplazamiento (resistencia) en la figura 104, y por último el análisis de deformación unitaria en la figura 105.

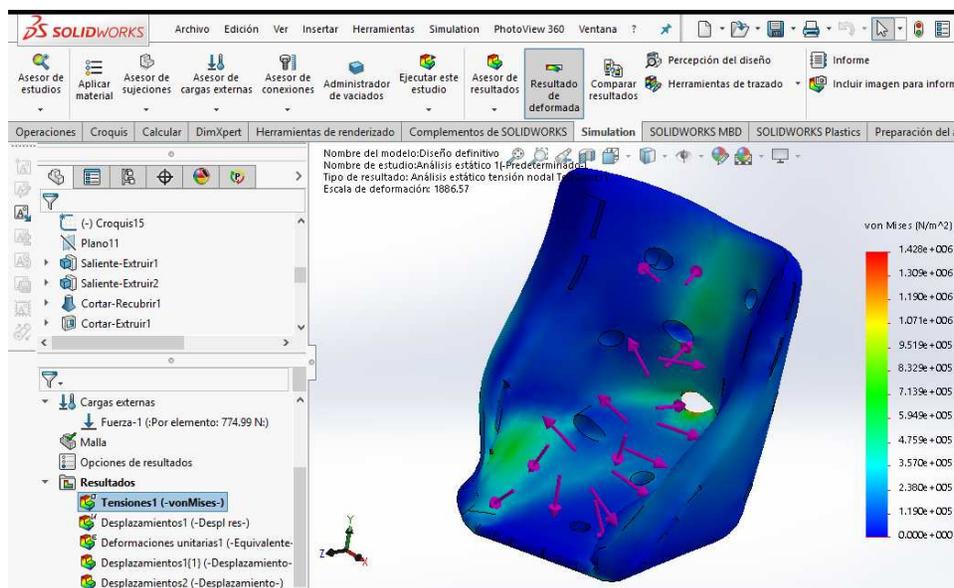


Figura 104 Simulación de tensiones (Von Misses) con carga de 774.99N

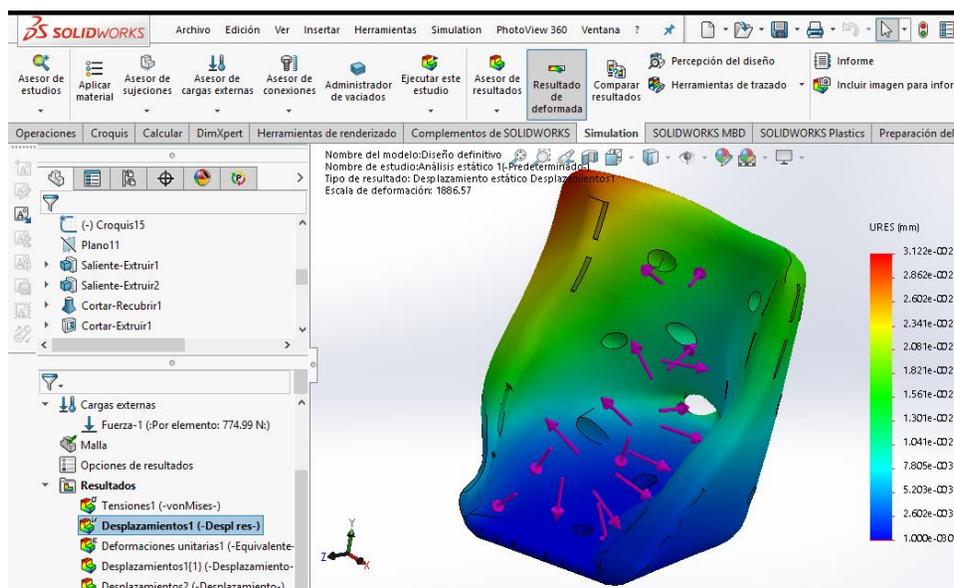


Figura 105 Simulación de desplazamiento (Resistencia) con carga de 774.99N

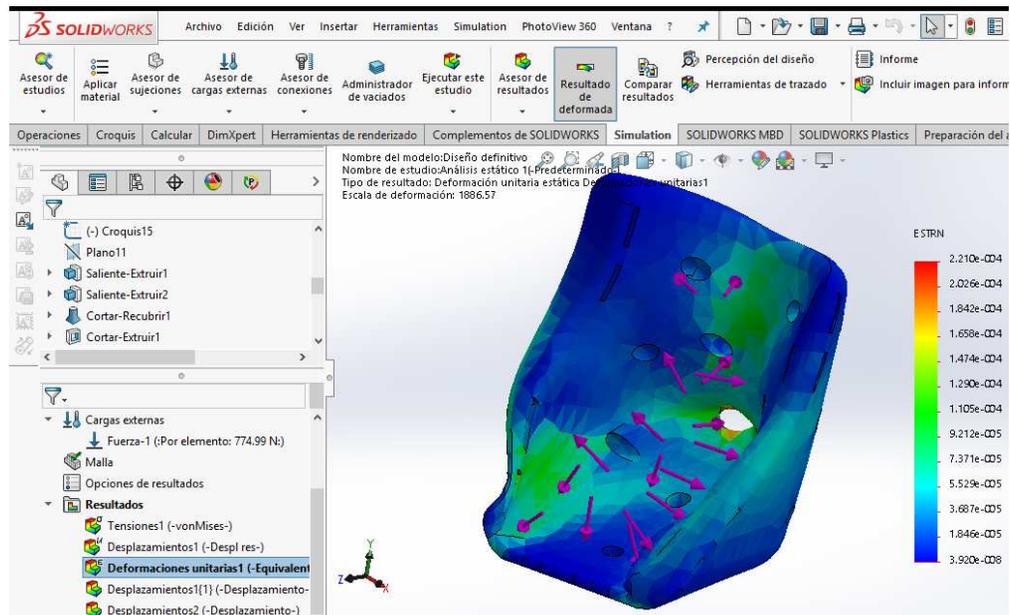


Figura 106 Simulación de deformación unitaria con carga de 774.99N

CAPITULO 3 - EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL PROTOTIPO DESARROLLADO (PRUEBAS DE CAMPO).

Es necesario realizar un análisis de compresión en laboratorio mediante probetas debido a que cuando se realiza el análisis mecánico en Solidworks se puede observar que la simulación es para un sólido tanto en la superficie externa y en la configuración interna de toda la pieza, sin dividir en malla rectangular o tipo panal la parte interna de la pieza, como lo hacen los softwares de impresión 3D, en función de la cantidad de material que se utilizará para imprimir y la resistencia a la que será sometida dicha pieza.

3.1 Diseño 3D de probetas en plástico PLA para análisis de laboratorio.

Para el diseño CAD de las probetas debemos considerar que, para el ensayo mecánico en el laboratorio, se referencia la norma ASTM D695, la cual normaliza el ensayo de compresión para materiales plásticos utilizados en diversas áreas de ingeniería. Según dicha norma las probetas pueden ser en forma rectangular con medidas de 12.7mm x 12.7mm x 25.4mm o cilíndricas con medidas 12.7mm de diámetro y 25.4mm de largo.¹²

Para el ensayo se consideró la máquina de compresión de la marca ACCU-TEK touch 350 del laboratorio de Construcciones y Aplicaciones Bioclimáticas de la facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca, misma que tiene aproximadamente 18 años de antigüedad y en la que se han realizado ensayos de compresión de hormigones, cementos y plásticos PVC. Por lo que con medidas menores de 15mm no arroja datos significativos.

¹² Propiedades de ensayo de compresión ASTM



Figura 107 Máquina de ensayo a compresión marca ACCU-TEK touch 350

A lo mencionado anteriormente es importante considerar la recomendación hecha por el especialista del laboratorio de ensayos mecánicos; dicha recomendación consiste en diseñar las probetas al doble del tamaño dado por la norma.

Las medidas de las probetas serán de 25.40mm x 25.40mm x 50.80mm

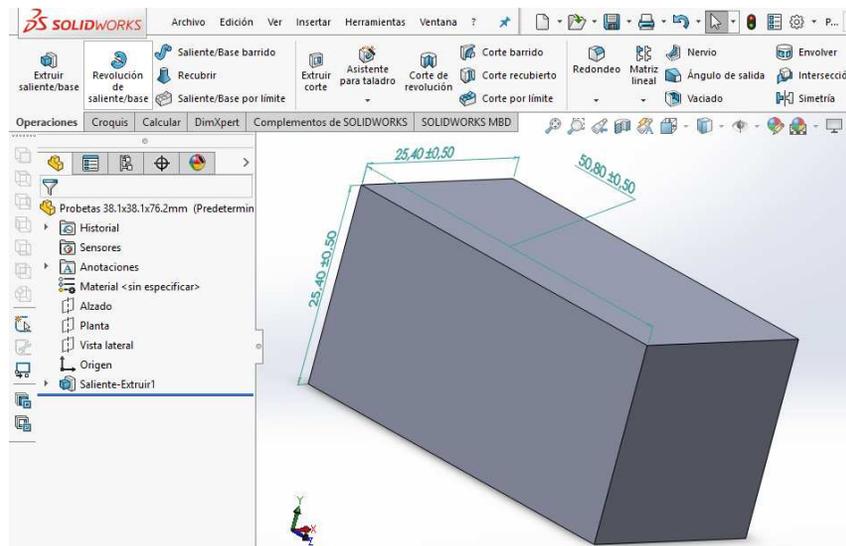


Figura 108 Diseño de probeta rectangular en Solidworks 2017.

3.2 Configuración de parámetros para impresión 3D de Probetas.

La impresión de las probetas se hace mediante el software cura 15.04 que viene por defecto en la impresora Anycubic Kossel.

La calidad, resistencia, cantidad de material y el tiempo de la impresión 3D depende de la configuración inicial de los siguientes parámetros en el software Cura 15.04:

a) Mallado interno del objeto en software de impresión 3D.

El espesor de malla (Fill Density) interna podemos variarla desde el 5% hasta el 50% para cualquier pieza, dependiendo su funcionalidad, cargas que soportan, esfuerzos grandes, etc. A medida que el porcentaje de espesor de mallado es mayor, en la impresión de la pieza entrará mayor cantidad de material y el consumo de energía también será mayor. Los valores menores a 10% de espesor de mallado se utilizan para piezas que no soportan esfuerzos mecánicos grandes, como piezas de adorno.

Fill	
Bottom/Top thickness (mm)	0.6
Fill Density (%)	10 ...

Figura 109 Configuración de relleno de malla (Fill Density)

b) Temperatura de extrucción de plástico y de cama caliente (Heathbed).

Esta característica se configura dependiendo del plástico de impresión a emplear, para el plástico ABS se necesita una temperatura de extrucción de 230°C y de cama caliente 70°C, para evitar que el modelo se despegue de la base, mientras que para el plástico PLA se necesita una temperatura de extrucción de 200°C y no se necesita calentar la cama.

Speed and Temperature	
Print speed (mm/s)	30
Printing temperature (C)	200
Bed temperature (C)	70

Figura 110 Configuración de temperatura de impresión

La velocidad es un parámetro que no se puede modificar, el fabricante de la impresora recomienda 30mm/s.

c) Tipo de soporte.

Debido a que los cambios de temperatura pueden hacer que la pieza se desprenda de su base, debemos configurar la opción Platform Adhesion Type, está la activamos dentro de esta la característica Raft que permite generar una base donde se soporta todo el modelo a 4mm de margen extra, espaciado entre líneas y otras características como vemos a continuación.

Raft	
Extra margin (mm)	<input type="text" value="4"/>
Line spacing (mm)	<input type="text" value="3.0"/>
Base thickness (mm)	<input type="text" value="0.2"/>
Base line width (mm)	<input type="text" value="1.0"/>
Interface thickness (mm)	<input type="text" value="0.27"/>
Interface line width (mm)	<input type="text" value="0.4"/>

Figura 111 Configuración de espesor y margen de la base

3.2.1 Impresión de Probeta 1 con densidad de mallado interno al 5%, en plástico ABS.

Configuramos los parámetros de densidad de mallado, temperatura de extrusor, cama caliente y soporte en la base como se aprecia en las siguientes figuras.

Fill	
Bottom/Top thickness (mm)	<input type="text" value="0.6"/>
Fill Density (%)	<input type="text" value="5"/> ...

Figura 112 Configuración de relleno de malla (Fill Density) con el 5% para la probeta 1

Support	
Support type	None
Platform adhesion type	Raft

Figura 113 Configuración de la adhesión a la plataforma

Speed and Temperature	
Print speed (mm/s)	30
Printing temperature (C)	230
Bed temperature (C)	70

Figura 114 Configuración de temperatura de extrucción y cama caliente

Generamos la visualización de la trayectoria con mallado interior del 5% como se aprecia en la figura 114 e imprimimos obteniendo después de 1 hora con 3 minutos la probeta como observamos en la figura 115:

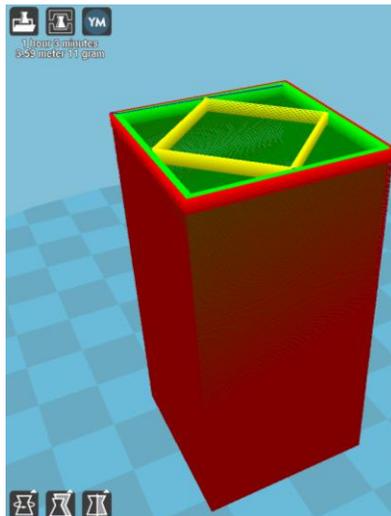


Figura 115 Espesor de mallado (Fill Density) al 5% en probeta 1

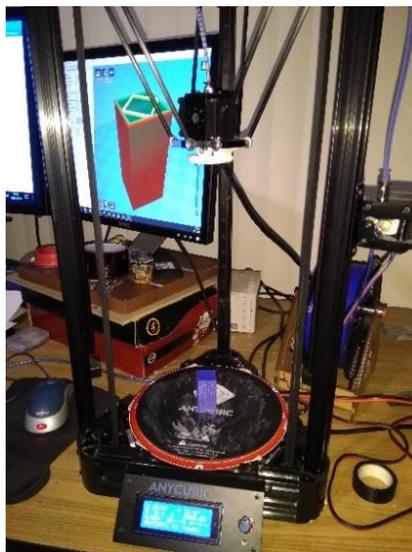


Figura 116 Impresión 3D de probeta 1 en plástico ABS

3.2.2 Impresión de Probeta 2 con densidad de mallado interno al 15%, en plástico ABS.

Configuramos el parámetro de densidad de mallado como se aprecia en la figura 116, los parámetros de temperatura de extrusor, cama caliente y soporte en la base se mantienen igual.

Fill

Bottom/Top thickness (mm)	<input type="text" value="0.6"/>
Fill Density (%)	<input type="text" value="15"/> ...

Figura 117 Configuración de relleno de malla (Fill Density) con el 15% para la probeta 2

Generamos la visualización de la trayectoria con mallado interior del 15% como se aprecia en la figura 117 e imprimimos, obteniendo después de 1 hora con 23 minutos la probeta, como se observa en la figura 118.

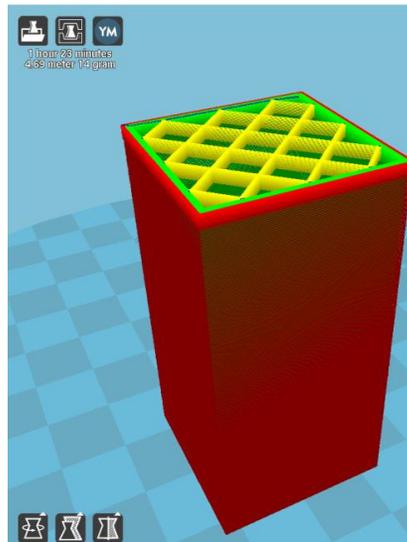


Figura 118 Espesor de mallado (Fill Density) al 15% en probeta 2

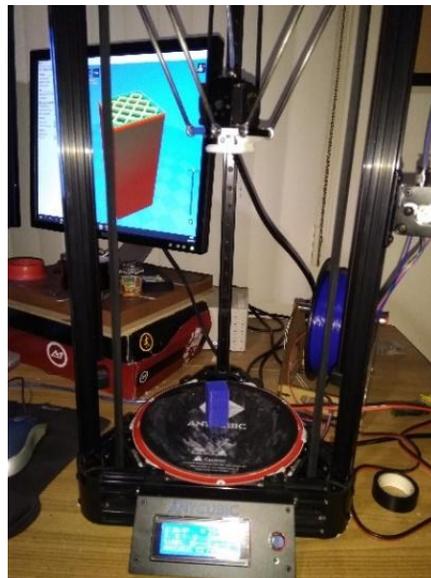


Figura 119 Impresión 3D de probeta 2 en plástico ABS.

3.2.3 Impresión de Probeta 3 con densidad de mallado interno al 5%, en plástico PLA.

Configuramos los parámetros de densidad de mallado, temperatura de extrusor y soporte en la base, como se aprecia en las siguientes figuras:

Fill

Bottom/Top thickness (mm)

Fill Density (%) ...

Figura 120 Configuración de relleno de malla (Fill Density) con el 5% para la probeta 3

Support

Support type ...

Platform adhesion type ...

Figura 121 Configuración de la adhesión a la plataforma

Speed and Temperature

Print speed (mm/s)

Printing temperature (C)

Bed temperature (C)

Figura 122 Configuración de temperatura de extrucción y cama caliente

Generamos la visualización de la trayectoria con mallado interior del 5% como se aprecia en la figura 122 e imprimimos obteniendo después de 1 hora con 3 minutos la probeta, como observamos en la figura 123:

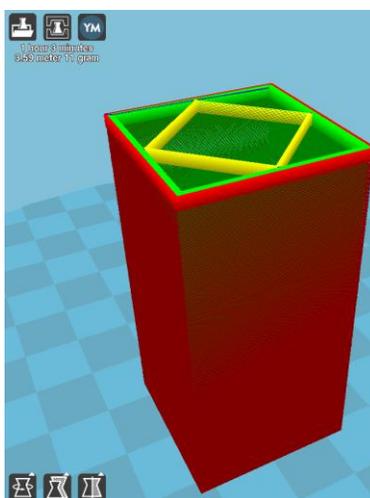


Figura 123 Espesor de mallado (Fill Density) al 5% en probeta 3

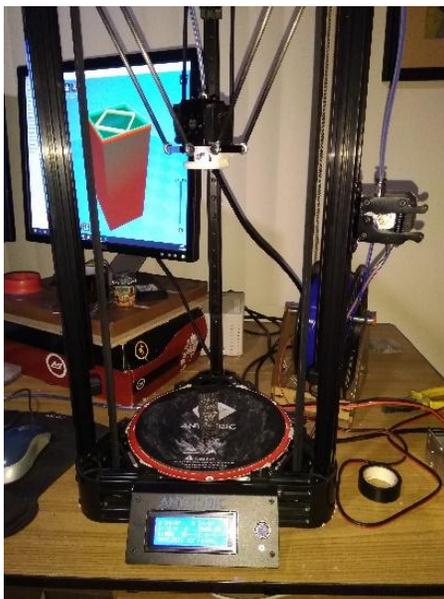


Figura 124 Impresión 3D de probeta 3 en plástico PLA.

3.2.4 Impresión de Probeta con densidad de mallado interno al 15%, en plástico PLA.

Configuramos el parámetro de densidad de mallado como se aprecia en la figura 124, los parámetros de temperatura de extrusor, cama caliente y soporte en la base se mantienen igual.

Fill

Bottom/Top thickness (mm)

Fill Density (%) ...

Figura 125 Configuración de relleno de malla (Fill Density) con el 15% para la probeta 4.

Generamos la visualización de la trayectoria con mallado interior del 15% como se aprecia en la figura 125 e imprimimos obteniendo después de 1 hora con 23 minutos la probeta como se observa en la figura 126.

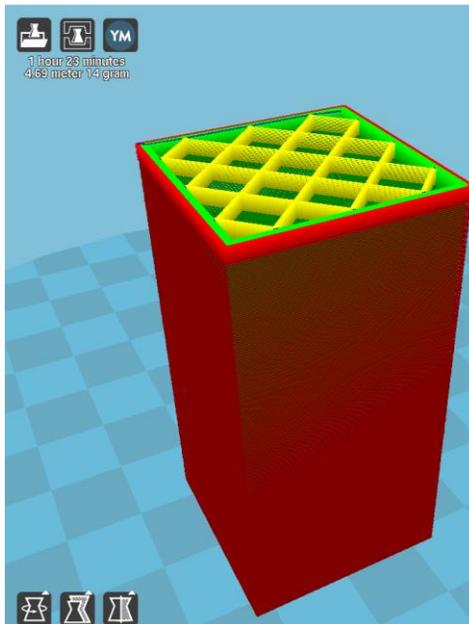


Figura 126 Espesor de mallado (Fill Density) al 15% en probeta 4



Figura 127 Impresión 3D y de probeta 4 en plástico PLA

3.3 Ensayo mecánico.

El ensayo se realiza sobre una probeta del material, en una máquina universal de ensayos, obteniéndose una curva de compresión aplicada frente a deformación longitudinal unitaria producida. Para el ensayo se realiza los siguientes pasos:

a) Peso de probetas.

Es necesario pesar las probetas y etiquetarlas para evitar confusiones, como se aprecia en las figuras a continuación.



Figura 128 Peso de probeta en plástico ABS con 15% de espesor de malla



Figura 129 Peso de probeta en plástico ABS con 5% de espesor de malla



Figura 130 Peso de probeta en plástico PLA con 15% de espesor de malla



Figura 131 Peso de probeta en plástico PLA con 5% de espesor de malla

Permitiéndonos conocer su masa y la diferencia entre estas cuando se utiliza los dos tipos de configuración de mallado interno.



Figura 132 Probetas con sus características de mallado interno, tipo y peso

b) Inicio de ensayo.

Por recomendaciones del especialista del laboratorio, se configura la fuerza de 735.49 N en su equivalente de 75Kgf y la velocidad de compresión de 2mm/min en la máquina, debido a que las probetas pueden romperse o salir disparadas. Previo al ensayo se coloca la probeta entre los dos discos y se coloca el deformímetro con unidad de medidas en pulgadas como apreciamos en las siguientes figuras:



Figura 133 Ensayo con probeta PLA 5% de mallado interior



Figura 134 Ensayo con probeta PLA 15% de mallado interior



Figura 135 Ensayo con probeta ABS 5% de mallado interior



Figura 136 Ensayo con probeta ABS 15% de mallado interior

La probeta que soporto mayor presión fue la de plástico ABS con configuración del 15% de mallado interno, misma que se fracturo al final del ensayo como se aprecia a continuación:



Figura 137 Probeta fracturada en ensayo de compresión

c) Curvas esfuerzo vs deformación en ensayo de compresión.

La máquina de compresión de la marca ACCU-TEK touch 350 no genera curvas automáticamente, solo visualiza datos de la velocidad de carga y la carga aplicada en la probeta, además de colocarle el deformímetro para poder generar tablas con datos.

Para los cálculos de ensayo de compresión no confinada se aplicaron las siguientes formulas:

$$\varepsilon = \frac{L_{inicial} - L_{final}}{L_{inicial}} \quad A_c = \frac{A_{inicial}}{1 - \varepsilon} \quad \sigma_c = \frac{\text{Carga aplicada}}{A_c}$$

$$\sigma_c = \frac{\text{Máximo Esfuerzo de Compresion}}{2}$$

Tabla 3

Valores para curva Esfuerzo deformación de probeta de plástico PLA con 5% de mallado interno

Probeta con 5% de espesor de malla		Linicial (cm) = 5,080		Peso: 5,5g				
		Ainicial (cm2)= 6,452						
Desplazamiento en (in)	Desplazamiento en (cm)	Deformación en (cm)	Kgf	Deformación Unitaria ϵ	Factor de Corrección (1- ϵ)	Área Corregida (Ac) en (cm2)	Esfuerzo de Corte (σ_c) en Kgff/cm2	Resistencia al Corte (C) en (Kgff/cm2)
0,000	0,000	5,080	0,000	0,000	1,000	6,452	0,000	0,000
0,001	0,003	5,077	82,000	0,0005	1,000	6,455	12,704	6,352
0,002	0,005	5,075	84,700	0,001	0,999	6,458	13,115	6,558
0,003	0,008	5,072	87,000	0,0015	0,999	6,461	13,465	6,732
0,004	0,010	5,070	87,900	0,002	0,998	6,465	13,597	6,799
0,005	0,013	5,067	88,800	0,0025	0,998	6,468	13,730	6,865
0,006	0,015	5,065	92,000	0,003	0,997	6,471	14,217	7,109
0,007	0,018	5,062	93,200	0,0035	0,997	6,474	14,395	7,198
0,008	0,020	5,060	90,000	0,004	0,996	6,478	13,894	6,947
0,009	0,023	5,057	94,200	0,0045	0,996	6,481	14,535	7,268
0,010	0,025	5,055	94,700	0,005	0,995	6,484	14,605	7,303
0,011	0,028	5,052	97,300	0,0055	0,995	6,487	14,999	7,499
0,012	0,030	5,050	98,600	0,006	0,994	6,491	15,191	7,596
0,013	0,033	5,047	100,100	0,0065	0,994	6,494	15,415	7,707
0,014	0,036	5,044	102,700	0,007	0,993	6,497	15,807	7,904
0,015	0,038	5,042	104,600	0,0075	0,993	6,500	16,091	8,046
0,016	0,041	5,039	107,200	0,008	0,992	6,504	16,483	8,242
0,017	0,043	5,037	108,600	0,0085	0,992	6,507	16,690	8,345
0,018	0,046	5,034	109,200	0,009	0,991	6,510	16,774	8,387
0,019	0,048	5,032	112,700	0,0095	0,991	6,513	17,303	8,651



Figura 138 Máxima carga soportada en compresión por la probeta de plástico PLA con 5% de mallado interno



Figura 139 Curva Esfuerzo vs Deformación en ensayo de compresión de probeta de plástico PLA con 5% de mallado interno

Tabla 4

Valores para curva Esfuerzo vs Deformación de probeta de plástico PLA con 15% de mallado interno

Probeta con 15% de espesor de malla		Linicial (cm) = 5,080		Peso: 7,7g				
		Ainicial (cm2)= 6,452						
Desplazamiento en (in)	Desplazamiento en (cm)	Deformación en (cm)	Kgf	Deformación Unitaria ϵ	Factor de Corrección (1- ϵ)	Área Corregida (Ac) en (cm2)	Esfuerzo de Corte (σ_c) en Kgf/cm2	Resistencia al Corte (C) en (Kgf/cm2)
0,000	0,000	5,080	0,000	0,000	1,000	6,452	0,000	0,000
0,001	0,003	5,077	86,800	0,0005	1,000	6,455	13,447	6,724
0,002	0,005	5,075	93,400	0,001	0,999	6,458	14,463	7,231
0,003	0,008	5,072	122,700	0,0015	0,999	6,461	18,990	9,495
0,004	0,010	5,070	136,900	0,002	0,998	6,465	21,177	10,589
0,005	0,013	5,067	147,900	0,0025	0,998	6,468	22,867	11,434
0,006	0,015	5,065	151,300	0,003	0,997	6,471	23,381	11,691
0,007	0,018	5,062	153,400	0,0035	0,997	6,474	23,694	11,847
0,008	0,020	5,060	154,100	0,004	0,996	6,478	23,790	11,895
0,009	0,023	5,057	155,700	0,0045	0,996	6,481	24,025	12,012
0,010	0,025	5,055	156,100	0,005	0,995	6,484	24,075	12,037
0,011	0,028	5,052	156,400	0,0055	0,995	6,487	24,109	12,054
0,012	0,030	5,050	157,600	0,006	0,994	6,491	24,281	12,141
0,013	0,033	5,047	158,300	0,0065	0,994	6,494	24,377	12,189
0,014	0,036	5,044	159,200	0,007	0,993	6,497	24,503	12,252
0,015	0,038	5,042	160,500	0,0075	0,993	6,500	24,691	12,345
0,016	0,041	5,039	163,000	0,008	0,992	6,504	25,063	12,531
0,017	0,043	5,037	158,300	0,0085	0,992	6,507	24,328	12,164
0,018	0,046	5,034	166,000	0,009	0,991	6,510	25,498	12,749
0,019	0,048	5,032	166,100	0,0095	0,991	6,513	25,501	12,750



Figura 140 Máxima carga soportada en compresión por la probeta de plástico PLA con 15% de mallado interno

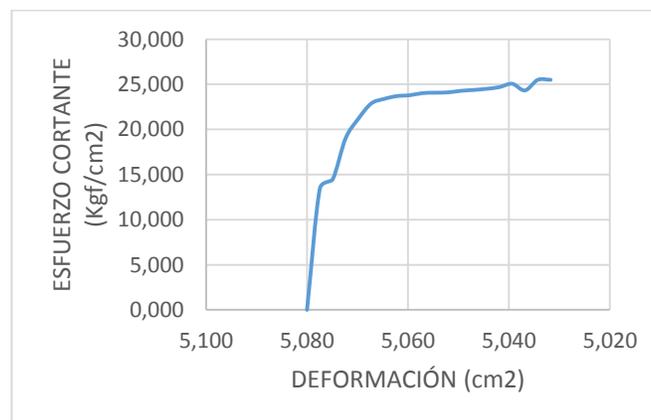


Figura 141 Curva Esfuerzo vs Deformación en ensayo de compresión de probeta de plástico PLA con 15% de mallado interno

Tabla 5

Valores para curva Esfuerzo vs Deformación de probeta de plástico ABS con 5% de mallado interno

Probeta con 5% de espesor de malla		Linicial (cm) = 5,080		Peso: 6,3 g				
		Ainicial (cm2)= 6,452						
Desplazamiento en (in)	Desplazamiento en (cm)	Deformación en (cm)	Kgf	Deformación Unitaria ϵ	Factor de Corrección (1- ϵ)	Área Corregida (Ac) en (cm2)	Esfuerzo de Corte (σ_c) en Kgf/cm2	Resistencia al Corte (C) en (Kgf/cm2)
0,000	0,000	5,080	0,000	0,000	1,000	6,452	0,000	0,000
0,001	0,003	5,077	86,800	0,0005	1,000	6,455	13,447	6,724
0,002	0,005	5,075	93,400	0,001	0,999	6,458	14,463	7,231
0,003	0,008	5,072	122,700	0,0015	0,999	6,461	18,990	9,495
0,004	0,010	5,070	136,900	0,002	0,998	6,465	21,177	10,589
0,005	0,013	5,067	147,900	0,0025	0,998	6,468	22,867	11,434
0,006	0,015	5,065	151,300	0,003	0,997	6,471	23,381	11,691
0,007	0,018	5,062	153,400	0,0035	0,997	6,474	23,694	11,847
0,008	0,020	5,060	154,100	0,004	0,996	6,478	23,790	11,895
0,009	0,023	5,057	155,700	0,0045	0,996	6,481	24,025	12,012
0,010	0,025	5,055	156,100	0,005	0,995	6,484	24,075	12,037
0,011	0,028	5,052	156,400	0,0055	0,995	6,487	24,109	12,054
0,012	0,030	5,050	157,600	0,006	0,994	6,491	24,281	12,141
0,013	0,033	5,047	158,300	0,0065	0,994	6,494	24,377	12,189
0,014	0,036	5,044	159,200	0,007	0,993	6,497	24,503	12,252
0,015	0,038	5,042	160,500	0,0075	0,993	6,500	24,691	12,345
0,016	0,041	5,039	163,000	0,008	0,992	6,504	25,063	12,531
0,017	0,043	5,037	178,000	0,0085	0,992	6,507	27,356	13,678
0,018	0,046	5,034	181,300	0,009	0,991	6,510	27,849	13,924
0,019	0,048	5,032	186,300	0,0095	0,991	6,513	28,602	14,301



Figura 142 Máxima carga soportada en compresión por la probeta de plástico ABS con 5% de mallado interno



Figura 143 Curva Esfuerzo vs Deformación en ensayo de compresión de probeta de plástico PLA con 5% de mallado interno

Tabla 6

Valores para curva Esfuerzo vs Deformación de probeta de plástico ABS con 15% de mallado interno

Probeta con 15% de espesor de malla		Linicial (cm) = 5,080		Peso: 8,5g					
		Ainicial (cm2)= 6,452							
Desplazamiento en (in)	Desplazamiento en (cm)	Deformación en (cm)	Kgf	Deformación Unitaria ϵ	Factor de Corrección (1- ϵ)	Área Corregida (Ac) en (cm2)	Esfuerzo de Corte (σ_c) en Kgf/cm2	Resistencia al Corte (C) en (Kgf/cm2)	
0,000	0,000	5,080	0,000	0,000	1,000	6,452	0,000	0,000	
0,001	0,003	5,077	79,700	0,0005	1,000	6,455	12,347	6,174	
0,002	0,005	5,075	80,600	0,001	0,999	6,458	12,481	6,240	
0,003	0,008	5,072	82,100	0,0015	0,999	6,461	12,706	6,353	
0,004	0,010	5,070	83,100	0,002	0,998	6,465	12,855	6,427	
0,005	0,013	5,067	87,500	0,0025	0,998	6,468	13,529	6,764	
0,006	0,015	5,065	87,900	0,003	0,997	6,471	13,584	6,792	
0,007	0,018	5,062	96,000	0,0035	0,997	6,474	14,828	7,414	
0,008	0,020	5,060	105,500	0,004	0,996	6,478	16,287	8,144	
0,009	0,023	5,057	106,800	0,0045	0,996	6,481	16,480	8,240	
0,010	0,025	5,055	112,600	0,005	0,995	6,484	17,366	8,683	
0,011	0,028	5,052	116,100	0,0055	0,995	6,487	17,897	8,948	
0,012	0,030	5,050	119,000	0,006	0,994	6,491	18,334	9,167	
0,013	0,033	5,047	120,400	0,0065	0,994	6,494	18,541	9,270	
0,014	0,036	5,044	123,000	0,007	0,993	6,497	18,932	9,466	
0,015	0,038	5,042	132,700	0,0075	0,993	6,500	20,414	10,207	
0,016	0,041	5,039	211,700	0,008	0,992	6,504	32,551	16,276	
0,017	0,043	5,037	218,900	0,0085	0,992	6,507	33,641	16,821	
0,018	0,046	5,034	229,200	0,009	0,991	6,510	35,206	17,603	
0,019	0,048	5,032	348,400	0,0095	0,991	6,513	53,489	26,745	



Figura 144 Máxima carga soportada en compresión por la probeta de plástico ABS con 15% de mallado interno



Figura 145 Curva Esfuerzo vs Deformación en ensayo de compresión de probeta de plástico PLA con 15% de mallado interno

3.4 Corrección del modelo geométrico del prototipo.

Una vez finalizados los diseños y análisis mecánico del prototipo en el software Solidworks 2017, se procede a guardar el archivo en formato *. Stl, como se aprecia a continuación:

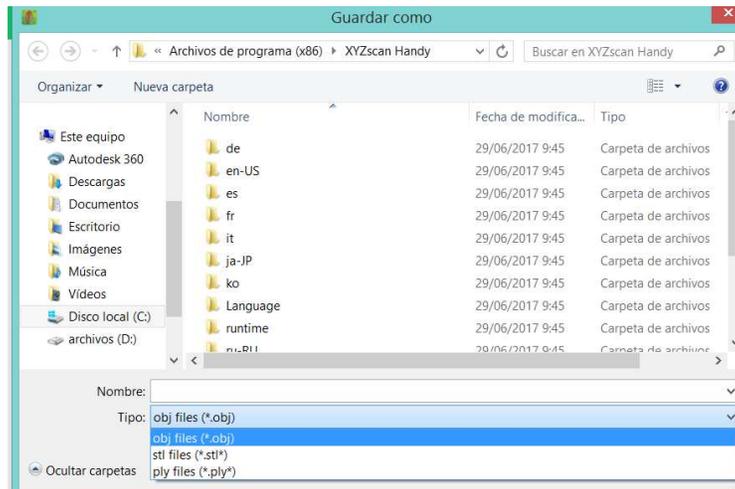


Figura 146 Opciones de guardado de imágenes digitalizadas en formatos (*.obj, *.stl, *.ply).

Dentro del modelado geométrico en el programa CAD/CAE no se puede apreciar errores geométricos cuando se realizan recubrimientos, extrucciones, cortes, etc., en superficies complejas. El software Solidworks no permite detectar errores geométricos, solo permite corregir el mallado interno previo al análisis mecánico.

Se debe considerar el software Netfabb Studio Basic 4.9 que es de Autodesk, dicho programa es uno de los más usados por los usuarios de Solidworks, Rhinoceros, Inventor, etc. Siendo su interface con el usuario excelente.



Figura 147 Logotipo de software Netfabb Studio Basic 4.9.

Fuente: (Meshlab, 2016)

a) Apertura del archivo *. Stl, con el diseño.

Una vez abierto el archivo en el software Netfabb, configuramos parámetros básicos para reparar las geometrías erróneas por malla.

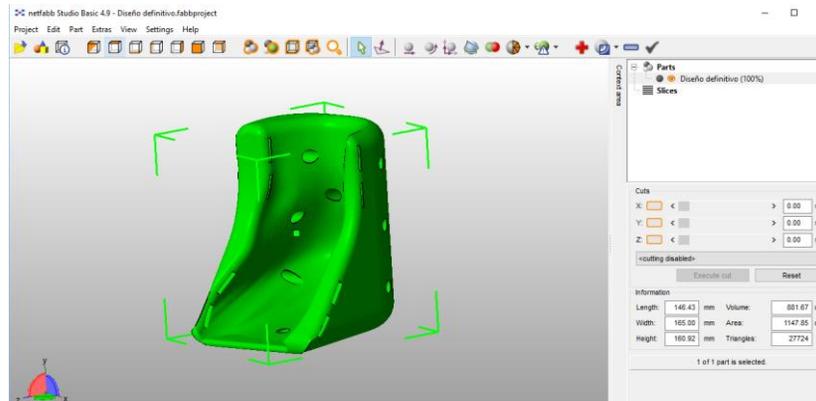


Figura 148 Configuración de parámetros básicos para corregir geometrías erróneas por malla

b) Aplicación de reparación automática y remoción de geometría defectuosa.

El software Netfabb Studio Basic 4.9 viene con datos por defecto para la corrección automática de la geometría y para remover la parte defectuosa previo a la impresión 3D. Si se desean parámetros específicos se puede configurar a conveniencia.

Es recomendable ejecutar la reparación automática del modelo geométrico.

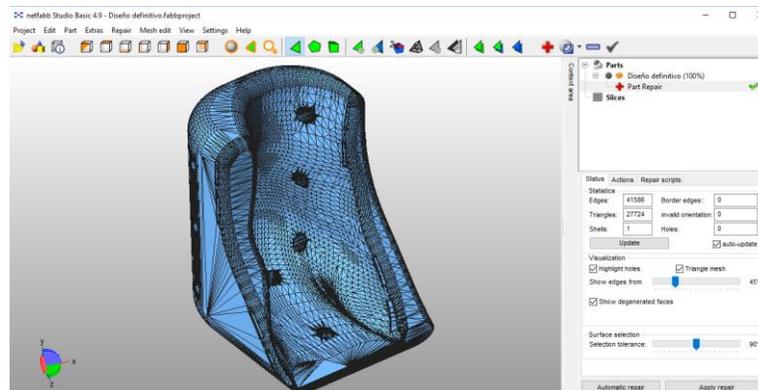


Figura 149 Configuración de malla interna previo a reparación

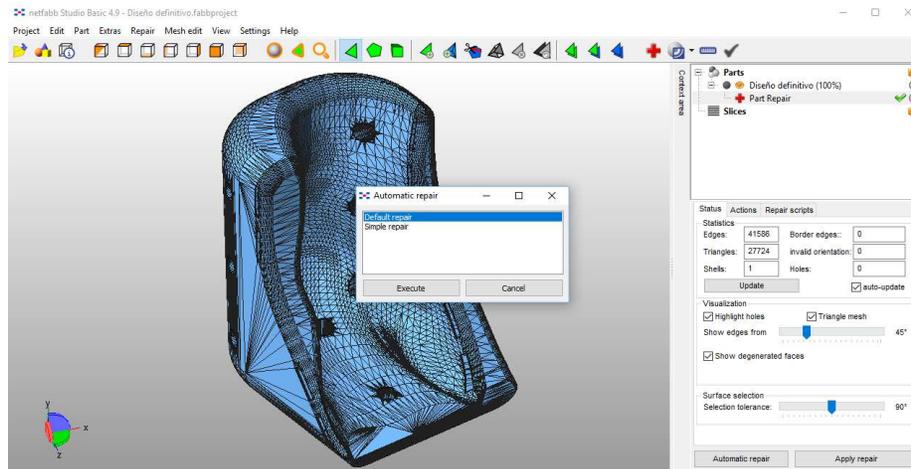


Figura 150 Aplicación de reparación

c) Exportado de geometría nueva en formato *. Stl.

La geometría corregida permitirá que el programa de impresión 3D genere mejor las trayectorias de impresión.

Previo a la impresión debemos exportar el archivo con nueva geometría en formato *. Stl.

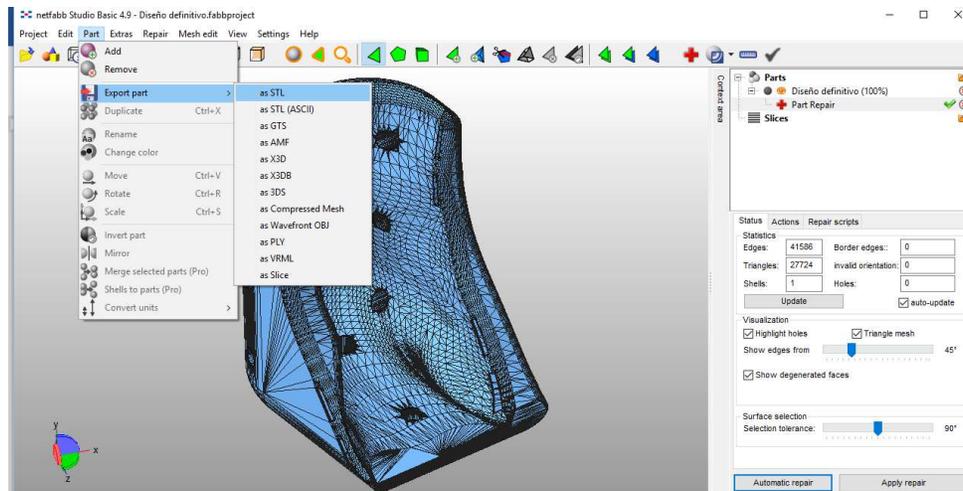


Figura 151 Exportación de archivo reparado a formato *. Stl

3.5 Impresión de prototipo de órtesis en plástico PLA

La impresión del prototipo en plástico PLA se la realizo considerando que la prueba en la probeta con el 15% de mallado interno resiste una máxima fuerza de 186.3Kgf equivalente a 1826.97N en escala real del 1% con medidas de 12.15cm x 14.15cm x 15.68cm.

a) Tipo de soporte.

Debido a que nuestro modelo cuenta con superficies curvas pronunciadas en el interior de la geometría y en los extremos de la misma, debemos configurar la opción tipo de adhesión a la plataforma (Plataform Adhesion Type), activamos dentro de esta la característica Raft y dentro de esta la opción extra margen (Extra margin), que permite generar una base donde se soporta todo el modelo.

Para nuestro prototipo se necesita 8mm de margen extra, el espaciado entre líneas y otras características se configura como se observa en la figura a continuación:

Expert config	
Raft	
Extra margin (mm)	8
Line spacing (mm)	3.0
Base thickness (mm)	0.2
Base line width (mm)	1.0
Interface thickness (mm)	0.27
Interface line width (mm)	0.4
Airgap	0.0
First Layer Airgap	0.22
Surface layers	2
Surface layer thickness (mm)	0.27
Surface layer line width (mm)	0.4
Ok	

Figura 152 Configuración de espesor y margen de la base

b) Configuración de espesor de mallado interno.

Debido a que nuestro prototipo soportara la carga de 774.99N de 79.03Kgf, valor que es menor al valor de fuerza máxima soportada de 186.3Kgf, se configuro con 15% de mallado interno garantizando así una buena resistencia del prototipo.

Fill	
Bottom/Top thickness (mm)	0.6
Fill Density (%)	15

Figura 153 Configuración de espesor de mallado (Fill Density) al 15%

c) Configuración de temperatura.

El plástico PLA se derrite desde una temperatura de 185°C en adelante, el fabricante del plástico marca "Hatchbox" recomienda 200°C para la extrucción. No se necesita calentar la cama caliente.

Speed and Temperature	
Print speed (mm/s)	30
Printing temperature (C)	200
Bed temperature (C)	0

Figura 154 Configuración de temperatura de extrucción

d) Impresión 3D del prototipo.

Se procedió con la impresión del prototipo, mismo que demora 30 horas con 14 minutos y ocupa 94.14 metros equivalentes en peso a 281 gramos de filamento como se aprecia a continuación:

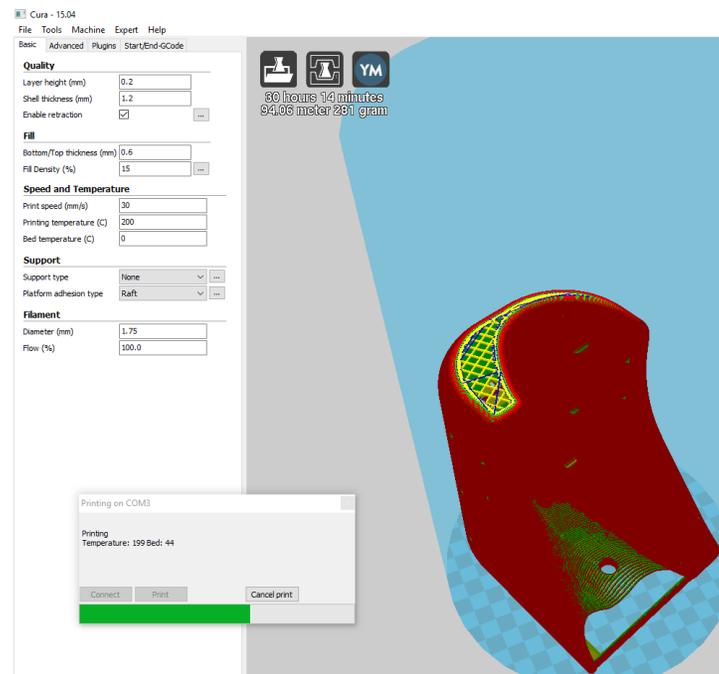


Figura 155 Trayectoria de la impresión en líneas rojas y visualización del espesor de mallado interno al 15% en líneas amarillas y verdes



Figura 156 Tiempo de impresión y cantidad de material PLA necesario



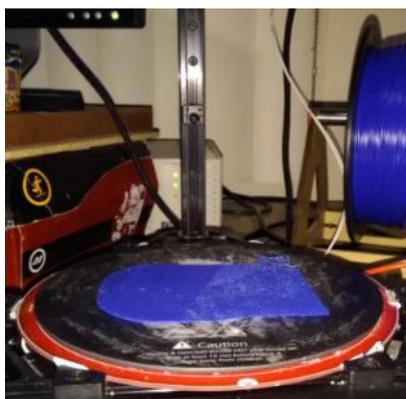
Figura 157,158 y 159 Proceso de impresión de prototipo en PLA

3.6 Impresión de prototipo de órtesis en plástico ABS

Para la impresión del prototipo consideramos dos alternativas:

- a) Impresión de prototipo en escala real con 15% de mallado interno y variación de la temperatura de cama caliente entre 70°C, 80°C y 90°.**

Es necesario ajustar la temperatura de la cama caliente para que el plástico ABS no se deforme y así evitar que la pieza se despegue durante la impresión. Realizamos tres intentos de impresión variando las temperaturas, debido a las dimensiones de la órtesis el plástico tiende deformarse y a despegarse de la base durante la impresión, como se aprecia en las siguientes figuras:



Fill	
Bottom/Top thickness (mm)	0.6
Fill Density (%)	15 ...
Speed and Temperature	
Print speed (mm/s)	30
Printing temperature (C)	230
Bed temperature (C)	70
Support	
Support type	None ...
Platform adhesion type	Raft ...

Figura 160 y 161 Primer intento de impresión con mallado al 15% y T= 70°C

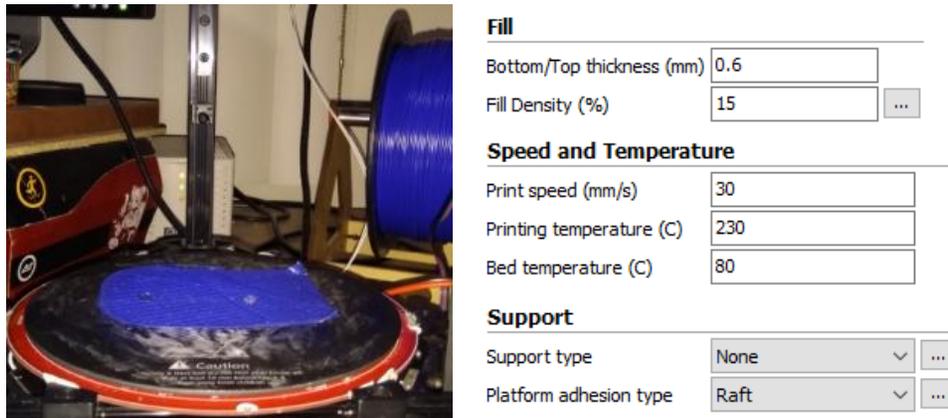


Figura 162 y 163 Segundo intento de impresión con mallado al 15% y $T = 80^{\circ}\text{C}$

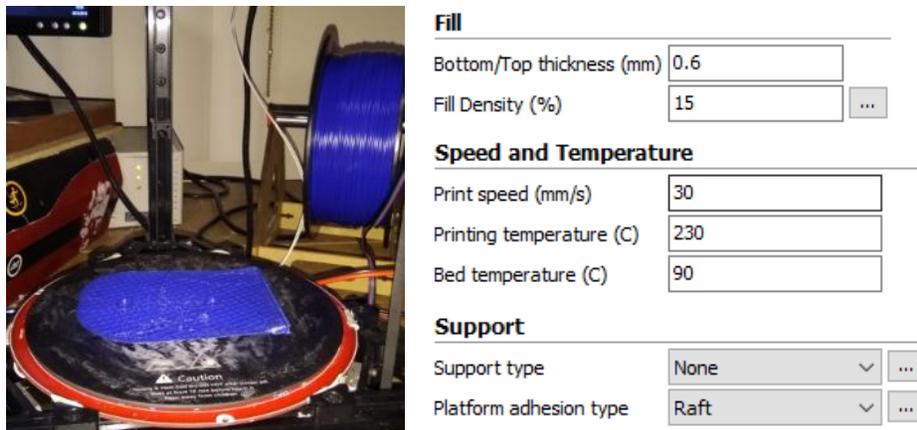


Figura 164 y 165 Primer intento de impresión con mallado al 15% y $T = 90^{\circ}\text{C}$

- b) Considerando los datos de la prueba de laboratorio en las probetas con plástico ABS, reducción de la escala y la temperatura de cama caliente de 90° .

Para que el plástico no se deforme se redujo la escala desde el 1% con medidas de 12.15cm x 14.15cm x 15.68cm al 0.8% siendo las medidas finales del prototipo 10.2cm x 11.9cm x 13.20cm.

A continuación, se aprecia la configuración de los parámetros en el software de impresión:

1. Tipo de soporte.

Como se mencionó en la impresión del primer prototipo, esta cuenta con superficies curvas pronunciadas en el interior de la geometría y en los extremos de la misma, por lo que configuramos la opción tipo de adhesión a la plataforma (Platform Adhesion Type).

Debido a que se redujo la escala del prototipo, aplicamos 3mm de margen extra, el espaciado entre líneas y otras características se configura como se observa en la figura a continuación:

Raft	
Extra margin (mm)	3
Line spacing (mm)	3.0
Base thickness (mm)	0.2
Base line width (mm)	1.0
Interface thickness (mm)	0.27
Interface line width (mm)	0.4
Airgap	0.0
First Layer Airgap	0.22
Surface layers	2
Surface layer thickness (mm)	0.27
Surface layer line width (mm)	0.4

Figura 166 Configuración de espesor y margen de la base

2. Configuración de espesor de mallado interno.

Debido a que en la prueba de la probeta de plástico ABS con el espesor de mallado interno del 5% resistió 166.1Kgf equivalentes a 1628.88N, valor que es mayor a 774.99N. Se imprimió con un espesor de mallado intermedio entre 5% y 15%, siendo este valor de 8%.

Fill	
Bottom/Top thickness (mm)	0.6
Fill Density (%)	8

Figura 167 Configuración de espesor de mallado (Fill Density) al 8%

3. Configuración de temperatura.

El plástico ABS se derrite desde una temperatura de 200°C en adelante, el fabricante del plástico marca “Maker Group” recomienda 230°C para la extrucción y una temperatura de cama caliente de 90°C.

Speed and Temperature	
Print speed (mm/s)	30
Printing temperature (C)	230
Bed temperature (C)	90

Figura 168 Configuración de temperatura de extrucción y de cama caliente

4. Impresión 3D del prototipo.

Se procedió con la impresión del prototipo, mismo que demora 15 horas con 43 minutos y ocupa 47.97 metros equivalentes en peso a 143 gramos de filamento como se aprecia a continuación:

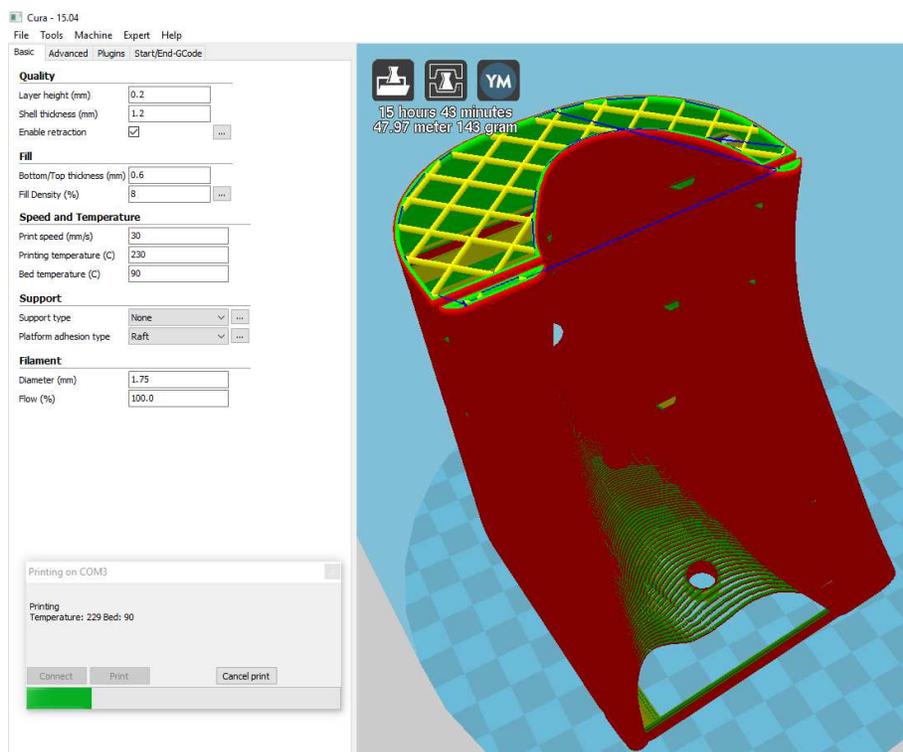


Figura 169 Trayectoria de la impresión en líneas rojas y visualización del espesor de mallado interno al 8% en líneas amarillas y verdes



Figura 170 Reducción de escala, tiempo de impresión y cantidad de material ABS necesario

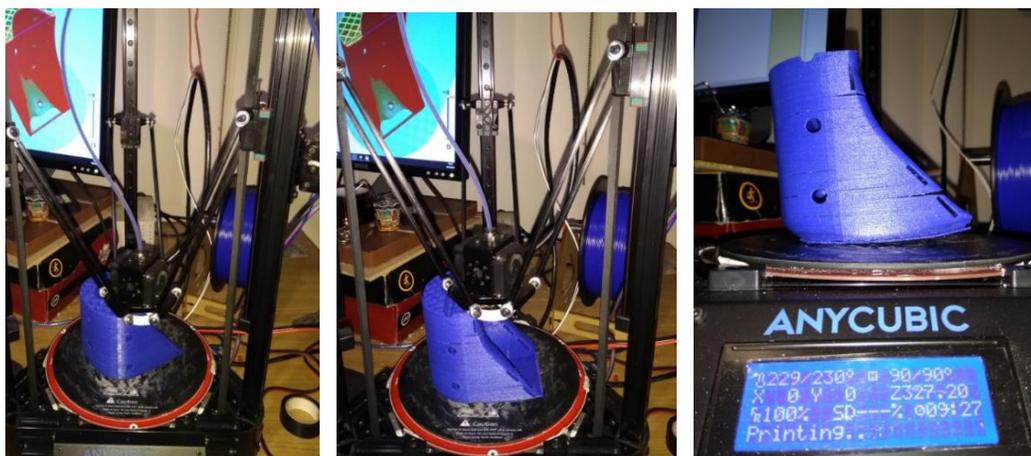


Figura 171, 172 y 173 Proceso de impresión de prototipo en ABS

Faltando dos horas con treinta y seis minutos para finalizar la impresión, la deformación del plástico ABS es evidente por lo que la pieza se despegó de su base parando el proceso de impresión e impidiendo un acabado total.

3.7 Evaluación de desempeño del prototipo desarrollado (Pruebas de campo)

Las pruebas se realizaron a la persona voluntaria que se sometió al escaneo 3D, estas consistieron en ajuste, fijación de tobillo con la cinta velcro y prueba de desplazamiento en la órtesis, las cuales nos permitieron realizar modificaciones.

3.7.1 Pruebas realizadas en el prototipo de órtesis de plástico PLA.

a) Prueba de ajuste y fijación de tobillo con la cinta velcro.

Al prototipo le agregamos cinta velcro de 1.5mm de espesor para que haya ajuste, la mencionada cinta fue adherida con pega Súper Bonder (Brujita) y UHU, dando una excelente resistencia y comodidad a la persona que utiliza el prototipo.



Figura 174 Fijación de tobillo con el prototipo de órtesis y la cinta velcro.

b) Prueba de soporte de peso del prototipo de órtesis.

El prototipo fue probado en la persona de sexo femenino con las siguientes características corporales y de carga:

Altura = 1.60m Masa o peso de la persona = 63.21 Kg

Gravedad = 9.81 m/s²

$$Fy = m * g \quad Fy = 63.21Kg * 9.81m/s^2 \quad Fy = 620N$$

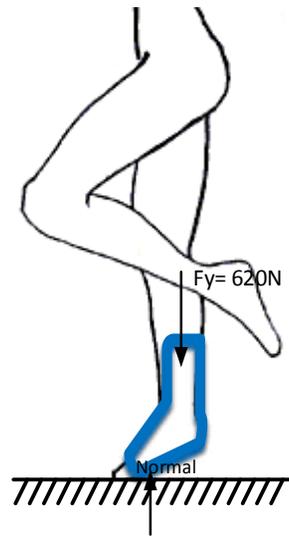


Figura 175 Diagrama de cuerpo libre con fuerza de 620N

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_y = 0 \quad -F_y + Normal = 0 \quad -620 + Normal = 0$$

$$N = 620N$$



Figura 176 y 177 Prueba de soporte de carga de 620N en el prototipo de órtesis.

Se recomendó a la persona voluntaria que realizó la prueba de carga, se cubra el pie con un calcetín para evitar posibles incrustaciones en el pie en caso de que el plástico se fracture.

c) Prueba de desplazamiento del prototipo de órtesis.

La prueba de desplazamiento se la realizó dando dos pasos hacia el frente.



Figura 178 y 179 Desplazamiento con el prototipo de órtesis.

3.7.2 Análisis de resultados

a) Prototipo impreso en plástico PLA.

El prototipo de órtesis diseñado en base a técnicas de escaneo e impresión 3D en plástico PLA, cumple el objetivo de inmovilizar el tobillo y pie, abriendo una gran posibilidad para el desarrollo de órtesis y prótesis personalizadas.

El porcentaje de la densidad de mallado (Fill Density) del 15% aplicado en la probeta de plástico PLA que fue sometida a prueba de laboratorio, evidencio que la carga máxima que puede soportar es de 186.3Kgf, es decir 1826.98N; siendo aproximadamente tres veces la fuerza ejercida y proporcionando una máxima deformación de 0.483mm, valor que es casi imperceptible. Generándonos excelentes resultados en la prueba de campo aplicando la carga de 620N.

Debido a que el prototipo impreso cuenta con alto detalle geométrico, vuelve cómodo su uso y su acople es lo más ergonómico posible.

Durante el desplazamiento del pie derecho el prototipo soporta el peso y la caminata es posible.

b) Prototipo impreso en plástico ABS.

Los problemas de adherencia del plástico ABS han sido evidentes en tres configuraciones distintas, por lo que se tuvo que reducir la escala para imprimir el prototipo. Sin embargo, en la segunda alternativa también se presentó deformación en el plástico, por lo que no fue posible finalizar la impresión del prototipo y no es posible realizar las pruebas pertinentes de campo en la persona.

Según las simulaciones mecánicas y las pruebas de laboratorio realizadas a las probetas, el material se desempeña de una excelente forma cuando se le somete a grandes cargas.

Al reducir la escala del prototipo, esta calza en un niño de 6 años, esto se puede apreciar en los anexos.

3.8 Propuesta de mejoras del diseño en la órtesis de tobillo y pie

La persona que probó la órtesis hizo las siguientes recomendaciones:

a) Diseño inicial.

El diseño del prototipo no cubre toda la extensión de la planta del pie. Esto se da porque el área de impresión de la impresora 3D Anycubic es de 18cm x 18cm, mientras que la longitud del pie escaneado es de 23 cm.

Es necesario alargar la órtesis en la base del pie aproximadamente 5cm, para que cubra toda la planta del pie, para esto se debe contar con una impresora 3D de mayor tamaño o diseñar la órtesis en partes para armarla.



Figura 180 Distancia a extender para recubrir planta de pie

b) Espesor de la base

El espesor frontal de la base del pie que es de 5mm permite el contacto de la planta y dedos del pie con el suelo, se recomienda que sea más grueso, debería tener un valor entre 10mm a 15mm, lo que permitirá mayor seguridad al asentar la planta del pie. Para dar solución a esto se puede agregar una suela de caucho.



Figura 181 Distancia a extender la parte inferior de la base



Figura 182 Plantilla de 10 mm agregada en base

No existe una norma dentro del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) para la construcción de órtesis, existe una norma INEN-ISO 22523 para realizar ensayos de prótesis en las personas.

A nivel mundial existen investigaciones con materiales termo formados que difieren en procedimiento relacionados con la impresión 3D. Una de estas investigaciones se da en el Hospital del Trabajador en Santiago de Chile, en el cual tienen una ficha en la que se indica que tipo de material termo formado se usa y cuál es el espesor del mismo.

<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 48px; margin-right: 10px;">11</div> <div> <p>Antiequino de reposo dorsal y ojal</p> </div> </div> <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: space-around; margin-top: 10px;">  <div style="font-size: 8px; text-align: right;"> <p>Terapia Ocupacional Departamento de Rehabilitación</p> </div> </div>	
<p>■ Descripción</p>	<p>Órtesis estática utilizada para mantener posición de tobillo en 90 grados.</p>
<p>■ Objetivos</p>	<p>Mantener posición del segmento en los grados requeridos para preparar la adquisición de posición de pie, especialmente en paciente con lesiones de partes blandas en pie y pierna.</p>
<p>■ Referentes anatómicos para la confección del molde</p>	<p>DORSAL</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tercio proximal de pierna. • Maléolos internos y externos. • Base del primer metatarsiano. <p>OJAL</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tercio proximal de pierna. • Base de metatarsianos. • Maléolo interno y externo.
<p>■ Especificaciones técnicas</p>	<p>DORSAL</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cobertura total dorsal de pie y pierna hasta tercio proximal de ésta. • Posicionamiento en moldeo tratando de alcanzar 90° de flexión, de pie con dedos en extensión. <p>OJAL</p> <ul style="list-style-type: none"> • Escotadura base de 1. y 5° MTT. • Zona anterior de pie incluyendo correa de sujeción en los grados requeridos.
<p>■ Sujeciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • DORSAL Correa de velcro de 5.0 cm de ancho ante pie, tercio inferior y superior de pierna. De ser necesario, tracción debe incluirse correa en x. • OJAL Correa en 1/3 inferior y superior de pierna.
<p>■ Puntos de presión posibles</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Primera y 5° MTT en bordes de escotadura. • Ambos maléolos. • Calcáneo.
<p>■ Materiales sugeridos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • TPBT de 3,2 mm de espesor, perforado. • Acolchado según disponibilidad. • Velcros de 5 cm de ancho.
<p>■ Uso y control</p>	<p>Indicaciones de uso:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Uso según objetivo y siempre sin carga. <p>Control:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Control al primer día y luego semanal en T.O.

Figura 183 Ficha técnica de materiales para órtesis con espesores
Fuente: (Isabel, 2011)

De acuerdo con la ficha en la figura anterior, el material utilizado es termoplástico que viene en planchas de 90cm x 60cm y 60cm x 45cm y que se flexibiliza al contacto con temperaturas de 60°C a 70°C; temperatura que es tolerada por el cuerpo humano. En cuanto a los espesores de las mencionadas planchas se los puede encontrar desde los 1.6mm a 3.2mm.

c) Forro interior.

Para mantener el pie y tobillo a una temperatura cómoda se recomienda poner gasa. El espesor de esta es de 0.5mm, por lo que las curvaturas internas de la órtesis no se pierden.

La gasa puede ser fijada con goma blanca, o con pegamento Cianoacrilato.

La esponja no es recomendable añadir a la órtesis en lugar de la gasa, debido a que no se consiguen espesores menores a 1mm, lo que hace que las curvaturas internas de la órtesis se pierdan.

En la parte interna de la órtesis puede ir gasa para calentar el pie y tobillo.



Figura 184 Parte interna que debe recubrirse con gasa



Figura 185 Gasa colocada en interior con Cianoacrilato

d) Agujeros para evitar sudor.

Los agujeros realizados en la planta para evitar el sudor deben ser reducidos su diámetro a 1mm. Esto debido a que pueden incrustarse elementos extraños como vidrios, clavos, etc.



Se debe reducir tapar los agujeros.

Figura 186 Agujeros innecesarios en la base de la órtesis

En este caso la gasa cubre los agujeros en la planta del pie, se aprecia en la figura anterior.

e) Material antideslizante.

Lamentablemente la irregularidad y tipos de materiales que componen las veredas y pisos pueden hacer que las personas resbalen cuando se presentan condiciones de lluvia y humedad.

Para evitar el deslizamiento durante la caminata en caso de que se presente un piso liso es necesario incorporar en la base de la órtesis una plantilla o taco de caucho, misma que debe ser de 10mm de espesor.

Es necesario adherir una base de caucho de 5mm a 10mm para evitar desplazamiento.



Figura 187 Agujeros a tapar en la base de la órtesis



Figura 188 Base de caucho antideslizante Colocada

3.9 Recomendaciones sobre el campo de aplicación de la órtesis de tobillo y pie desarrollada

El diseño de una órtesis personalizada mediante técnicas de escaneo 3D integra elementos de fijación adaptados a la anatomía, puede ser aplicada para personas que posean las mismas características dimensionales y que padezcan otras afectaciones físicas en el tobillo y pie.

El desarrollo de este prototipo evita la toma de medidas físicas, construcción mediante yeso y la aplicación de láminas de polietileno o acrílicas en las extremidades de los pacientes para obtener formas redondeadas, haciendo menos tedioso el proceso.

Se pueden agregar accesorios para mejorar sujeción como remaches, pasadores en la cinta velcro, correas y plantillas antideslizantes. Dichos accesorios son fáciles de encontrar en el mercado nacional a precios cómodos.

El diseño de una órtesis personalizada depende mucho de los gustos y necesidades de un cliente. Es importante mencionar que se puede tener un modelo estándar y ajustar las medidas a diferentes personas en el software de diseño CAD/CAE o en el software de impresión 3D.

Debido a la facilidad de manipulación de un escáner 3D, el diseño de una órtesis lo puede hacer un centro ortopédico e incluso clínicas de emergencias.

Se adjunta en el anexo 7.3, el criterio de funcionalidad de un ortopedista.

CAPITULO 4 - PROCEDIMIENTOS PARA EL DISEÑO Y ANÁLISIS DE COSTOS PARA PRODUCCIÓN DE ÓRTESIS DE TOBILLO Y PIE

Para el desarrollo de los procedimientos de escaneo 3D, diseño de la geometría, análisis mecánico e impresión 3D se utilizará diagramas de flujo de ejecución tipo matriz, el cual representa en forma gráfica el proceso. Tiene forma de matriz por que describe cuantitativamente las relaciones que existen entre las actividades productivas, y entre éstas y los usuarios finales de los bienes y servicios; registra en las columnas las disponibilidades de los productos; y en las filas la distribución de la oferta de acuerdo a las diferentes utilizaciones (intermedias y/o finales); asimismo, registra la generación del valor que cada actividad agrega durante el proceso productivo e ilustra los diversos participantes y el flujo de pasos entre esos participantes como se aprecia en el siguiente ejemplo:

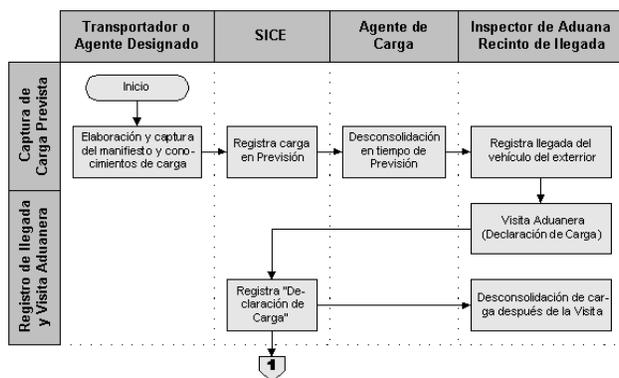


Figura 189 Diagrama matriz con detalle
Fuente: (Arízaga, 2012)

4.1 Simbología ANSI para diagramas de procesos y elaboración de diagramas.

La norma ANSI ha desarrollado una simbología para que sea empleada en los diagramas orientados al procesamiento electrónico de datos –EDP- con el propósito de representar los flujos de información, de la cual se han adoptado ampliamente algunos símbolos para la elaboración de los diagramas de flujo de procedimientos para un producto específico.

SIMBOLOGÍA

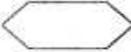
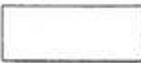
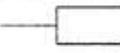
SÍMBOLO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
	Inicio o término	Señala donde se inicia o termina un diagrama; además se usa para indicar un órgano administrativo o puesto que realiza la actividad.
	Interconexión	Representa la conexión con otro procedimiento.
	Actividad	Representa la ejecución de una o más actividades de un procedimiento.
	Decisión	Indica las posibles alternativas dentro del flujo del procedimiento.
	Documento	Representa cualquier tipo de documento que entre o salga en el procedimiento.
	Archivo definitivo	Indica que se guarda un documento en forma permanente.
	Archivo temporal	Indica que se guarda un documento durante un período establecido.
	Anotación	Se usa para comentarios adicionales a una actividad y se puede conectar a cualquier símbolo del diagrama en el lugar donde la anotación sea significativa.
	Comunicación remota	Representa la transmisión de información entre dos o más órganos administrativos vía telefónica, telegráfica y de radio entre otros.
	Conector	Representa el enlace de actividades con otra dentro de un procedimiento.
	Conector de Página	Representa el enlace de actividades en hojas diferentes en un procedimiento.
	Dirección de flujo	Conecta símbolos, señalando el orden en que línea de unión debe realizarse.

Figura 190 Simbología de la norma ANSI

Fuente: (Institute, 2018)

La simbología descrita anteriormente se usó para la creación de los diagramas de proceso que a continuación se describen.

4.1.1 Diagrama de proceso para escaneo de tobillo y pie con XYZScan.

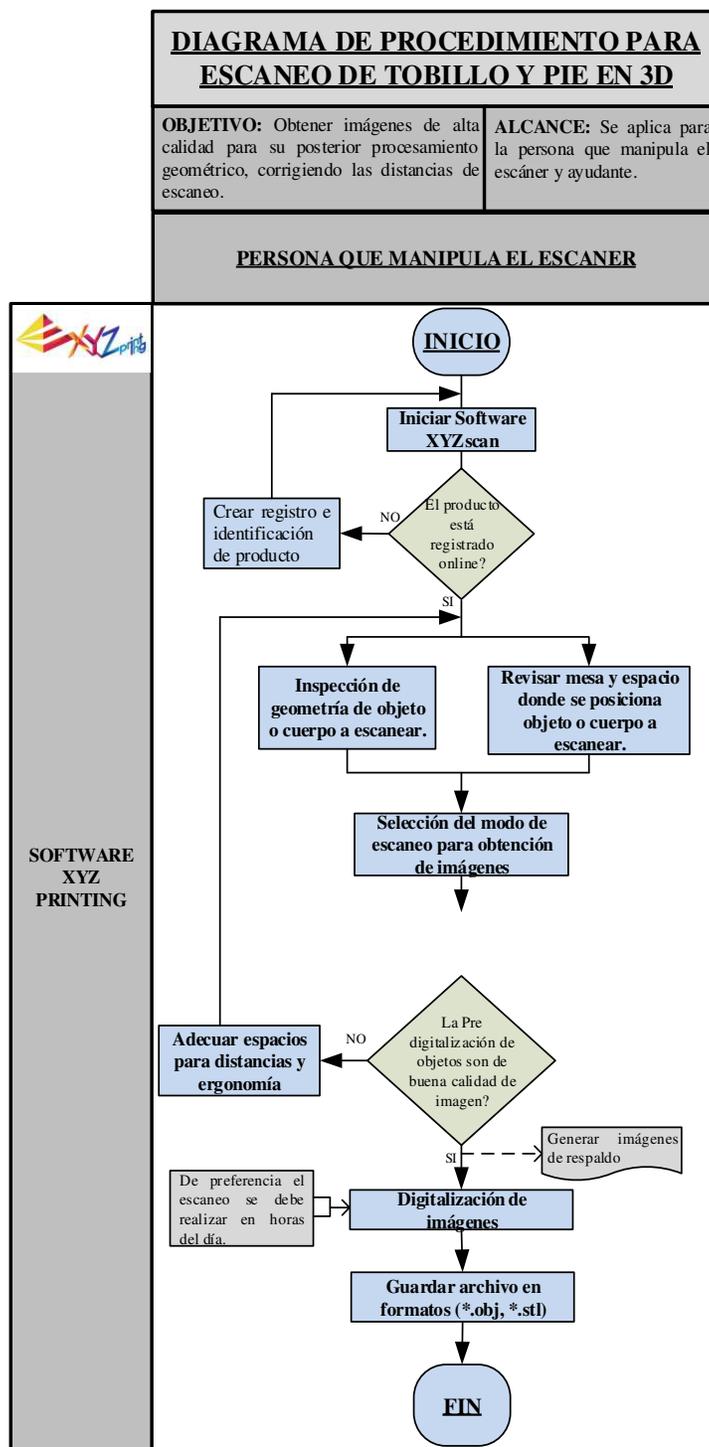


Figura 191 Diagrama de proceso de escaneo con software XYZ Scan Handy.

4.1.2 Diagrama de procedimiento para modelado en 3D con el software Solidworks 2017, partiendo de imágenes escaneadas en 3D

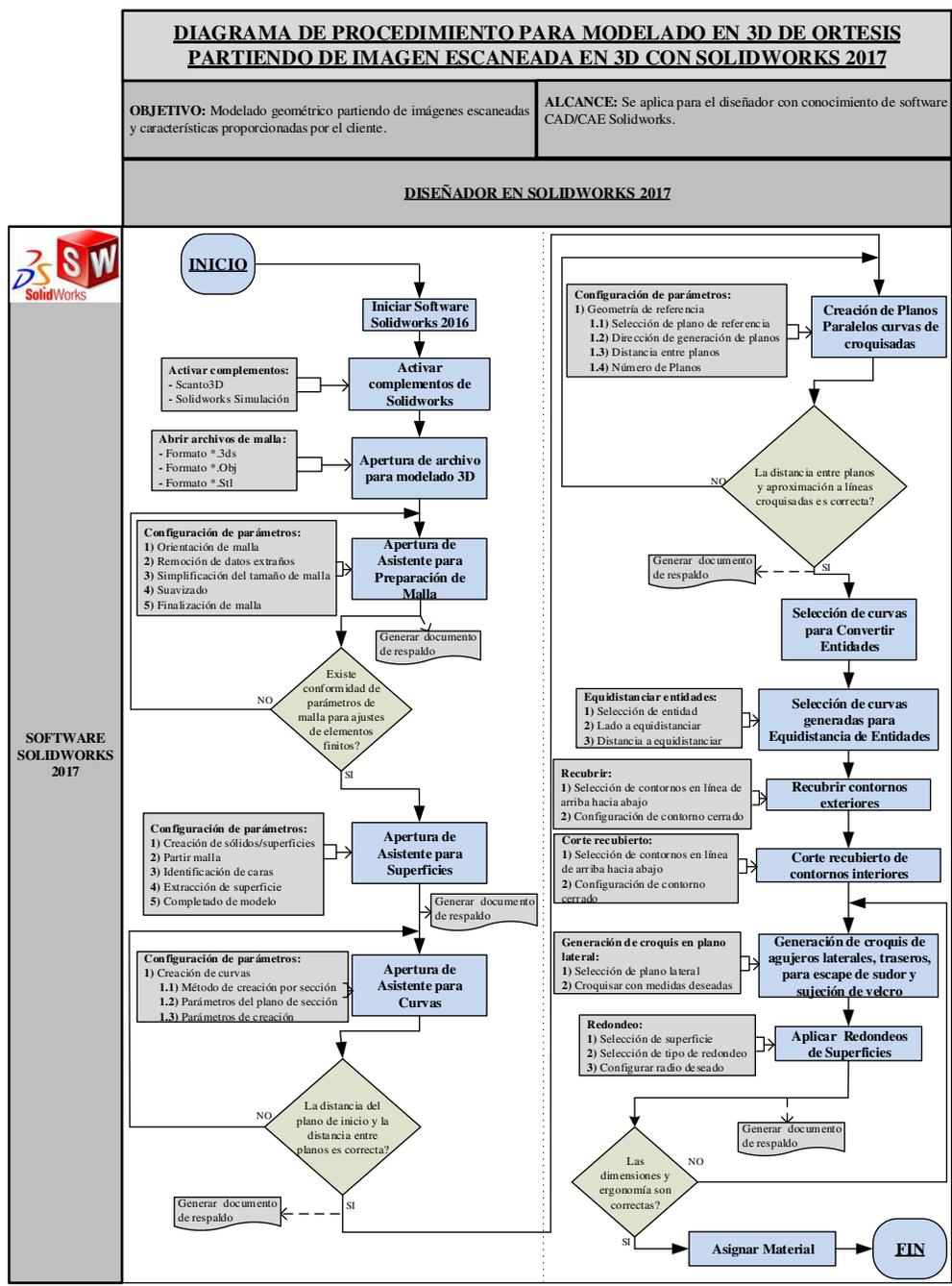


Figura 192 Diagrama de proceso de modelado de órtesis con software CAE

4.1.3 Diagrama de proceso de análisis mecánico de órtesis en Solidworks 2017

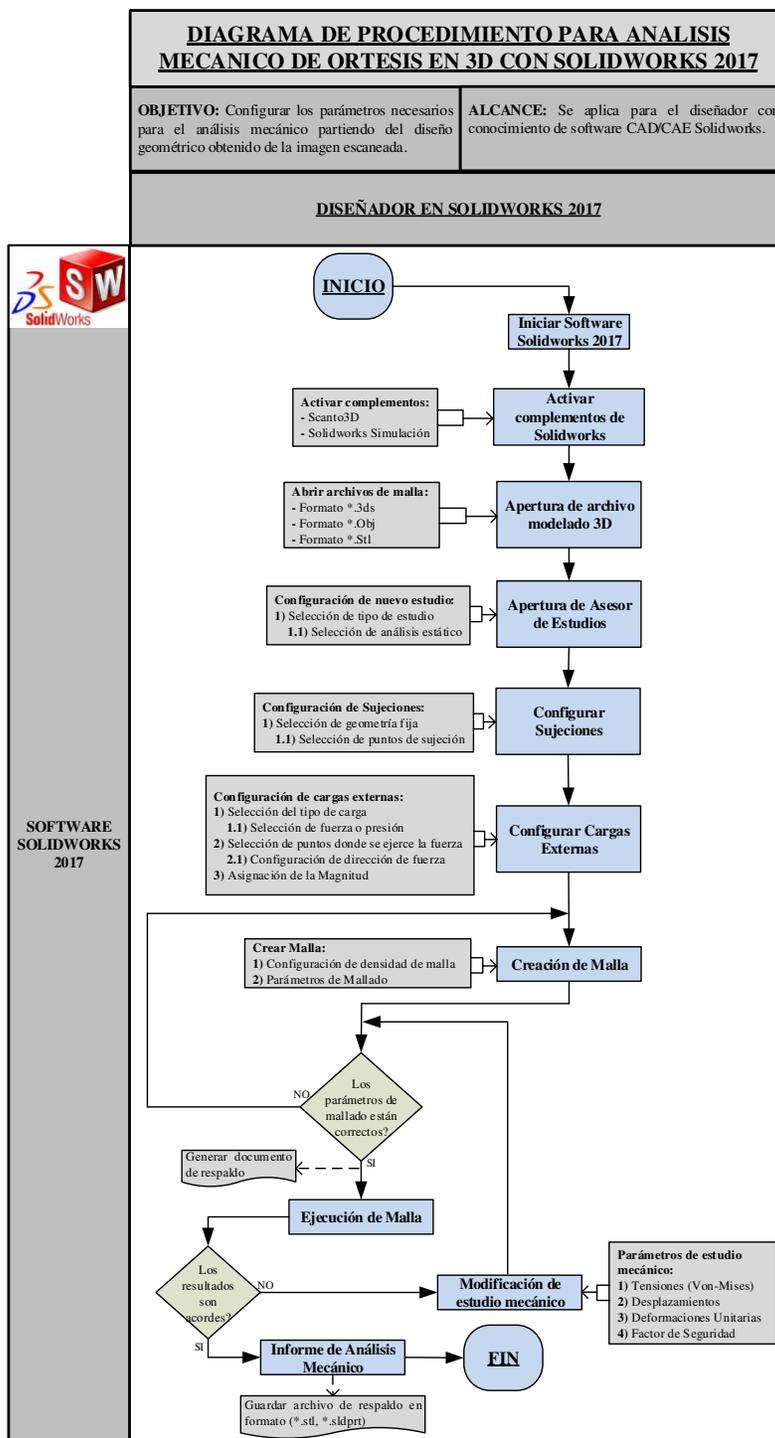


Figura 193 Diagrama de proceso de análisis mecánico de órtesis

4.1.4 Diagrama de proceso para corrección de archivo *. Stl con geometría incorrecta.

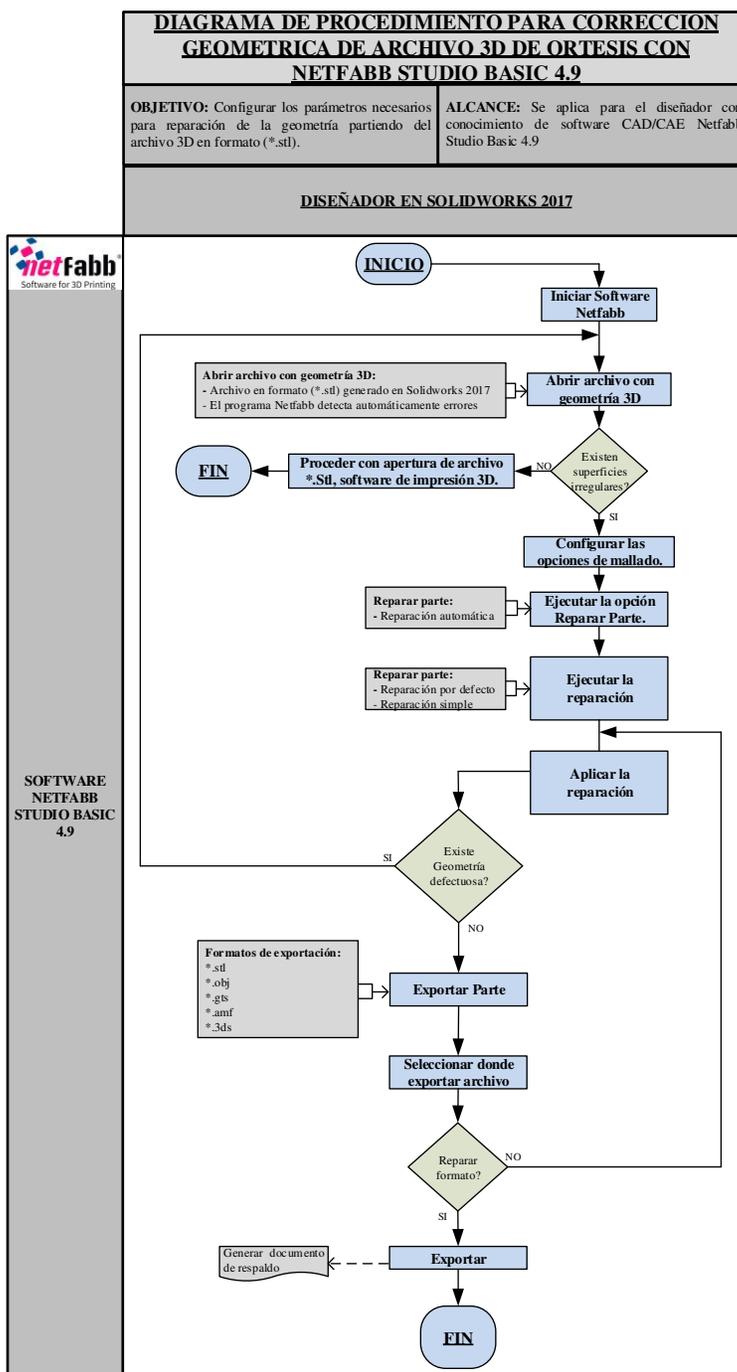


Figura 194 Diagrama de proceso de reparación de geometría en archivo 3d

4.1.5 Diagrama de proceso para impresión de órtesis en 3D con software Cura 15.04

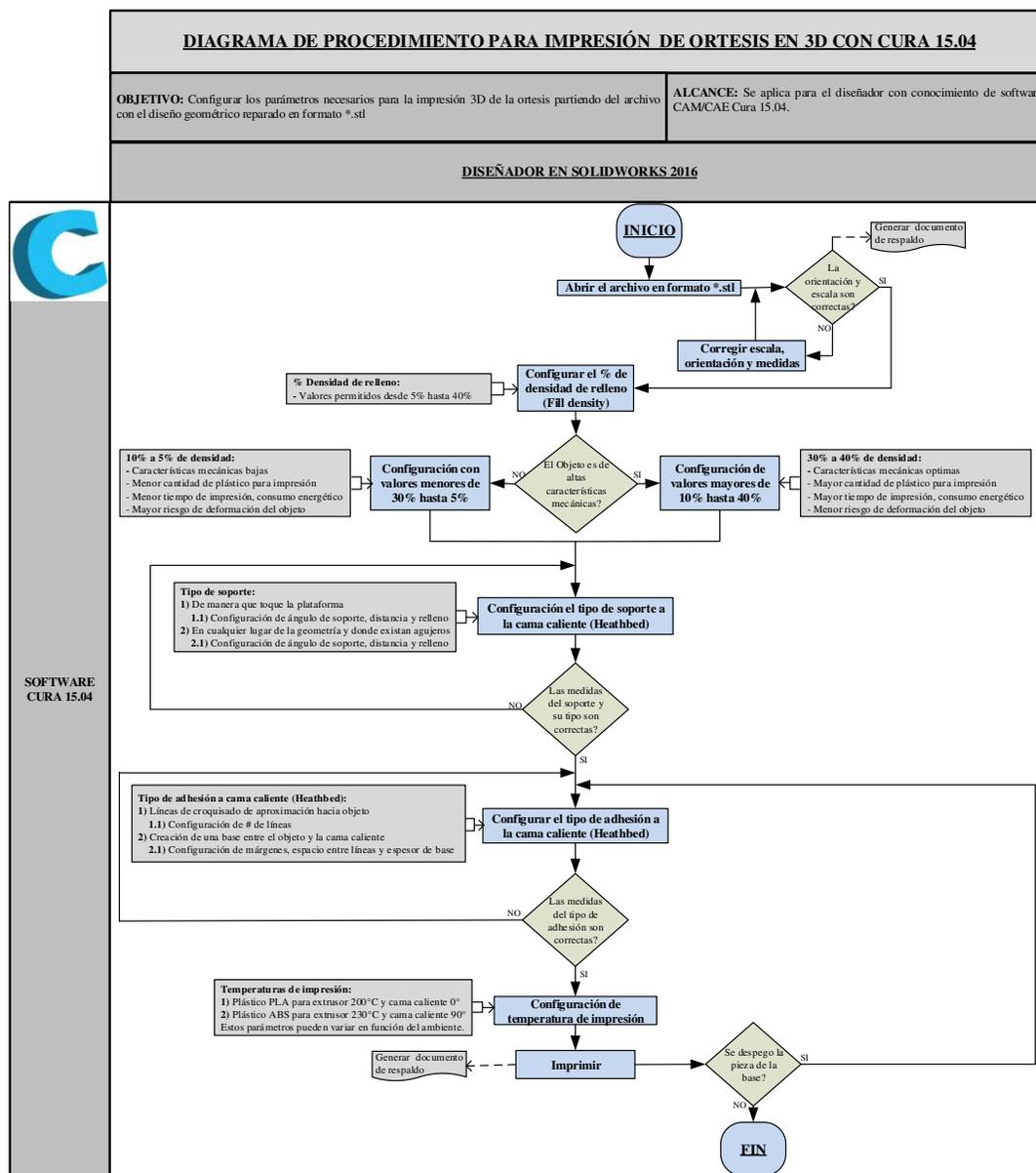


Figura 195 Diagrama de proceso de impresión de órtesis 3d con software Cura 14.04

4.2 Análisis de costos de equipos, servicios de escaneo e impresión y materiales.

Para el desarrollo de la presente investigación se adquirió escáner 3D, el kit de impresora Anycubic Kossel y dos rollos de filamento PLA en EEUU. El computador de escritorio se lo adquirió en Cuenca, en la siguiente tabla se detallan los costos:

Tabla 7*Costos de equipos*

COSTOS DE ADQUISICION DE EQUIPOS Y MATERIALES			
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO	TOTAL
Kit de Impresora 3D Anycubic modelo Kossel Linear	1	450.00	\$450.00
Escáner 3D XYZPrinting	1	200.00	200.00
Rollo de plástico PLA	2	45.00	90.00
Rollo de plástico ABS	2	65.00	130.00
CPU desktop de séptima generación	1	1000.00	1000.00
Costo de envíos de rollos de plástico	2	8.50	17.00
TOTAL:			1887.00

4.2.1 Costos de diseño e Impresión 3D a nivel nacional

En el Ecuador especialmente en las ciudades de Quito y Guayaquil existen centros de impresión 3D, en algunos casos se dedican al diseño puro e impresión y otros usan diseños existentes en internet. De los centros que han sido visitados no ofrecen servicio de escaneo 3D y el modelado de férulas, prótesis y órtesis no está desarrollado.

Entre los centros de diseño y desarrollo 3D consultados detallamos los siguientes:



Figura 196 Centro de diseño e impresión Sais 3D
Fuente: (www.sais3d.com, 2018)

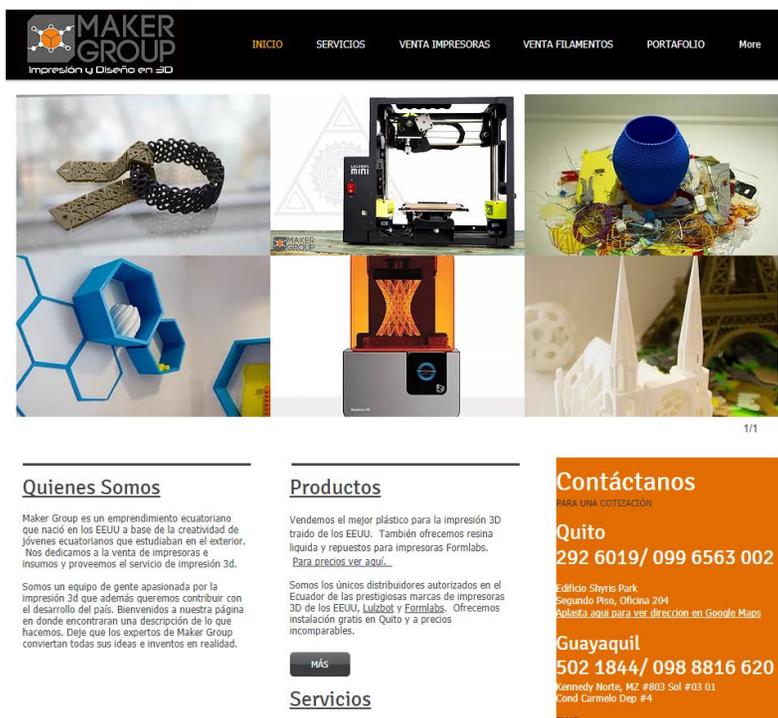


Figura 197 Centro de diseño e impresión Maker Group
Fuente: (Chiriboga, 2018)



Figura 198 Centro de diseño e impresión Andina 3D

Fuente: (www.andina3d.com, 2018)

En la ciudad de Cuenca no existen centros de impresión 3D, existen estudios de diseño que realizan impresiones con precios distintos a Quito y Guayaquil. En las siguientes tablas apreciamos los costos:

Tabla 8

Costos de servicio de diseño e impresión 3D en Cuenca

\$ Costo/Hora de Diseño	\$ Costo/Hora de Impresión	\$ Costo/Gramo de Plástico
6,00	2,50	0,10

Tabla 9

Costos de servicio de diseño e impresión 3D en Quito y Guayaquil

\$ Costo/Hora de Diseño	\$ Costo/Hora de Impresión	\$ Costo/Gramo de Plástico
10,00	3,00	0,10

4.2.2 Costo de Filamento a nivel nacional.

Para proveer el servicio de impresión, el primer costo considerado es el del filamento, el cual lo definimos sabiendo los gramos de material empleados. Esto se puede definir calculando los metros consumidos teniendo en cuenta su densidad (los proyecta el software de generación de archivos de impresión 3D).

Tabla 10

Precios de Filamentos en Ecuador

Pais de Fabricación	Tipo de filamento de diámetro 1,75mm 1Kg	<u>SAIS 3D</u>	<u>MAKERGROU P</u>	<u>ANDIN A 3D</u>	Costo promedio sin IVA	Costo promedio incluido IVA	Envío a nivel nacional	COSTO TOTAL
China	PLA PRO (Baja calidad)	35,00	35,00	33,00	34,33	38,45	3,11	41,56
EEUU	PLA Premium (Alta calidad)	50,00	47,00	45,00	47,33	53,01	3,11	56,12
China	ABS	45,60	47,00	46,5	46,37	51,93	3,11	55,04

Los costos detallados en la tabla anterior se pueden apreciar en las facturas de compra adjuntas en los anexos.

a) Costo de gramo en plástico ABS.

En el cálculo consideramos que el valor del IVA en Ecuador es el 12% y que cada rollo pesa 1Kg = 1000g

- Costo de 1 Rollo de plástico ABS sin IVA = \$49.5
- Costo de 1 Rollo de plástico ABS con 12% IVA = (\$49.5 * 1.12) = \$55.44

$$\frac{\text{Costo ABS}}{\text{gramo}} = \frac{(1g * \$55.44)}{1000g} = 0.06 \text{ Cts}$$

Los centros de impresión 3D a nivel nacional cobran \$0.15 centavos el gramo de material ABS, con un margen de ganancia de \$0.09.

b) Costo de gramo en plástico PLA.

De igual manera en el cálculo debemos tomar en cuenta que el valor del IVA en Ecuador es el 12% y que cada rollo pesa 1Kg = 1000g.

- Costo de 1 Rollo de plástico PLA sin IVA = \$35.00

- Costo de 1 Rollo de plástico PLA con 12% IVA = $(\$35.00 * 1.12) = \39.20

$$\frac{\text{Costo PLA}}{\text{gramo}} = \frac{(1g * \$39.20)}{1000g} = 0.04 \text{ Ctvs}$$

Los centros de impresión 3D a nivel nacional cobran \$0.10 centavos el gramo de material PLA, con un margen de ganancia de \$0.06.

4.2.3 Costos de servicios de escaneo, diseño e impresión 3D

4.2.3.1 Amortización de la impresora y escáner 3D.

Otro componente del costo que es considerado, en el servicio de escaneo e impresión es la amortización de la impresora 3D y el escáner 3D ya que se tendría que recuperar el coste de los equipos en un plazo inferior a la vida esperada de los mismos. Se podría amortizar por tiempo fijo o por horas de uso. Un plazo razonable por tiempo para una impresora con un uso medio (5h/día) sería de dos a tres años, para el escáner con uso medio de (2h/día) es de un año a año y medio. Además, en estos plazos es posible que tecnológicamente los equipos queden ligeramente desfasados.

- **A** = Coste de Amortización del equipo.
- **Vc** = Valor de compra del equipo.
- **Vr** = Valor residual, es el valor de venta que se prevé que tendrá el equipo cuando se la cambie.
- **T** = Años de vida del equipo, son los años que se estima darle uso al equipo.
- **H** = Horas de trabajo al año del equipo.

Para los cálculos nos remitimos a la tabla 7, donde se detallan los costos de adquisición de los equipos. En el cálculo del costo de amortización se contaron las horas de trabajo estimadas que la impresora funcione; según las impresiones realizadas se asume que 5 horas al día por 10 días laborables por mes.

a) Cálculo de amortización para impresora 3D Anycubic Kossel Linear.

$$Vc_{\text{Impresora 3D}} = \$450.00 \quad Vr_{\text{Impresora 3D}} = \$245.00$$

$$T_{\text{Impresora 3D}} = 2 \text{ años}$$

$$H = \frac{5h}{\text{día}} * \frac{(10\text{días} * 12\text{meses})}{\text{año}} \quad H = \frac{600h}{\text{año}}$$

$$A_{\text{Impresora 3D}} = \frac{\left(\frac{Vc-Vr}{T}\right)}{H} \quad A_{\text{Impresora 3D}} = \frac{\left(\frac{450-345}{2}\right)}{600h/\text{año}}$$

$$A_{\text{Impresora 3D}} = 0.17 \text{ ctvs / hora}$$

b) Cálculo de amortización para Escáner 3D XYZprinting.

$$Vc_{\text{Escáner 3D}} = \$200.00 \quad Vr_{\text{Escáner 3D}} = \$140.00$$

$$T_{\text{Escáner 3D}} = 1.5 \text{ año}$$

$$H = \frac{2h}{\text{día}} * \frac{60\text{días}}{\text{año}} \quad H = \frac{120h}{\text{año}}$$

$$A_{\text{Escáner 3D}} = \frac{\left(\frac{Vc-Vr}{T}\right)}{H} \quad A_{\text{Escáner 3D}} = \frac{\left(\frac{200-140}{1.5}\right)}{120h/\text{año}}$$

$$A_{\text{Escáner 3D}} = 0.33 \text{ ctvs / hora}$$

4.2.3.2 Costo de consumo de impresora 3D.

Este costo es muy importante, permite calcular el verdadero valor que cobramos por el servicio de diseño e impresión 3D. Esto dependerá de las características de la impresora 3D, en promedio las impresoras 3D consumen desde los 225W hasta los 360W.

Para la impresión 3D se cuenta con un kit de impresión de manufactura China, siendo este de gama media y cuenta con una amplia gama de repuestos. A continuación, se detalla las características del equipo:

Technical Specification

PRINTING

Printing Technology:	FDM (Fused Deposition Modeling)
Build Size:	Ø180×300 mm (Ø230×300 mm for Linear Plus)
Layer Resolution:	0.1-0.4 mm
Positioning Accuracy:	X 0.01 mm Y 0.01 mm Z 0.01 mm
Extruder Quantity:	Single
Nozzle Diameter:	0.4 mm
Print Speed:	20~80mm/s
Travel Speed:	150mm/s
Supported Print Materials:	PLA, ABS, HIPS, Wood

TEMPERATURE

Ambient Operating Temperature:	8°C - 40°C
Operational Extruder Temperature:	275°C
Operational Print Bed Temperature:	N/A

SOFTWARE

Slicer Software:	Cura
Cura Input Formats:	.STL, .OBJ, .DAE, .AMF
Cura Output Formats:	GCode
Connectivity:	SD Card, USB Port (expert users only)

ELECTRICAL

Input Rating:	100-240V AC, 50/60Hz, 1.5A
---------------	----------------------------

PHYSICAL DIMENSIONS

Printer Dimensions:	315mm (Δ) × 680mm (Height) 380mm (Δ) × 680mm (Height) for Linear Plus.
Weight:	~5kg-Pulley, ~6kg-Linear, ~6.8kg-Linear Plus

Figura 199 Características de la impresora Anycubic Kossel Linear
Fuente: (David, 2017)

a) Consumo energético con impresión en plástico PLA.

Para los cálculos de consumo energético se tomó como base las horas de funcionamiento de los equipos durante el diseño que es de tres meses, y el consumo energético durante impresión del prototipo de órtesis en plástico PLA. A excepción del escáner que se usó por 5 horas para la toma de imágenes.

Cálculo de potencia general de la impresora 3D sin el accesorio de cama caliente (Heathbed).

$$\text{Voltaje de la impresora Anycubic Linear 3D} = \frac{100v+240v}{2} = 170V$$

$$\text{Amperaje de la impresora Anycubic Linear 3D} = 15A$$

$$P_{imp} = V * I \quad P_{imp} = 170V * 1.5A$$

$$P_{imp} = (255W/H)/1000W$$

$$P_{imp} = 0.255Kwh$$

Calculo de consumo de potencia por horas de impresión de órtesis en plástico PLA

EL Software Cura 15.04 calcula el tiempo de impresión en plástico PLA. En el caso de la órtesis en plástico PLA con temperatura de extrucción de 200°C y de cama caliente de 0°C y densidad de relleno de 15% el tiempo es de 30 horas con 18 minutos. Estos datos los transformamos a horas para poder calcular el consumo en la impresión.

$$18min \times \frac{1h}{60min} = 0.3h \quad \#Horas \text{ total} = 30h + 0.3h$$

#Horas total = 30.3h en un día

$$\begin{aligned} & \text{Consumo por horas de impresión en plástico PLA en 30.3h de uso} \\ & = \frac{(0.255Kwh * 30.3h)}{1h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Consumo por horas de impresión en plástico PLA en 30.3h de uso} \\ & = 7.73Kwh \end{aligned}$$

Calculo consumo de potencia por horas de CPU.

La computadora de escritorio adquirida es de gama media, teniendo una potencia del CPU de 220W.

$$\begin{aligned} & \text{Consumo de CPU por 744 horas (8 horas diarias en 3 meses) de diseño de prototipo} \\ & = \frac{(0.22Kwh * 744h)}{1h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Consumo de CPU por 744 horas (8 horas diarias en 3 meses) de diseño de prototipo} \\ & = 163.68Kwh \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Consumo de CPU por impresion de prototipo, en 30.3h de uso} \\ & = \frac{(0.22Kwh * 30.3h)}{1h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Consumo de CPU por impresion de prototipo, en 30.3h de uso} \\ & = 6.67Kwh \end{aligned}$$

Calculo consumo de potencia de monitor por horas.

Nuestra computadora posee dos monitores, cada uno con una potencia del monitor 40W.

Consumo de monitores por 744 horas (8 horas diarias en 3 meses)de diseño

$$= \frac{(0.04Kwh * 2 * 744h)}{1h}$$

Consumo de monitores por 744 horas (8 horas diarias en 3 meses)de diseño

$$= 59.52Kwh$$

Consumo de monitores por impresion de prototipo de los monitores en 30.3h de uso

$$= \frac{(0.04Kwh * 2 * 30.3h)}{1h}$$

Consumo de monitores por impresion de prototipo de los monitores en 30.3h de uso

$$= 2.42Kwh$$

Calculo de consumo de potencia por horas de escáner 3D

El escáner 3D se utilizó por 5 horas, consumiendo una potencia de escáner 2.25W.

$$Consumo por escaneo de tobillo y pie en 5h = \frac{(0.0025Kwh * 5h)}{1h}$$

$$Consumo por escaneo de tobillo y pie en 5h = 0.0125Kwh$$

Calculo total de consumo energético y costo

En la siguiente tabla podemos apreciar el consumo total de energía durante el desarrollo del prototipo de órtesis en plástico PLA.

Tabla 11*Consumo total de energía de los equipos*

Descripción	Kwh
Consumo por 30,3 horas de impresión en plástico PLA, sin cama caliente	7,73
Consumo de CPU por 744 horas de diseño de prototipo	163,68
Consumo de CPU por impresión de prototipo en 30,3 horas	6,67
Consumo de monitores por 744 horas de diseño	59,52
Consumo de monitores por impresión de prototipo en 30,3 horas	2,42
Consumo por escaneo de tobillo y pie en 5 horas	0,0125
TOTAL: 240,03	

A continuación, se detalla la tabla de costos en Suramérica del Kwh por país.

PAÍS	Residencial				Comercial	Industrial
	Consumo mensual (kW.h)					
	30	150	300	1000		
Argentina	5,77	4,37	3,90	4,72	5,39	2,98
Bolivia	7,46	5,82	7,07	7,97	10,76	11,49
Brasil	12,06	13,23	13,89	15,48	15,52	11,56
Chile	15,80	13,55	13,27	13,07	10,61	8,89
Colombia	10,59	10,84	11,65	12,22	10,31	9,57
Ecuador	6,33	9,05	10,24	12,87	9,68	8,56
Paraguay	1,31	2,84	4,44	6,09	6,56	2,94
Perú	12,37	14,27	14,03	13,86	10,96	7,76
Uruguay	29,58	13,01	19,65	20,29	15,57	10,98
Venezuela	0,84	0,29	0,94	1,30	0,85	0,52

Figura 200 Costo del KWH en Suramérica

Fuente: ((CERES), 2017)

Con el dato de consumo total equivalente a 240.03Kwh, realizamos una interpolación entre los valores de consumo mensual de 150Kwh y 300Kwh con sus costos, obteniendo lo siguiente:

Tabla 12*Datos de interpolación para calcular el costo de 240.03 KWH*

kwh	Costo
x1 150	9,05 y1
x 240,03	--- y
x2 300	10,24 y2

$$y = y_1 + \left[\left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right) * (y_2 - y_1) \right]$$

$$y = 9.05 + \left[\left(\frac{240.03 - 150}{300 - 150} \right) * (10.24 - 9.05) \right]$$

$$y = \$9.76$$

b) Consumo energético con impresión en plástico ABS.

Calculo de potencia general de la impresora 3D y el accesorio de cama caliente (Heathbed).

$$\text{Voltaje de la impresora Anycubic Linear 3D} = \frac{100v + 240v}{2} = 170V$$

$$\text{Amperaje de la impresora Anycubic Linear 3D} = 1.5A$$

$$P1 = V * I \quad P1 = 170V * 1.5A \quad P1 = (255W/H)/1000W \quad P1 = 0.255 \text{ Kwh}$$

$$\text{Voltaje de la cama caliente (heath bed) Anycubic Linear 3D} = 12V$$

$$\text{Amperaje cama caliente (heath bed) Anycubic Linear 3D} = 8A$$

$$P2 = V * I \quad P2 = 12V * 0.8A \quad P2 = (96W/H)/1000W \quad P2 = 0.096 \text{ Kwh}$$

$$Pt = P1_{\text{impresora}} + P2_{\text{cama caliente}} = 0.255\text{Kwh} + 0.096\text{Kwh} \quad Pt = 0.351 \text{ Kwh}$$

Calculo de costo por horas de plástico ABS

EL Software Cura 15.04 calcula el tiempo de impresión en plástico ABS. En el caso de la órtesis en plástico ABS con temperatura de extrucción de 230°C y de cama caliente de 90°C y densidad de relleno de 8% el tiempo es de 15 horas con 43 minutos. Estos datos los transformamos a horas para poder calcular el consumo en la impresión.

$$43\text{min} * \frac{1h}{60\text{min}} = 0.72h$$

$$\#Horas \text{ total} = 15h + 0.72h \quad \#Horas \text{ total} = 15.72h \text{ en un día}$$

Consumo por horas de impresión en plástico PLA en 15.72h de uso

$$= \frac{(0.351\text{Kwh} * 15.72h)}{1h}$$

Consumo por horas de impresión en plástico PLA en 15.72h de uso

$$= 5.52\text{Kwh}$$

Cálculo de potencia por horas de CPU.

La computadora de escritorio adquirida es de gama media, teniendo una potencia del CPU de 220W.

Consumo de CPU por impresion de prototipo, en 15.72h de uso

$$= \frac{(0.22Kwh * 15.72h)}{1h}$$

Consumo de CPU por impresion de prototipo, en 15.72h de uso

$$= 3.46Kwh$$

Calculo de potencia de monitor por horas.

Nuestra computadora posee dos monitores, cada uno con una potencia del monitor 40W.

Consumo de monitores por impresion de prototipo de los monitores en 15.72h de uso

$$= \frac{(0.04Kwh * 2 * 15.72h)}{1h}$$

Consumo de monitores por impresion de prototipo de los monitores en 15.72h de uso

$$= 1.26Kwh$$

Calculo total de consumo energético y costo

En la siguiente tabla podemos apreciar el consumo total de energía durante el desarrollo del prototipo de órtesis en plástico PLA.

Tabla 13.

Consumo total de energía de los equipos

Descripción	Kwh
Consumo por 15,72 horas de impresión en plástico ABS, con cama caliente	5,52
Consumo de CPU por 15,72 horas de impresión en plástico ABS, con cama caliente	3,46
Consumo de monitores por impresión de prototipo en 15,72 horas	1,26
TOTAL:	10,24

Con el dato de consumo total equivalente a 10.24Kwh, realizamos una interpolación entre los valores de consumo mensual de 150Kwh y 300Kwh con sus costos, obteniendo lo siguiente:

Tabla 14

Datos de interpolación para calcular el costo de 10.24 KWH

	kwh	Costo	
x	10,24	---	y
x1	30	6,33	y1
x2	150	9,05	y2

$$y = y1 + \left[\left(\frac{x - x1}{x2 - x1} \right) * (y2 - y1) \right]$$

$$y = 6.33 + \left[\left(\frac{10.24 - 30}{150 - 30} \right) * (9.05 - 6.33) \right]$$

$$y = \$5.88$$

4.2.3.3 Costo de reparaciones (mantenimiento) de la impresora.

También se debe considerar las reparaciones que para un uso medio de los equipos 3D durante el plazo de amortización anteriormente considerado se puede tomar en cuenta por norma general que va a ser de un 10% del precio de adquisición de los equipos. Por tanto, se deberá sacar los \$/hora de la amortización de los equipos 3D y así repercutirlo a la pieza final.¹³

$$\text{Costo de la impresora 3D} = \$450.00$$

$$\text{Costo del Escáner 3D} = \$200.00$$

$$\text{C. M. Impresora 3D} = \$450.00 * 0.10 = \$45.00$$

$$\text{C. M. Escáner 3D} = \$200.00 * 0.10 = \$20.00$$

La impresora puede realizar más de 300 impresiones dependiendo del tiempo de uso y la temperatura a la que es sometido el extrusor, por lo tanto, se consideró en cada impresión el valor de un dólar para la adquisición de repuestos.

¹³Costos de impresión 3D

4.2.3.4 Costo de preparación y post-procesado.

En estos costos entran por ejemplo las lacas (Media=0.5cm³/impresión) o láminas antiwarping, los lubricantes, los productos de acabado así como el propio tiempo de post-procesado y supervisión (sacar soportes, lijar, pulir, pintar, etc.).

- Goma blanca en barra \$1.00
- Rollo de cinta Kapton \$5.00
- Pintura en aerosol \$2.00
- Brocas y discos de corte para motor dremel \$10.00
- Papel lija \$0.54 dependiendo del gramado

Este costo puede variar de acuerdo al valor de los aditamentos y herramientas que se usan, pudiendo en el modelo final tener un valor base de \$5.00.

4.2.3.5 Costo de adquisición de imágenes.

- Tiempo de escaneo: 1 a 2 horas dependiendo de las dimensiones del objeto
- El costo es de \$5.00 por objeto, incluye la toma de medidas físicas, el tiempo de escaneo 3D y procesado de imagen.

Para el diseño de la órtesis se hizo 4 tomas de medidas físicas y 6 escaneos en diversas posiciones, además de las imágenes obtenidas por error, lo que duró 5 horas por lo siendo costo total de ($\$5.00 * 5h = \25.00)

4.2.3.6 Costo de diseño de pieza (precios aproximados)

- Tiempo de diseño: 744 horas (8 horas por 93 días) para personas con destreza básica en software CAD/CAE, para personas con conocimientos avanzados toma dos semanas (10 días), trabajando 4 horas diarias.
- Ingeniero con maestría en diseño por hora de diseño \$6.00

Asumiendo que el diseñador de la órtesis tiene conocimientos avanzados en software CAD/CAE y realiza el diseño en 40 horas por dos semanas, el costo equivaldría a \$240.00. Este es el costo de diseño para la producción de una sola pieza.

A mayor número de piezas, el número de horas de diseño podría ser mayor o menor por cada pieza dependiendo del diseño personalizado, por lo tanto, la cantidad de producción influirá en los beneficios.

4.2.3.7 Costo de puesta en marcha

Asumiendo que el operador de impresora 3D a dedicación plena (1 hora por cada modelo):

- Para la configuración de parámetros de impresión y puesta en marcha de la impresora, se necesita 1 hora
- Asumimos el costo de \$10.00, por hora de configuración de parámetros. Si producimos más partes para conformar la pieza final, consideramos que cada parte conlleva un tiempo de puesta en marcha de la máquina.

4.2.3.8 Costo de la no calidad.

También llamado coste de las impresiones fallidas. Bien sea porque aparece durante la impresión efecto warping, efecto cracking, o porque se va la corriente y no se dispone de un SAI (Sistema de alimentación ininterrumpida), o incluso porque se diseña mal la pieza. Cuando se presupuesta no se sabe si va ha haber costes de no calidad, pero siempre se debe considerar para cubrir los posibles fallos, en este caso consideramos el 27% del costo total del consumo de equipos más el costo total de consumo de plástico PLA durante la impresión.

El uso de materiales baratos no es bueno, en muchos casos puede dar lugar a un atasco a medio camino a través de la impresión, lo que requiere que la impresión se reinicie y la impresión del objeto quede descartada.

4.3 Análisis técnico económico de la implementación de los resultados.

El Costo total de impresión es la suma de los siguientes:

- +Costo de materiales para adherencia y acabad*
- +Costo de consumo de potencia total de todos los equip*
- +Costo de adquisicion de imágenes 3d*

+Costo de diseño de pieza
+Costo de consumo de filamento
+Costo de puesta en marcha de impresora 3D
+Costo de impresión 3D
+Costo de no calidad (27%)
+Costo de reparación de impresora

Los equipos de escaneo e impresión 3D incluyen software por lo que el análisis técnico económico depende de los costos de diseño, impresión y adquisición de materiales analizados anteriormente en la sección de costos a nivel nacional, además de la revisión de precios de órtesis similares en el mercado ecuatoriano. El costo de compra de repuestos es de \$1.00 por cada impresión, como se detalló en la sección de costos de reparación.

En la siguiente tabla observamos los costos del desarrollo de una órtesis impresa en plástico PLA, inicialmente considerando las 744 horas de diseño (8 horas por 93 días), para un diseñador de poca destreza en software CAD/CAE.

Tabla 15

Costo de órtesis impresa en plástico PLA, considerando poca destreza en el software CAD/CAM

Costo de materiales para adherencia y acabado	Goma Blanca en barra (\$)	Rollo de cinta kapton (\$)	Pintura Aerosol (\$)	Brocas y discos de corte para motor dremel	Papel Lija (\$)	<u>SUBTOTAL (\$)</u>
	1,00	5,00	2,00	10,00	0,54	3,71
Costo de consumo de potencia total de todos los equipos en KWH	Potencia total de todos los equipos = 240,03 KWH					<u>SUBTOTAL (\$)</u>
	9,76					9,76
Costo de adquisición de imágenes 3d	Horas de toma de medidas, escaneo 3D y proceso de imágenes		Costo de hora por proceso (\$)		<u>SUBTOTAL (\$)</u>	
	5,00		5,00		25,00	
Costo de diseño de pieza	Horas de diseño de ortesis		Costo de hora de diseño (\$)		<u>SUBTOTAL (\$)</u>	
	744		6,00		4464,00	
Costo de consumo de filamento	Cantidad de gramos necesarios para la impresión 3D		Costo de gramo de plástico PLA en mercado nacional (\$)		<u>SUBTOTAL (\$)</u>	
	281		0,10		28,10	
Costo de puesta en marcha de impresora 3D	Horas de puesta en marcha de impresora 3D		Costo de hora de puesta en marcha (\$)		<u>SUBTOTAL (\$)</u>	
	1		10,00		10,00	
Costo de impresión 3D	Horas de impresión 3D de la ortesis (\$)		Costo de hora de impresión en el mercado nacional(\$)		<u>SUBTOTAL (\$)</u>	
	30,3		3,00		90,90	
Costo de no calidad (27% Costo total de consumo de equipos + Costo total de consumo de plástico)	Costo total de consumo de equipos		Costo total de consumo de plástico		<u>SUBTOTAL (\$)</u>	
	9,76		28,10		10,22	
Costo de reparación de impresora	Costo de reparación de la impresora					<u>SUBTOTAL (\$)</u>
	1,00					1,00
COSTO TOTAL :						4642,69

En la siguiente tabla observamos los costos del desarrollo de una órtesis impresa en plástico PLA, cuando el diseñador posee altas destrezas en el software CAD/CAE. El tiempo de diseño es 40 horas (4 horas por 10 días), los materiales para adherencia y acabado no se consideran y las horas de escaneo son menores.

Tabla 16

Costo de órtesis impresa en plástico PLA, considerando alta destreza en el software CAD/CAM

Costo de materiales para adherencia y acabado	Goma Blanca en barra (\$)	Rollo de cinta kapton (\$)	Pintura Aerosol (\$)	Brocas y discos de corte para motor dremel	Papel Lija (\$)	<u>SUBTOTAL (\$)</u>
	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00
Costo de consumo de potencia total de todos los equipos en KWH	Potencia total de todos los equipos = 240,03 KWH					<u>SUBTOTAL (\$)</u>
						9,76
Costo de adquisición de imágenes 3d	Horas de toma de medidas, escaneo 3D y proceso de imágenes			Costo de hora por proceso (\$)		<u>SUBTOTAL (\$)</u>
	2,00			5,00		10,00
Costo de diseño de pieza	Horas de diseño de ortesis			Costo de hora de diseño (\$)		<u>SUBTOTAL (\$)</u>
	40			6,00		240,00
Costo de consumo de filamento	Cantidad de gramos necesarios para la impresión 3D			Costo de gramo de plástico PLA en mercado nacional (\$)		<u>SUBTOTAL (\$)</u>
	281			0,10		28,10
Costo de puesta en marcha de impresora 3D	Horas de puesta en marcha de impresora 3D			Costo de hora de puesta en marcha (\$)		<u>SUBTOTAL (\$)</u>
	1			10,00		10,00
Costo de impresión 3D	Horas de impresión 3D de la ortesis (\$)			Costo de hora de impresión en el mercado nacional(\$)		<u>SUBTOTAL (\$)</u>
	30,3			3,00		90,90
Costo de no calidad (27% Costo total de consumo de equipos + Costo total de consumo de plástico)	Costo total de consumo de equipos			Costo total de consumo de plástico		<u>SUBTOTAL (\$)</u>
	9,76			28,10		10,22
Costo de reparación de impresora	Costo de reparación de la impresora					<u>SUBTOTAL (\$)</u>
	1,00					1,00
COSTO TOTAL :						399,98

En la siguiente tabla observamos los costos la órtesis impresa en plástico ABS, con la escala reducida. En este caso el diseño, los materiales para adherencia y acabado; y las horas de escaneo ya no se consideró, partiendo de que el diseño es el mismo para ambos plásticos.

Tabla 17

Costo de órtesis impresa en plástico ABS, considerando la reducción de la escala del diseño

Costo de materiales para adherencia y acabado	Goma Blanca en barra (\$)	Rollo de cinta kapton (\$)	Pintura Aerosol (\$)	Brocas y discos de corte para motor dremel	Papel Lija (\$)	<u>SUBTOTAL (\$)</u>
	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00
Costo de consumo de potencia total de todos los equipos en KWH	Potencia total de todos los equipos = 10,24 KWH					<u>SUBTOTAL (\$)</u>
			5,88			5,88
Costo de adquisición de imágenes 3d	Horas de toma de medidas, escaneo 3D y proceso de imágenes			Costo de hora por proceso (\$)	<u>SUBTOTAL (\$)</u>	
		0,00		0,00		0,00
Costo de diseño de pieza	Horas de diseño de ortesis			Costo de hora de diseño (\$)	<u>SUBTOTAL (\$)</u>	
		0		0,00		0,00
Costo de consumo de filamento	Cantidad de gramos necesarios para la impresión 3D			Costo de gramo de plástico PLA en mercado nacional (\$)	<u>SUBTOTAL (\$)</u>	
		143		0,15		21,45
Costo de puesta en marcha de impresora 3D	Horas de puesta en marcha de impresora 3D			Costo de hora de puesta en marcha (\$)	<u>SUBTOTAL (\$)</u>	
		1		10,00		10,00
Costo de impresión 3D	Horas de impresión 3D de la ortesis (\$)			Costo de hora de impresión en el mercado nacional(\$)	<u>SUBTOTAL (\$)</u>	
		15,72		3,00		47,16
Costo de no calidad (27% Costo total de consumo de equipos + Costo total de consumo de plástico)	Costo total de consumo de equipos			Costo total de consumo de plástico	<u>SUBTOTAL (\$)</u>	
		5,88		21,45		7,38
Costo de reparación de impresora	Costo de reparación de la impresora					<u>SUBTOTAL (\$)</u>
			1,00			1,00
COSTO TOTAL :						92,87

Los costos de diseño e impresión pueden ser menores dependiendo del tipo de diseño, ergonomía, cantidad de material a usar, el número de órtesis a realizar y si se logra una primera impresión de calidad.

ANÁLISIS DE RESULTADOS:

Ambos materiales estudiados, plástico ABS y PLA, tuvieron una buena respuesta al estado tensional al que fueron sometidos durante ensayo de compresión y en la simulación CAD/CAE. Según los resultados del análisis mecánico de la órtesis de plástico ABS al aplicar fuerzas de 620N y 774.99 N, se observó que los esfuerzos que se generan en este material son menores pero el desplazamiento es mayor, mientras que en el plástico PLA los esfuerzos son ligeramente mayores y el desplazamiento es menor.

Los ensayos mecánicos de compresión realizados a las probetas de plástico. Permitiendo así diseñar piezas fuertes con deformaciones pequeñas, dentro de los límites plásticos. En base a las dimensiones de los objetos, piezas y partes de cuerpo que son escaneados, se deberá considerar las características del equipo de impresión para poder ejecutar el proyecto. En el diseño de la órtesis se tomó en cuenta las medidas máximas en las que la impresora 3D puede trabajar que son 18cm x 18cm x 30cm.

El material de impresión 3D ABS tiene excelentes características mecánicas, cuando se quiere diseñar piezas de mayor resistencia, mejor factor de seguridad, mayor deformación y mínima configuración de impresión en su densidad de malla.

El material de impresión 3D PLA tiene una resistencia mecánica inferior al plástico ABS. Sin embargo, tuvo una mejor respuesta al considerar los requisitos técnico-económicos para el caso en estudio, mostró suficiente resistencia mecánica para soportar los esfuerzos a los que estará sometida la órtesis en estudio.

Para el plástico ABS las Tensiones equivalentes de Von Mises son ligeramente más altas, para la simulación 1 es de 0.682MPa y para la simulación 2 de 0,876MPa, en ambos casos muy por debajo del límite elástico del material de 26 MPa, y de rotura del material de 28 MPa. Lo que permitió comprobar una buena resistencia del plástico ABS para los dos estados tensionales analizados en la órtesis. La mayor deformación se ubicó en la zona de la esquina superior izquierda con valores máximos de 4,052e-

002mm y de $5,230e-002$ mm respectivamente. Estos valores de desplazamiento alcanzado son aún pequeños, muy por debajo del límite de elongación elástica (1%) y a rotura del material (2%), lo que asegura el adecuado funcionamiento del prototipo.

Mientras que para el plástico PLA las Tensiones equivalentes de Von Mises son ligeramente más altos que en el plástico ABS, para la simulación 3 es de 0.761MPa y para la simulación 4 de 0,952MPa, en ambos casos igualmente muy por debajo del límite elástico del material de 49.5Mpa y de rotura del material de 45,6 MPa. Lo que permitió comprobar una buena resistencia del plástico PLA para los dos estados tensionales

La mayor deformación se ubicó en la zona de la esquina superior izquierda con valores máximos de $2,498e-002$ mm y de $3,122e-002$ mm respectivamente. Estos valores de desplazamiento alcanzado son aún pequeños, muy por debajo del límite de elongación elástica (3.3%) y a rotura del material (5.2%), lo que asegura el adecuado funcionamiento del prototipo.

CONCLUSIONES

Como conclusiones de la presente investigación se destacan las siguientes:

1. Se obtuvo el modelo geométrico en 3D de una órtesis de tobillo y pie mediante las técnicas de escaneo 3D y el procesamiento de la imagen en un software CAD.
2. Se utilizó una persona voluntaria para la captura de la información biométrica de tobillo y pie mediante la herramienta Scanto3D que realiza el procesamiento de datos en tres dimensiones y entrega el resultado en formato compatible con sistemas CAD.
3. El modelo CAD de la órtesis se obtuvo en el software Solidworks 2017 SP0, debido a la posibilidad que ofrece de realizar análisis y simulación mecánica mediante métodos numéricos con herramientas CAE, ello permitió evaluar el comportamiento estimado del modelo ante las cargas y esfuerzos a los que estará sometido durante la marcha del paciente.
4. Las geometrías con curvaturas y radios de redondeos menor o igual a 1mm genera imperfecciones que no se aprecian con el software Solidworks, para su corrección se utilizó el software Netfabb desarrollado por Autodesk, que entrega la geometría lista para su impresión.
5. Los ensayos mecánicos de compresión realizados a las probetas de plástico PLA y ABS en el laboratorio de la Universidad de Cuenca, permitió corroborar que las configuraciones del 5% y del 15% de densidad de mallado interno dadas en el programa de impresión 3D Cura 15.04, soportan cargas superiores a los 79.02 Kgf (774.99N) que se corresponde con el peso medio de una persona masculina de 1,85m de estatura. Llegando hasta los 348.40Kgf (3416.63N), pudiendo así diseñar piezas resistentes con pequeñas deformaciones, dentro de límites plásticos.

6. Se obtuvo el modelo físico de la órtesis de tobillo y pie mediante técnicas de impresión 3D en la impresora Anycubic tipo Kossel Lineal, la que permite obtener modelos con dimensiones límites de 18cm x 18cm x 30cm, suficientes para el estudio realizado.
7. El prototipo de órtesis diseñado en base a técnicas de escaneo e impresión 3D en plástico PLA, cumple el objetivo de inmovilizar el tobillo y pie, abriendo una gran posibilidad para el desarrollo de órtesis y prótesis personalizadas.
8. Las técnicas de escaneo 3D aplicadas son nuevas dentro del medio, y su integración con técnicas CAD/CAE y de Prototipado Rápido en 3D, ofrecer un excelente futuro para la creación de órtesis para tobillo y pie en personas que sufren de pie caído provocado por Varices, Espolón Calcáneo y Pie de Charcót, con ajuste a la ergonomía y a las preferencias estéticas del paciente.

RECOMENDACIONES

1. Es importante revisar que los softwares escogidos para realizar el proceso de las imágenes, diseño y mallado mediante elementos finitos para análisis mecánico tengan compatibilidad con el sistema operativo Windows 10.
2. Para desarrollar procesos de datos con imágenes en 2D y 3D que contienen altos niveles de pixelado y su posterior mallado es necesario la adquisición de una computadora que tenga características de sexta generación en adelante con una memoria RAM mínima de 16Gb.
3. Cuando se utiliza Solidworks 2017 es importante guardar los archivos en formatos para versiones anteriores como el Solidworks 2016 SP2 debido a que Solidworks 2017 SP0 tiene problemas de compatibilidad con Windows 10 y los archivos grabados en versiones superiores no se abren.
4. Cuando imprimimos la órtesis con el plástico PLA es importante que el cuarto se mantenga a una temperatura equilibrada, si hay variaciones bruscas de temperatura dicho plástico tiende a despegarse de la base de la impresora lo que dañara el modelo y el proceso de impresión. Ocasionando desperdicio de energía, costo elevado y plástico dañado.
5. De igual manera cuando se imprime en plástico ABS, es recomendable subir la temperatura de la cama caliente hasta los 90°C y mantener el cuarto donde se está imprimiendo a una temperatura estable.
6. Una vez que están configurados los parámetros de la impresora y se procede a su ejecución no se puede cancelar, si hacemos esto dañamos el modelo lo que ocasiona un desperdicio de energía, costo elevado y plástico dañado.
7. Es importante que para la impresión 3D de cualquier tipo de pieza se utilice plástico PLA debido a que es derivado del maíz y es biodegradable después de 10 años con las características climáticas adecuadas.

8. Para imprimir con los dos plásticos mencionados, es necesario contar con pegamento en barra, este permitirá una mejor adherencia inicial del plástico que sale del extrusor hacia la base de la impresora.
9. Cuando son piezas superiores a los 4cm de largo es necesario utilizar la opción Raft para obtener una mejor adherencia a la base de la impresora ya sea que se imprima en plástico PLA que no se necesita calentar la cama o en el plástico ABS con temperatura de cama caliente de 90°
10. Para la impresión de piezas en materiales plásticos ABS y PLA se recomienda utilizar una densidad de mallado no mayor al 40%, teniendo en cuenta el incremento proporcional de los costos con el aumento de la densidad del mallado, debido al mayor consumo de material y los gastos energéticos asociados de los equipos.
11. Para obtener la impresión del prototipo con una dimensión que cubra la totalidad del largo del pie se necesita una impresora de 25cm x 25cm x 30cm.

BIBLIOGRAFÍA

Aldaz, V. (2016). Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4931?mode=full>

Arízaga, X. (2012). Tesis de Procedimientos de Mantenimiento de la Corporación Aeroportuaria de Cuenca. *Procedimientos de Mantenimiento de la Corporación Aeroportuaria de Cuenca. Cuenca, Azuay, Ecuador.*

Baby3DPrint. (2014). Obtenido de <http://pequelia.republica.com/embarazo/baby3dprint.html>

Blunding. (2018). Obtenido de <https://cuenca.olx.com.ec/bota-ortopedica-blundig-iid-962638516>

Ching, P. (2014). Obtenido de <http://biomecanicayfisioterapia.blogspot.com/2014/04/marcha.html>

Chiriboga, A. (2018). *Makergroup*. Obtenido de <https://www.makergroupecuador.com/>

Circuitgrove. (2017). Obtenido de <http://www.circuitgrove.com/blog/first-successful-multi-material-3d-print-pla-hips>

David, L. (02 de 04 de 2017). *Anycubic3d*. Obtenido de <http://www.anycubic3d.com/>

González, R. G. (2007). Obtenido de <http://cencomed.sld.cu/socbio2007/trabajos/pdf/t001.pdf>

Goodrich, M. (2013). Obtenido de <http://www.3ders.org/articles/20130302-recyclebot-turning-old-milk-jugs-into-3d-printer-feedstock.html>

Institute, A. N. (2018). *ANSI*. Obtenido de www.ansi.org

José, M. (2018). Obtenido de <https://articulomercadolibre.com.ec/MEC-412635944-ortesis-JM>

Llorca, Á. (2015). Obtenido de <https://www.mediatrends.es/a/40090/mejores-materiales-imprimir-3d/>

Medic, M. (2018). Obtenido de <https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-412844409-bota-inmovilizadora-ortopedica-walker-JM>

Olivar, A. B. (2011). Análisis de la Funcionalidad de Prótesis Ortopédicas Transfemorales. *Revista Cubana de Ortopedia y Traumatología*, 116.

Olmos, A. (2015). *Obtenido de <http://makermex.blogspot.com/2015/03/filamentos-makermex.html>*

Ortiz, K. L. (2016). Los Beneficios de las Impresoras 3d como Herramienta de Innovación en la Medicina. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, 30.

Ossur. (2018). *Obtenido de https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-412851626-bota-ortopedica-hidraulica-marca-ossur-_JM*

Pedro, M. (2015). *Obtenido de <http://neuroortopedia.com/laboratorio-de-marcha-su-utilidad-clinica/>*

R., G. (2016). *Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Causas-de-deformacion-de-pie-y-tobillo-Gonzales-R-2016_fig2_326293469*

Sánchez, F. F. (2016). *Obtenido de <http://www.egrafica.unizar.es>*

Sinaí, H. M. (2018). *Obtenido de <http://www.farmaciasinaí.com/productos/productos-ortopedicos>*

Telégrafo, D. E. (2015). *Taller de órtesis y prótesis devuelve sonrisas a personas con discapacidad.*

Wilbur, H. (2015). *Obtenido de <https://mashable.com/2015/07/29/3d-printed-clothing-line/>*

www.andina3d.com. (2018). *Obtenido de <https://andina3d.com/ecuador>*

www.ansys.com. (2017). *Obtenido de <https://www.ansys.com/>*

www.anycubic3d.com. (2016). *Obtenido de <http://www.anycubic3d.com/support.html>*

www.hospitalmetropolitano.org. (2016). *Obtenido de www.hospitalmetropolitano.org*

www.hxx.es. (2015). *Obtenido de <http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/>*

www.impresiontresde.com. (2013). *Obtenido de <https://impresiontresde.com/9-aplicaciones-medicas-de-la-impresion-3d/>*

www.my.solidworks.com. (2018). *Obtenido de <https://my.solidworks.com/buzz>*

www.protesica.com.co. (2015). *Obtenido de <https://protesica.com.co/portfolio-item/ferula-tipo-afo/>*

www.quecartucho.es. (2015). Obtenido de <https://quecartucho.es/blog/que-es-y-que-se-puede-hacer-con-el-filamento-flexible-de-impresoras-3d/>

www.redautogestionadaconsumo.wordpress.com. (2017).

www.rhino3d.com/es/. (2017). Obtenido de <https://www.rhino3d.com/es/>

www.sais3d.com. (2018). Obtenido de <http://www.sais3d.com>

www.solidworks.com/. (2017). Obtenido de <https://www.solidworks.com/>

www.xyzprinting.com. (2015). Obtenido de <https://www.xyzprinting.com/en-US/home>