



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**

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

**TEMA: “DISEÑO Y PROTOTIPADO DE CUBERTERÍA PARA
PERSONAS CON ARTRITIS EN LAS MANOS UTILIZANDO MOLDEO
POR INYECCIÓN DE POLÍMEROS”**

AUTORES:

**FONSECA PAREDES, FRANKLIN PATRICIO
VILLAGÓMEZ CHOLOTA, DIEGO FERNANDO**

DIRECTOR:

**ING. HERNAN VINICIO, LARA PADILLA. PhD
SANGOLQUÍ**

2019



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “*Diseño y prototipado de cubertería para personas con artritis en las manos utilizando moldeo por inyección de polímeros*” realizado por los señores *Fonseca Paredes, Franklin Patricio* y *Villagómez Cholota, Diego Fernando*, 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, por lo cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, Junio de 2019



Ing. Lara Padilla Hernán Vinicio. PhD
DIRECTOR
C.C: 0603247362



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE
TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR COMPUTADOR

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, *Fonseca Paredes, Franklin Patricio* con cédula de ciudadanía n°1803887858 y *Villagómez Cholota, Diego Fernando* con cédula de ciudadanía n°1803833159, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: “*Diseño y prototipado de cubertería para personas con artritis en las manos utilizando moldeo por inyección de polímeros*” es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetado los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación es veraz.

Sangolquí, Junio de 2019



.....
Fonseca Paredes Franklin Patricio
C.C: 1803887858



.....
Villagómez Cholota Diego Fernando
C.C: 1803833159



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE
TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSTGRADOS
MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR COMPUTADOR

AUTORIZACIÓN

Nosotros, *Fonseca Paredes, Franklin Patricio* y *Villagómez Cholota, Diego Fernando*, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación “*Diseño y prototipado de cubertería para personas con artritis en las manos utilizando moldeo por inyección de polímeros*” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, Junio de 2019

Fonseca Paredes Franklin Patricio
C.C: 1803887858

Villagómez Cholota Diego Fernando
C.C: 1803833159



DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación está dedicado a mis padres,
Patricio y Mariana, a mi hermana Tatiana,
a mis sobrinos, Toñito y Daniela,
que gracias a su constante apoyo y cariño
han logrado hacer de mí una persona de éxitos
estudiantiles y personales.

Franklin



DEDICATORIA

Agradezco a Dios quien con su bendición llena siempre mi vida y por haberme dado las fuerzas necesarias para concluir el presente trabajo.

A mi familia, por su apoyo en todos estos años, ellos han sido pilares fundamentales en el transcurso de toda mi vida.

A mi esposa quien ha sido mi apoyo constante en todos estos años juntos.

A mi tutor y profesores quienes supieron ayudarme e impartir de la mejor manera posible el conocimiento adquirido.

Diego



AGRADECIMIENTO

Quiero expresar un profundo agradecimiento a la
Universidad de las Fuerza Armadas –ESPE,
de manera especial a todos los profesores de la Maestría
que desinteresadamente compartieron conmigo sus conocimientos,
logrando de esta manera fortalecer mi espíritu investigador.

Franklin



AGRADECIMIENTO

Quiero expresar un profundo agradecimiento a la
Universidad de las Fuerza Armadas –ESPE,
de manera especial a todos los profesores de la Maestría
que compartieron conmigo sus conocimientos,
logrando de esta manera fortalecer mi espíritu investigador.

Diego

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
GLOSARIO DE TÉRMINOS	xv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT.....	xvii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento de problema.....	1
1.2 Desarrollo del problema	1
1.3 Formulación del problema a resolver	3
1.4 Hipótesis.....	3
1.5 Objetivos	3
1.5.1 Objetivo General	3
1.5.2 Objetivos Específicos	3
1.6 Antecedentes	4
1.7 Justificación.....	5
1.8 Alcance.....	7
CAPÍTULO II	9
MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Polímeros.....	9
2.1.1 Polímeros biodegradables	10
2.1.2 Ácido Poliláctico (PLA)	11
2.1.3 Propiedades físicas de polímeros biodegradables	13
2.2 Moldeo por Inyección.....	14
2.2.1 Unidad de cierre	15
2.2.1.1 Presión de inyección	16
2.2.1.2 Velocidad de inyección.....	17
2.2.1.3 Monitoreo de temperatura.....	17
2.2.1.4 Tiempo de enfriamiento.....	17
2.2.2 Molde de inyección	19
2.2.2.1 Placas de apoyo	19
2.2.2.2 Canales de enfriamiento	20
2.2.2.3 Pernos de expulsión	20
2.2.2.4 Pernos guía	21
2.2.2.5 Anillo de localización	21
2.2.2.6 Bebedero (sprue bush)	21

2.2.2.7	Canales de colada o alimentación (runners).....	22
2.3	Artritis	22
2.4	Antropometría de la mano	24
2.5	Impresión 3D.....	27
2.5.1	Tecnologías de Impresión 3D.....	28
2.5.1.1	FMD (Fused Deposition Modeling).....	28
2.5.1.2	PJ – Polyjet.....	28
2.5.1.3	SLS (Selective Laser Sintering).....	29
2.5.1.4	STL (Stereolitografía).....	30
2.6	Desarrollo del Concepto	30
CAPÍTULO III		34
DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS DE CUBERTERÍA		34
3.1	Identificación de necesidades	34
3.2	Establecer especificaciones – objetivo.....	35
3.3	Generación de conceptos	40
3.3.1	Concepto A.....	40
3.3.2	Conceptos B	40
3.3.3	Concepto C.....	41
3.3.4	Concepto D.....	41
3.4	Selección del concepto por diseñadores.....	42
3.5	Validación de material para prototipos	44
3.6	Determinación de mediciones para diseño de prototipos	49
3.6.1	Diseño CAD de los prototipos	50
CAPÍTULO IV		53
SELECCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL CONCEPTO		53
4.1	Selección del concepto	53
4.2	Optimización topológica del concepto seleccionado	58
4.2.1	Análisis estático del concepto	59
4.2.2	Optimización topológica de masa	63
4.2.3	Optimización de forma	65
4.3	Análisis estático del modelo optimizado de la cuchara	66
4.4	Análisis por fatiga del modelo optimizado de la cuchara.....	68
4.5	Análisis estático del modelo optimizado de los acoples de anillo	70
CAPÍTULO V		72
DISEÑO DEL MOLDE		72
5.1	Materiales para moldes de inyección	72
5.1.1	Selección del material.....	73
5.1.2	Datos de la máquina inyectora de plástico	76
5.1.3	Variables del moldeo por inyección más importantes.....	79
5.1.3.1	Masa a inyectar.....	79
5.3.1.2	Capacidad de inyección del PLA.....	79
5.3.1.3	Presión de inyección	80
5.3.1.4	Fuerza de cierre	81
5.3.1.5	Tiempo de enfriamiento.....	82
5.3.1.6	Tiempo de inyección	82

5.3.1.7	Velocidad de inyección.....	83
5.2	Simulación del proceso de inyección.....	83
5.2.1	Modelo de las piezas a ser inyectadas.....	83
5.2.2	Parámetros para la simulación.....	86
5.2.3	Ingreso de datos del material al software de simulación.....	87
5.2.4	Análisis del proceso de inyección.....	87
5.2.4.1	Tiempo de llenado (Fill Time).....	90
5.2.4.2	Presión de llenado (Pressure at End of Fill).....	90
5.2.4.3	Temperatura promedio al final del llenado (Average Temp. at End of Fill).....	91
5.2.4.4	Temperatura de abultamiento al final del llenado (Bulk Temperature at End of Fill).....	92
5.2.4.5	Aumento de temperatura al final del llenado (Temperature Growth at End of Fill).....	92
5.2.4.6	Esfuerzo cortante al final del relleno (Shear Stress at End of Fill).....	93
5.2.4.7	Contracción volumétrica al final del llenado (Volumetric Shrink at End of Fill).....	94
5.2.4.8	Capa congelada al final del llenado (Frozen Layer Fraction at End of Fill).....	94
5.2.4.9	Tiempo de Enfriamiento (Cooling Time).....	95
5.2.4.10	Marcas de Hundimiento (Sink Marks).....	95
5.2.4.11	Facilidad de llenado (Easy of Fill).....	96
5.2.4.12	Fuerza de Cierre.....	97
5.2.5	Fabricación del molde de inyección.....	99
5.2.5.1	Molde de la cuchara.....	100
5.2.5.2	Molde del acople de anillos.....	100
5.2.5.3	Porta núcleos y cavidades.....	101
5.2.5.4	Placas del molde.....	102
5.2.6	Maquinado del molde de inyección.....	102
5.2.6.1	Selección de herramientas para el maquinado.....	102
5.2.7	Simulación del maquinado.....	107
5.3	Manufactura del molde.....	108
5.4	Inyección de PLA.....	111
CAPÍTULO VI.....		113
PRUEBAS Y RESULTADOS.....		113
6.1	Pruebas de calibración de la inyectora.....	113
6.2	Ensayos de inyección de PLA.....	113
CAPÍTULO VII.....		120
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		120
7.1	Conclusiones.....	120
7.2	Recomendaciones.....	120
7.3	Bibliografía.....	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Propiedades físicas de varios polímeros</i>	13
Tabla 2 <i>Propiedades mecánicas del PLA</i>	14
Tabla 3 <i>Temperaturas para moldes dependientes del material</i>	17
Tabla 4 <i>Condiciones del moldeo por inyección de termoplásticos</i>	20
Tabla 5 <i>Medidas antropométricas de una población británica estándar</i>	25
Tabla 6 <i>Descripción de las medidas antropométricas de la mano</i>	26
Tabla 7 <i>Necesidades registradas a 36 personas con artritis en las manos</i>	34
Tabla 8 <i>Listado de criterios de utilidad</i>	35
Tabla 9 <i>Jerarquización de las necesidades – objetivos</i>	36
Tabla 10 <i>Lista de métricas para cubertería</i>	36
Tabla 11 <i>Matriz de Pares</i>	37
Tabla 12 <i>Objetivos ponderados</i>	39
Tabla 13 <i>Principales deformaciones de la mano</i>	42
Tabla 14 <i>Comparación de objetivos con conceptos</i>	43
Tabla 15 <i>Cálculos de índices para materiales filtrados</i>	48
Tabla 16 <i>Caracterización antropométrica de la mano</i>	49
Tabla 17 <i>Diseño CAD de los conceptos seleccionados</i>	51
Tabla 18 <i>Comparación de objetivos con conceptos</i>	57
Tabla 19 <i>Comparación de tiempos de manufactura entre el acero y aluminio</i>	74
Tabla 20 <i>Áreas de aplicación del PRODAX</i>	75
Tabla 21 <i>Propiedades físicas del PRODAX</i>	75
Tabla 22 <i>Propiedades mecánicas del PRODAX</i>	76
Tabla 23 <i>Parámetros de inyección</i>	76
Tabla 24 <i>Propiedades típicas para PLA Generic</i>	77
Tabla 25 <i>Relación entre largo de flujo de resina y espesor de pared</i>	80
Tabla 26 <i>Propiedades Físicas y Mecánicas del PLA Ingeo 3001D</i>	86
Tabla 27 <i>Tabla de Parámetros Finales</i>	98
Tabla 28 <i>Especificaciones FADAL 4020</i>	108
Tabla 29 <i>Resultados obtenidos de pruebas de inyección</i>	113
Tabla 30 <i>Variación de parámetros de inyección</i>	114
Tabla 31 <i>Resultados de propiedades mecánicas de la cuchara</i>	117
Tabla 32 <i>Datos de desplazamiento según Tracker</i>	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Estructura de diferentes polímeros</i>	9
Figura 2. <i>Aplicaciones de los polímeros biodegradables en el 2005</i>	10
Figura 3. <i>Fórmulas estructurales de los biopolímeros PLA (ácido poliláctico), PGA (ácido poliglicólico), PCL (policaprolactona) y PHB (polihidroxibutirato)</i>	11
Figura 4. <i>Obtención del ácido poli-láctico a partir del ácido láctico</i>	12
Figura 5. <i>Formulación de la molécula de PGA y PLA</i>	13

Figura 6. Partes fundamentales de una máquina inyectora	15
Figura 7. Detalle del molde de inyección	19
Figura 8. Orificio para la inyección del material convencional	22
Figura 9. Artritis de Manos	23
Figura 10. Cubierto para personas con poca fuerza en la mano	24
Figura 11. Medidas antropométricas de la mano	26
Figura 12. Secuencia de la impresión 3D	27
Figura 13. Impresión 3D por tecnología FMD	28
Figura 14. Impresión 3D por PJ-Polyjet	29
Figura 15. Impresión 3D por SLS	29
Figura 16. Impresión 3D por STL	30
Figura 17. Fases de desarrollo del concepto	31
Figura 18. Bosquejo del concepto A	40
Figura 19. Bosquejo del concepto B.....	40
Figura 20. Bosquejo del concepto C.....	41
Figura 21. Bosquejo del concepto D	41
Figura 22. Filtrado de materiales con restricciones	45
Figura 23. Cuchara como elemento viga.....	46
Figura 24. Filtrado de materiales por índice de material	48
Figura 25. Ubicación de las medidas antropométricas en la mano	50
Figura 26. Estudio biomecánico de la mano con cuchara de mango tradicional	57
Figura 27. Estudio biomecánico de la mano con cuchara con acoples	58
Figura 28. Concepto C seleccionado	59
Figura 29. Datos recolectados de la carga real en una cuchara	59
Figura 30. Aplicación de carga y sujeciones fijas.....	60
Figura 31. Resultados del análisis estático – Tensión Máxima.....	61
Figura 32. Punto de mayor tensión.....	61
Figura 33. Resultados del análisis estático – Desplazamiento	62
Figura 34. Resultados del análisis estático – Deformación unitaria.....	62
Figura 35. Factor de seguridad – Von Mises	63
Figura 36. Optimización topológica de masa	64
Figura 37. Resultados de optimización.....	64
Figura 38. Cortes en las argollas de anillo.....	65
Figura 39. Diseño de seguros para acoples.....	65
Figura 40. Redondeo de filos cortantes	66
Figura 41. Resultados del análisis estático de la cuchara – Desplazamiento	67
Figura 42. Resultados del análisis estático – Tensión Máxima.....	67
Figura 43. Zona de tensión máxima en la cuchara.....	68
Figura 44. Porcentaje de daño por fatiga – Vista global.....	69
Figura 45. Porcentaje de daño por fatiga – Vista aproximación	69
Figura 46. Vida total en ciclos.....	70
Figura 47. Resultados del análisis estático del acople de anillos – Desplazamiento	70
Figura 48. Resultados del análisis estático del acople de anillos – Tensión Máxima	71
Figura 49. Resulta Zona de tensión máxima en el acople de anillos.....	71
Figura 50. Área proyectada de la cuchara y acoples.....	81

Figura 51. Croquis de la cuchara	84
Figura 52. Croquis del acople de anillos	85
Figura 53. Creación Polímero PLA en SolidWorks.....	87
Figura 54. Resultados de la simulación de inyección – Tiempo y Presión de llenado	87
Figura 55. Resultados de la simulación de inyección – Aire atrapado.....	88
Figura 56. Resultados de la simulación de inyección – Equilibrado de runners	89
Figura 57. Detalle del cambio de geometría de los “Runners”	89
Figura 58. Simulación del tiempo de llenado	90
Figura 59. Simulación de la presión de llenado.....	91
Figura 60. Simulación de la temperatura promedio al final del llenado.....	91
Figura 61. Simulación de la temperatura de abultamiento al final del llenado	92
Figura 62. Simulación del aumento de temperatura al final del llenado	93
Figura 63. Simulación del esfuerzo cortante a final del llenado	93
Figura 64. Simulación de la contracción volumétrica al final del llenado	94
Figura 65. Simulación de la fracción de capa congelada	95
Figura 66. Simulación del tiempo de enfriamiento.....	95
Figura 67. Simulación de las marcas de hundimiento	96
Figura 68. Simulación de facilidad de llenado	96
Figura 69. Simulación de la fuerza de cierre en la dirección X	97
Figura 70. Simulación de la fuerza de cierre en la dirección Y	97
Figura 71. Simulación de la fuerza de cierre en la dirección Z.....	98
Figura 72. Moldes del núcleo y cavidad de la cuchara	100
Figura 73. Moldes del núcleo y cavidad del acople de anillos.....	101
Figura 74. Porta núcleos y cavidades	101
Figura 75. Placas del molde	102
Figura 76. Selección de las herramientas de acuerdo al material al maquinar	103
Figura 77. Tabla de conversiones de dureza.....	103
Figura 78. Velocidades de corte recomendadas según dureza del material en bruto	104
Figura 79. Paso por diente recomendados	104
Figura 80. Ingreso de datos de corte al software	107
Figura 81. Simulación del proceso de maquinado	107
Figura 82. Simulación del proceso de maquinado	108
Figura 83. Centro de Mecanizado FADAL 4020.....	109
Figura 84. Molde - cavidad mecanizado.....	109
Figura 85. Molde – núcleo mecanizado.....	110
Figura 86. Molde – cavidad con dimensiones	110
Figura 87. Inyectora MATEU SOLE modelo 90.....	111
Figura 88. Desmoldeo de la cuchara	111
Figura 89. Cuchara obtenida por inyección de PLA	112
Figura 90. Prueba #1	114
Figura 91. Prueba #2	115
Figura 92. Prueba #3	115
Figura 93. Prueba #4	115
Figura 94. Prueba #5	116
Figura 95. Prueba #6	116

Figura 96. Gráfica de levantamiento $x - t$	119
Figura 97. Gráfica de levantamiento $y - t$	119

GLOSARIO DE TÉRMINOS

PLA: Ácido poliláctico

PET: Tereftalato de polietileno.

PVC: Policloruro de vinilo

ABS: Acrilonitrilo butadieno estireno

Impresión 3d: Tecnologías de fabricación por adición donde un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material.

PETE/PET: Polietileno tereftalato.

HDPE/PEAD: Polietileno de alta densidad.

LDPE/PELD: Polietileno de baja densidad.

PP: Polipropileno.

PS: Poliestireno.

CAD: Diseño asistido por computador.

CAE: Ingeniería asistida por computador.

CAM: Manufactura asistida por computador.

RP: Prototipado rápido.

OMS: Organización Mundial de la Salud.

AR: Artritis reumatoide.

RESUMEN

El presente proyecto se enfoca en la manufactura por inyección con PLA de prototipos de cubertería para alimentación que facilita su utilización a las personas con artritis en las manos; dichos artículos se van a fabricar con polímeros de gran demanda mundial, como son los poliésteres alifáticos obtenidos de fuentes renovables orgánicas. En nuestro caso se utilizó el ácido poliláctico, pues se buscó contrarrestar el efecto nocivo que tienen los polímeros de uso común, pues, según la OMS la utilización frecuente de los plásticos como el PET, al tener en su composición química Bisfenol A y Ftalatos provocan en las personas desórdenes hormonales, infertilidad, obesidad, problemas digestivos, etc, y es más, estos riesgos se agudizan debido a la reutilización constante de estos polímeros. Se realizó la selección de cuatro prototipos de cubertería, los cuales se imprimieron con tecnología 3d, y fueron llevados a estudio de campo, es decir, se sometieron a pruebas de utilización en una persona con problemas de artritis en las manos. Una vez que se determinó el modelo más funcional, se optimizó y evaluó su forma utilizando software especializado de elementos finitos, y finalmente se diseñó y fabricó el molde en aluminio para su posterior inyección con PLA. El resultado final corresponde a un prototipo de cuchara con argollas de sujeción fabricado con bioplástico, la misma que permite agarre firme en los dedos, reduciendo en gran medida los movimientos bruscos con la mano y por consiguiente su deformación al momento de llevar los alimentos a la boca.

PALABRAS CLAVE

- **MANUFACTURA**
- **PROTOTIPOS**
- **PLA**
- **FEM**
- **ARTROSIS**

ABSTRACT

The present work focuses on manufacturing, using PLA injection, of cutlery that aims to be used by people who suffer from arthritis in their hands. Those pieces are going to be manufactured with polymers of high demand worldwide, such as aliphatic polyesters, obtained from organic renewable sources. Here we are using PLA (polylactic acid), as we sought reduce the harmful effect of commonly used polymers, because according to WHO the continuous use of plastics like PET, which chemical composition includes Bisphenol A and phthalates, are the cause of hormonal disorders, infertility, obesity, digestive issues, etc. in people. Moreover, the risk increases when the above-mentioned polymers are reused. Four 3d-printed prototypes were tested by people with arthritis condition. And after some functional assessments a single prototype is chosen, evaluated and optimized via an CAE software to finally create a matrix that serves for the PLA injection. The result is a spoon prototype that features clamping eyes made of bio-plastic material allowing a firm grip on fingers that greatly reduce rough movements on hands therefore lowering strain when grabbing food.

KEYWORDS

- **MANUFACTURE**
- **PROTOTYPES**
- **PLA**
- **FEM**
- **ARTHROSIS**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento de problema

Objeto de Estudio: Cubertería para personas con artritis en las manos.

Campo de Acción: Diseño y prototipado utilizando moldeo por inyección de polímeros.

Falta de cubertería adaptada a personas con artritis en las manos para su alimentación diaria que sean fabricados mediante moldeo con polímeros biodegradables para mejorar las condiciones de salud, manejo de desechos y manipulación.

1.2 Desarrollo del problema

La artritis es una enfermedad de varios tejidos dentro de las articulaciones. Puede ocurrir como resultado de una inflamación aguda (a corto plazo) o crónica (continua) de una articulación y de los tejidos blandos que están a su alrededor. También puede ocurrir después de una lesión de la articulación (como la rotura de un dedo), o por causas genéticas (hereditarias) y medioambientales. La forma más común de artritis, es la artritis degenerativa u osteoartritis que puede afectar una o más articulaciones en cualquier lugar del cuerpo. La artritis degenerativa ocurre cuando es mayor y afecta sobre todo a las manos y las articulaciones que soportan el peso corporal como las caderas y las rodillas. La artritis degenerativa puede causar dolor, deformidad, y limitación de movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción. (Cleveland Clinic, 2018).

Con este antecedente, se busca mejorar la manipulación de los alimentos mediante el diseño de formas para cubertería adaptadas a personas con problemas de movimiento en las manos, y al mismo tiempo, seleccionar un polímero de baja contaminación tanto para el cuerpo humano como

el ambiente. Una alimentación de forma equilibrada y hábitos de vida sana y natural son muy importantes. Igual importancia tiene conocer de qué manera se preparan nuestros menús, con qué se los cocina y cómo se los envasa, ya que, no todos los materiales son inocuos ni adecuados para uso alimentario.

El plástico es uno de los materiales más usados en nuestra sociedad para fabricar artefactos de uso cotidiano. Está presente en todo tipo de envases y recipientes y no sólo en las cocinas. Está comprobado científicamente que algunos plásticos son responsables de liberar sustancias tóxicas para el organismo cuando se someten a cambios de temperatura, principalmente, si van a utilizarlos para contener alimento caliente o calentarlos con ellos. (Internacional de Creative Commons, 2018).

Las resinas plásticas más utilizadas en los hogares son: PETE/PET (Polietileno tereftalato), HDPE/PEAD (Polietileno de Alta Densidad), PVC/V (Policloruro de Vinilo), LDPE/PELD (Polietileno de Baja Densidad), PP (Polipropileno), PS (Poliestireno), los mismos que tiene en su composición química Bisfenol A y Ftalatos, compuestos tóxicos que pueden provocar en las personas desórdenes hormonales, infertilidad, obesidad, problemas digestivos, etc, y es más, estos riesgos se agudizan debido a la reutilización constante de estos polímeros, pues la OMS recomienda que una vez usados sean desechados.

Otro de los problemas derivados de la utilización desmedida de estos plásticos, es la alta contaminación que provoca su fabricación y su difícil reciclabilidad, pues se estima que tarda aproximadamente 180 años en descomponerse aunque este periodo varía en función al tipo. (Inforeciclaje, 2018).

Una de las soluciones que se propone en el presente estudio es la utilización de bioplásticos, los mismos que son derivados de productos vegetales, como es el caso del PLA (ácido poliláctico) que se degrada fácilmente en agua y CO₂, a diferencia de los nombrados anteriormente que son derivados del petróleo. (Valencia, Universidad de, 2016).

1.3 Formulación del problema a resolver

¿Cuáles son los parámetros de selección de un polímero biodegradable?

¿Qué polímero biodegradable es utilizado para moldeo por inyección?

¿Cuáles son los utensilios de alimentación más utilizados para ser manufacturados con bioplásticos?

¿Cómo mejorar la forma de los utensilios de alimentación mediante herramientas CAE para ayudar en su manipulación a las personas con artritis en las manos?

1.4 Hipótesis

La utilización de varios polímeros permite seleccionar el más idóneo para manufacturar por inyección un prototipo de cubertería para la alimentación de personas con artritis en las manos.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Diseñar y prototipar cubertería para personas con artritis en las manos utilizando moldeo por inyección de polímeros.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Generar conceptos de la cubertería para personas con artritis en las manos.
- Analizar de los polímeros para el diseño moldeo mediante inyección.
- Prototipar por impresión 3d conceptos de cubertería.
- Optimizar el concepto en función a la necesidad de las personas con artritis considerando principios de ergonomía.
- Evaluar el diseño mediante CAE.
- Diseñar y fabricar el molde para inyección del polímero por CAM.

- Fabricar el prototipo seleccionado mediante moldeo por inyección de polímero.
- Evaluar la funcionabilidad de los prototipos en personas con artritis.

1.6 Antecedentes

La versatilidad de la mano, complejidad de movimiento, gran capacidad de adaptación a las demandas funcionales, fuerza y símbolo de expresión en muchas ocasiones, ha despertado el interés de muchas culturas a través de la historia. Los médicos han intentado entender su anatomía y forma de funcionamiento y los artistas en lograr una representación, en pintura o escultura, que refleje estas capacidades. (Hinzpeter, 2014).

La aparición de una enfermedad que altere o amenace esta función genera una inmediata reacción en los pacientes. Es un motivo de preocupación y de consulta, como es el caso de la artritis, enfermedad inflamatoria del tejido sinovial articular y peritendinoso con destrucción del cartílago y erosiones óseas que conlleva en última instancia importantes deformaciones óseas y discapacidad funcional. (M. Pilar Lisbona, 2007).

Aquellas personas que presentan esta enfermedad sin acudir a ningún tratamiento terminan con deformaciones irreversibles en sus manos, por ejemplo, sus dedos se tuercen impidiéndoles hacer normalmente sus actividades manuales y simples, como lo es comer.

Muchas empresas a nivel mundial, como la italiana +LAB, que en colaboración con +Tuo, se ha dedicado a crear pequeños objetos útiles para ayudar a personas que teniendo algún tipo de discapacidad están limitados en las funciones de sus extremidades superiores. (CREATEC 3D, 2018).

Todo esto se está realizando mediante tecnología de impresión 3D, pero casi nada se ha visto mediante moldeo por inyección, pues, si una persona con estas dificultades físicas quiere alimentarse, sobretodo en lugares públicos, no va a tener la cubertería que le facilite esta acción; que será subsanada gracias a diseño de aditamentos añadidos a los utensilios para ayudar en la

maniobrabilidad de los mismos. A más de esto, los tipos de plásticos que se utiliza para los utensilios son por lo general el PET, PP, PVS, ABS, que tiene la particularidad de desprender sustancias nocivas para la salud. (Mercola, 2019). Es por esto que se pretende usar PLA como material sustituto de los polímeros comerciales debido a que es un polímero de origen vegetal de fácil degradación y ninguna contaminación al cuerpo humano.

1.7 Justificación

Con nuestro proyecto se quiere ayudar a las personas que presenten problemas para la manipulación de cubertería (cuchara, tenedor, cuchillo), es decir, aquellos usuarios que tengan limitaciones en los movimientos, flexión, extensión, abducción y aducción en sus manos a causa de enfermedades como las artritis u otra enfermedad reumática, mediante el mejoramiento y optimización del diseño original de estos utensilios por medio del análisis CAE, logrando de esta manera una nueva funcionalidad ergonómica para este tipo de menajes.

Se realizará el diseño conceptual de varios utensilios, los cuales serán impresos en 3d para ser evaluados por personas con artritis en las manos, después de lo cual se procederá a realizar posibles modificaciones por software para obtener la forma final, la misma que será fabricada mediante un molde construido en aluminio para la inyección con plástico.

Los plásticos que se encuentran en muchas aplicaciones cotidianas son todos altamente contaminantes en su producción, pues contienen sustancias que actúan en nuestro organismo como disruptores hormonales, es decir que interfieren en las funciones de nuestro sistema hormonal. Esto causa demostradas alteraciones (a las que son más sensibles fetos y niños), sobretodo los plásticos que contienen ftalatos (hacen flexible al plástico) y bisfenol A (componente de policarbonatos), y peor aún, al utilizarlos a diario como utensilios de manejo de alimentos, provocando envenenamiento progresivo debido a su reutilización, pues según (OMS,2003), plástico como el PET (uno de los más empleados) solo debe ser utilizado una sola vez y luego hay que desecharlo pues hay desprendimiento de DEHP, una clase de ftalato tóxico.

Además, la escasez y la variación en el precio del petróleo, sumado al incremento de la contaminación ambiental, actúan de forma conjunta con el fin de promover el desarrollo de nuevos productos amigables con el medioambiente y que no estén elaborados con combustibles fósiles. En este contexto, los plásticos biodegradables, como el PLA, se ajustan perfectamente a los nuevos requerimientos e inquietudes industriales y sociales. (Caballero, S/A).

El ácido poliláctico (PLA) fue uno de los primeros bioplásticos en ser conocido desde el sector de consumo. Este es un material fabricado a partir de dextrosa (azúcar) de maíz sobretudo en Estados Unidos, raíces o almidón de tapioca principalmente en Asia y de caña de azúcar en el resto del mundo; además, es el bioplástico con mayor madurez en el mercado, si bien existen hoy en día otras resinas procedentes de diversas fuentes renovables, el PLA ha sido pionero desde su introducción en 2003. (Leyva, 2012).

Este material se utiliza mucho en la industria para embalajes agroalimenticios (vasos y envases), cosméticos o compuestos con fibras naturales; pero es también ideal para utilizar con tecnología de manufactura por inyección de plástico, es decir, utilizando moldes diseñados con formas especiales que permitan el prototipado del elemento.

El proceso de moldeo por inyección consta de fundir el material polimérico para inyectarlo dentro de un molde a través de un pequeño orificio llamado compuerta. Este molde debe estar frío y cerrado a presión. Una vez que ha sido inyectado el material se enfría dentro del molde, se solidifica y se obtiene una pieza moldeada. En la actualidad, el moldeo por inyección aplicado al plástico es uno de los procesos más utilizados en la producción de piezas como juguetes, artículos de uso doméstico, partes de automóviles, componentes de aeronaves, entre otras. (Bryce, 1996).

A pesar de tener un éxito grande desde hace pocos años, el PLA ya ha sido objeto de muchas investigaciones y eso a partir de 1845. El primero en haber condensado ácido láctico fue Pelouze (1845), por medio de una destilación con agua.

En efecto, si el PLA tiene gran fama desde hace poco tiempo es porque el desarrollo del polímero solía ser difícil, por lo mismo el costo de producción estaba muy alto. Pero desde hace unos años,

gracias a los avances en la fermentación de la glucosa para obtener ácido láctico, el precio de producción del mismo ha conocido una gran bajada (Duhamel, 2016).

Según (Duhamel, 2016), entre sus ventajas tienen:

- Material universal: puede ser utilizado con cualquier impresora 3D con tecnología FFF ya que por su temperatura de fusión no necesita más que una cama fría. Aparte, se encuentra en cualquier parte del mundo muy fácilmente.
- Material inodoro: a diferencia del ABS o PET, hecho a partir de hidrocarburo que huele al momento de la fusión, el PLA es inodoro por estar constituido de almidón de maíz.
- Material con amplia gama de colores: el PLA existe en diferentes colores gracias a pigmentos coloreados.
- Material adaptable: este tipo de filamento permite proceder al acabado deseado sobre el objeto: pulido, pintura, barnizado.
- Material fácil de uso: la extrusión se hace de manera simple, obteniendo un resultado uniforme.
- Material accesible: junto con el ABS, es de los filamentos más accesibles, con precio de unos 20 dólares el kilo de PLA en Estados Unidos y 12 dólares en China.
- Material ecológico: y obviamente por ser bioplástico, es al día de hoy, el material más ecológico del mercado. Una razón de crear respetando el medio ambiente.

1.8 Alcance

El presente proyecto tiene como área de influencia el desarrollo de productos poliméricos moldeados por inyección para las personas con artritis de la zona 3, los mismos que dispondrán de cubertería para alimentación hechos con materiales amigables con el ambiente, reducida contaminación corporal y fácil de manipular.

Lo que se propone es diseñar nuevos conceptos de cubertería que facilitará la manipulación de alimentos para las personas que presentan problemas artríticos en sus manos. Aquí se aplicará las últimas tendencias en tecnología de manufactura, empezando por el CAD utilizando software

ingenieril especializado de los utensilios seleccionados, para luego mediante impresión 3D en PLA obtener los conceptos físicamente y luego proceder al análisis CAE para optimización de su forma y finalmente aplicar CAM en la elaboración del molde para la inyección del polímero.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Polímeros

Según (Godavitarne, Robertson, Peters, & Rogers, 2017), los polímeros son macromoléculas compuestas de enlaces covalentes monómeros. El monómero o unidad repetitiva puede ser el mismo o diferentes, denominados homopolímeros o copolímeros, respectivamente. Las cadenas de polímeros pueden ser lineales, ramificadas o reticuladas, así como amorfo, cristalino o ambos, que influyen en la fuerza y degradación del material. Además son influenciado por la temperatura y, como tal, es importante que los polímeros estén diseñados con una temperatura de transición vítrea (Tg) por encima de la temperatura corporal para evitar que se vuelvan demasiado flexibles en vivo.

En la **Figura 1**, se muestran las estructuras moleculares de algunos de los polímeros más utilizados dentro de la industria.

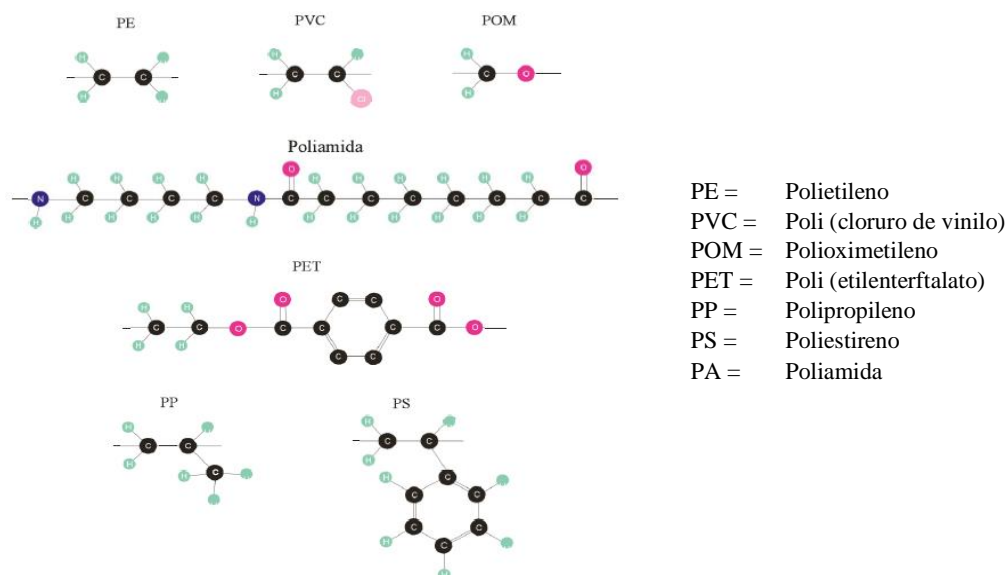


Figura 1. Estructura de diferentes polímeros
 Fuente: (Beltrán & Marcilla, S/A)

Los polímeros se pueden clasificar en naturales (biológicamente derivado) o sintético. Los polímeros naturales se derivan de proteínas como colágeno y gelatina, así como polisacáridos como celulosa y quitina. Los polímeros sintéticos se pueden dividir aún más en función de su modo de degradación a saber hidrolítica o enzimáticamente degradable.

2.1.1 Polímeros biodegradables

Según la norma ASTM D6400 los plásticos biodegradables son plásticos cuya degradación resulta de la acción natural de microorganismos como bacterias, hongos y algas. A partir de la definición de biodegradación aparece el concepto de “compostaje” que se refiere al proceso de control de la descomposición biológica (biooxidación) de los materiales biodegradables para convertirse en humus, más concretamente en una sustancia conocida como compost. En este proceso se obtienen como productos al dióxido de carbono, agua, minerales y la materia orgánica. (Guerrero, y otros, 2011)

Los polímeros biodegradables han estado en uso por alrededor de una década, pero solamente en los últimos 5 años se los ha producido en una escala comercial. Estos polímeros han alcanzado una aceptación en aplicaciones tales como el empaquetamiento de productos alimenticios, bolsas y sacos, partículas de relleno para empaquetamiento de productos agrícolas y en muchas otras. (Guerrero, y otros, 2011). Según (Platt, 2006), en la **Figura 2**, se muestra la distribución de las aplicaciones de los polímeros biodegradables en el 2005.

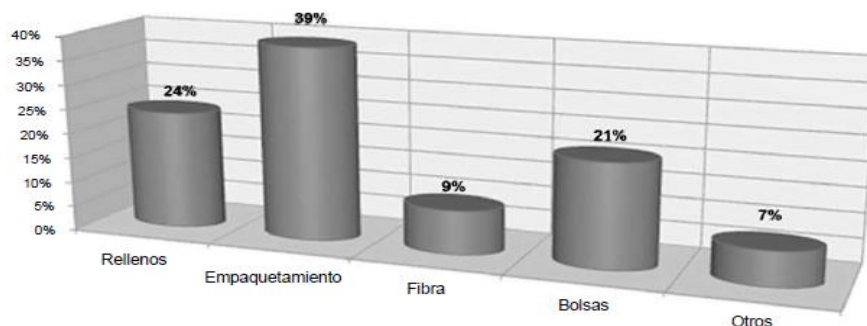


Figura 2. Aplicaciones de los polímeros biodegradables en el 2005

Fuente: (Guerrero, y otros, 2011)

Según (Van de Velde, 2002), los polímeros biodegradables pueden clasificarse básicamente en cuatro categorías principales:

- Polímeros naturales: como la celulosa, el almidón, y las proteínas.
- Polímeros naturales modificados: como el acetato de celulosa o los polihidroxicanoatos.
- Materiales compuestos: combinan partículas biodegradables (por ejemplo, el almidón, la celulosa regenerada o gomas naturales) con polímeros sintéticos (por ejemplo, mezclas de almidón y poliestireno, o almidón y policaprolactona).
- Polímeros sintéticos: como los poliésteres, las poliesteramidas, los poliuretanos, entre otros

En la **Figura 3**, se puede ver algunos de los principales biopolímeros (Calvo, 2013).

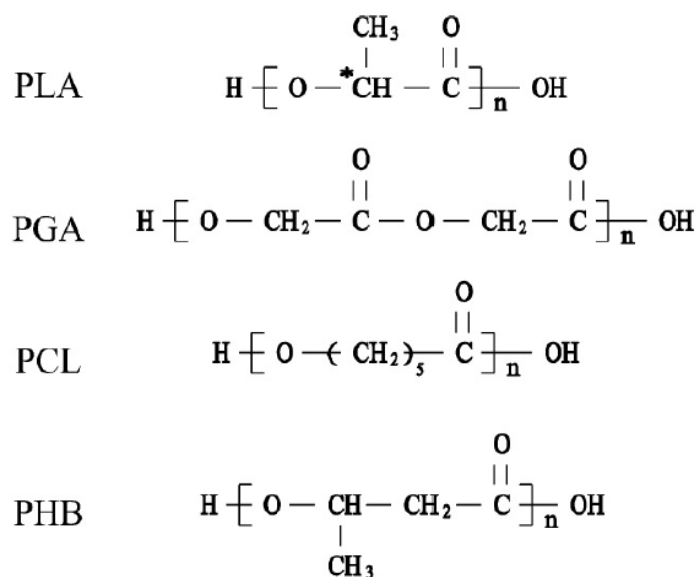


Figura 3. Fórmulas estructurales de los biopolímeros PLA (ácido poliláctico), PGA (ácido poliglicólico), PCL (policaprolactona) y PHB (polihidroxibutirato)

Fuente: (Van de Velde, 2002)

2.1.2 Ácido Poliláctico (PLA)

El PLA es uno de los bioplásticos de mayor consumo en el mundo. Es un poliéster alifático obtenido de fuentes renovables como el azúcar de maíz, el almidón, la papa y la caña de azúcar. El PLA tiene un 37% de cristalinidad, un alargamiento a la rotura del 30,7%, una temperatura de

transición vítrea de 53°C y una temperatura de fusión que oscila entre 170 y 180°C (Vroman I. & Tighzert L., 2009).

Los polímeros encuentran sus aplicaciones en la industria textil y de las fibras, el embalaje, la plasticultura y, lo más importante, en el campo de la medicina, y se utilizan como agentes aromatizantes y conservantes, inhibidores bacterianos en muchos alimentos. (Balaji, Pakalapati, Khalid, Walvekar, & Siddiqui, 2018).

El bloque de construcción básico de PLA es ácido láctico, con átomos de carbono asimétricos que existen en dos configuraciones activas ópticas (L & D). El ácido láctico se deriva de la fermentación bacteriana utilizando especies de *Lactobacillus*, carbohidratos, proteínas y algunos nutrientes como las vitaminas. (Balaji, Pakalapati, Khalid, Walvekar, & Siddiqui, 2018).

El PLA es un polímero constituido por moléculas de ácido láctico a través de una polimerización que puede ser realizada por dos métodos tradicionales: la policondensación directa o la policondensación por apertura del anillo (*Figura 4*). Debido al grupo metil extra que posee, el PLA tiene un comportamiento más hidrofóbico, que por ejemplo el ácido poliglicólico (PGA) (Reed & Gilding, 1981), que se degrada con gran facilidad.

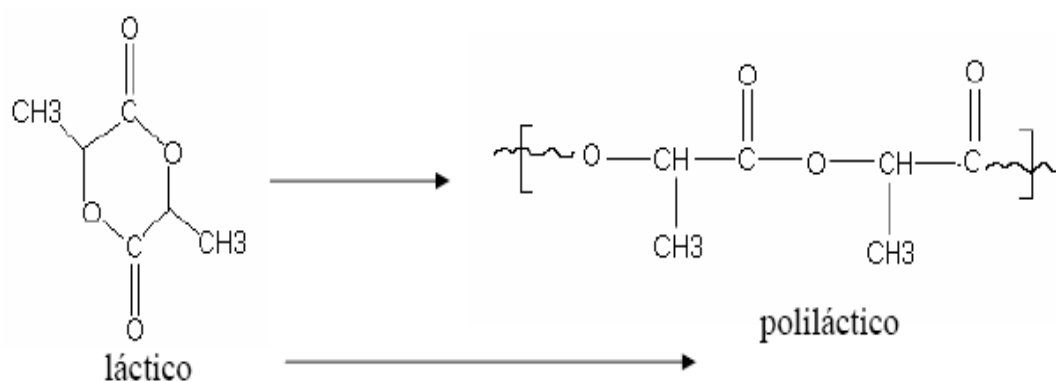


Figura 4. Obtención del ácido poli-láctico a partir del ácido láctico

Fuente: (Calvo, 2013)

El PGA es un polímero con una configuración más sencilla (*Figura 5*) muy usado también en aplicaciones médicas, pero con propiedades no muy distintas al PLA.

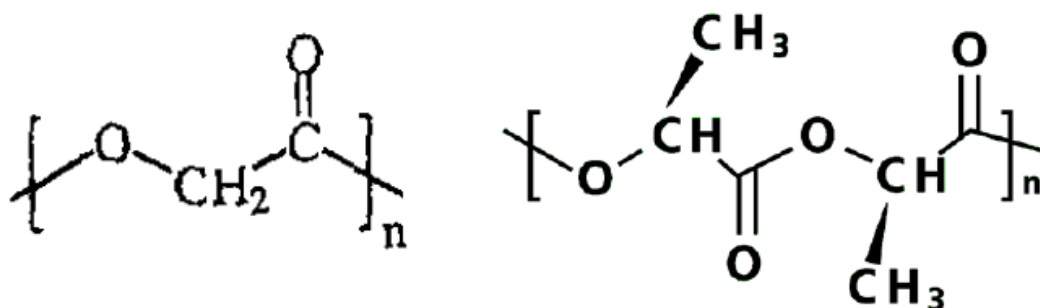


Figura 5. Formulación de la molécula de PGA y PLA

Fuente: (Calvo, 2013)

2.1.3 Propiedades físicas de polímeros biodegradables

La **Tabla 1** muestra los valores de algunas propiedades de estos biopolímeros, incluye también las propiedades de otros biopolímeros con el propósito de poder compararlos.

Tabla 1

Propiedades físicas de varios polímeros

Propiedades	Límites	Tipo de biopolímero							
		PLA	PLLA	DL-PLA	PGA	DL-PLA/PGA 50/50	DL-PLA/PGA 75/25	PCL	PHB
ρ (g/cm ³)	Superior	1,21	1,24	1,25	1,50	1,30	1,3	1,11	1,18
	Inferior	1,25	1,30	1,27	1,707	1,40		1,146	1,262
σ (MPa)	Superior	21	15,5	27,6	60	41,4	41,4	20,7	40
	Inferior	60	150	50	99,7	55,2	55,2	42	
E (GPa)	Superior	0,35	2,7	1	6	1	1,38	0,21	3,5
	Inferior	3,5	4,14	3,45	7	4,34	4,13	0,44	4
ϵ (%)	Superior	2,5	3	2	1,5	2	2,5	300	5
	Inferior	6	10	10	20	10	10	1000	8
σ^* (Nm/g)	Superior	16,8	40,0	22,1	40,0	30,9	31,8	18,6	32,0
	Inferior	48,0	66,8	39,4	>45,1	41,2	42,5	36,7	33,9
E* (KNm/g)	Superior	0,28	2,23	0,80	4,00	0,77	1,06	0,19	2,80
	Inferior	2,80	3,85	2,36	4,51	2,14	2,12	0,38	2,97
T _g (°C)	Superior	45	55	50	35	40	50	-60	5
	Inferior	60	65	60	45	50	55	-65	15
T _m (°C)	Superior	150	170	am.	220	am.	am.	58	168
	Inferior	162	200		233			65	182

Fuente: (Calvo, 2013)

Según (Ultimaker, 2017), las propiedades mecánicas del PLA, se describen en la **Tabla 2**:

Tabla 2

Propiedades mecánicas del PLA

PROPIEDADES MECÁNICAS	VALOR	UNIDAD
Módulo de elasticidad a la tracción	2346,5	MPa
Esfuerzo de tracción a la deformación	49,5	MPa
Esfuerzo de tracción a la rotura	45,6	MPa
Alargamiento a la deformación	3,3	%
Alargamiento a la rotura	5,2	%
Resistencia a la flexión	103	MPa
Módulo de flexión	3150	MPa
Resistencia a la prueba de impacto Izod, con mella (a 23 °C)	5,1	KJ/m2
Dureza	83	Shore D
Índice de fluidez (MFR)	6,09/10	gr/min
Transición vítrea	~60	°C
Temperatura de fusión	145-160	°C
Gravedad específica	1,24	

Fuente: (Ultimaker, 2017)

2.2 Moldeo por Inyección

El moldeo por inyección requiere temperaturas y presiones más elevadas que cualquier otra técnica de transformación, pero proporciona piezas y objetos de bastante precisión (siempre y cuando la resina utilizada no tenga una retracción excesiva), con superficies limpias y lisas, además de proporcionar un magnífico aprovechamiento del material, con un ritmo de producción elevado. Sin embargo, a veces, las piezas deben ser refinadas o acabadas posteriormente, para eliminar rebabas. El fundamento del moldeo por inyección es inyectar un polímero fundido en un molde cerrado y frío, donde solidifica para dar el producto. La pieza moldeada se recupera al abrir el molde para sacarla. (UniOvi, 2018)

Una máquina de moldeo por inyección tiene dos secciones principales (**Figura 6**):

- La unidad o grupo de inyección

- La unidad de cierre, o prensa, que aloja al molde

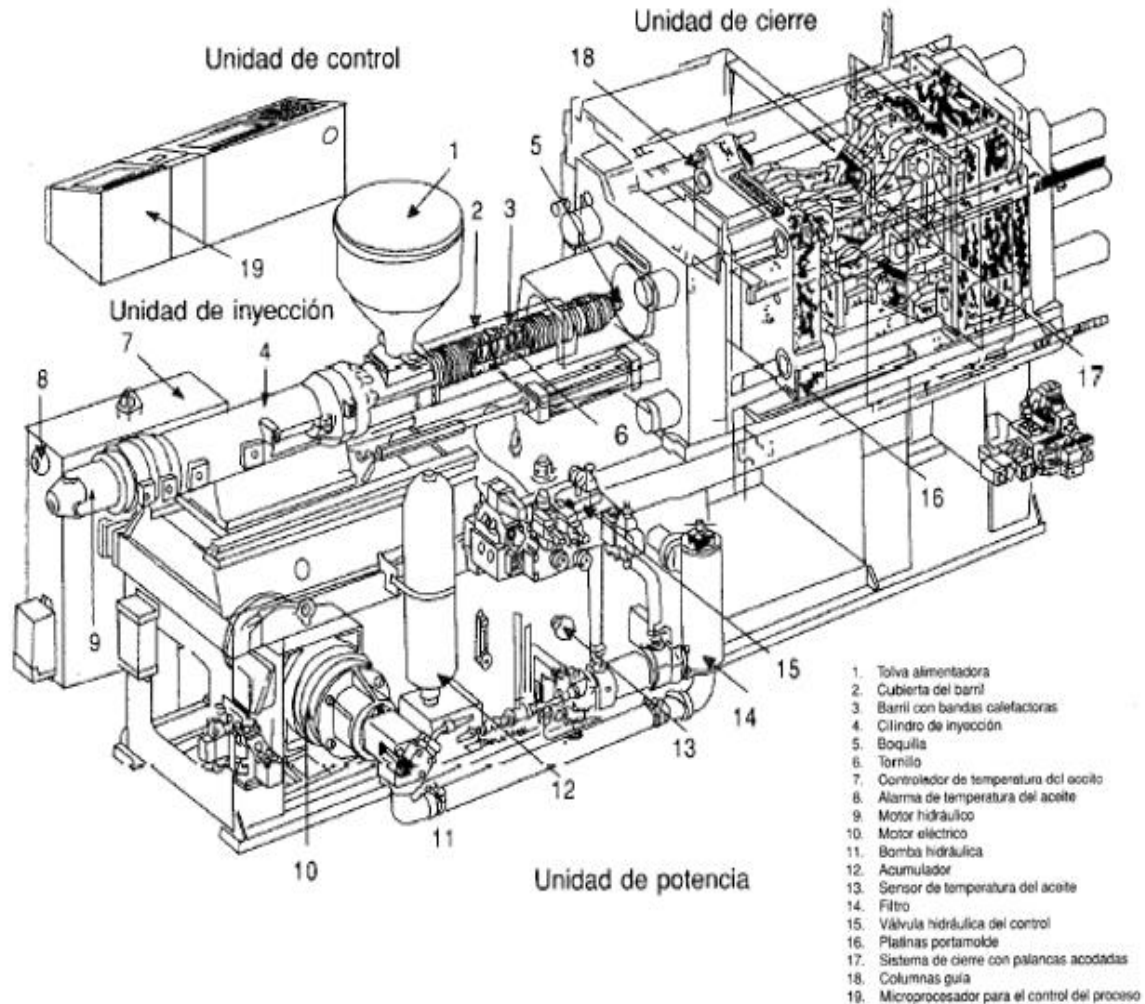


Figura 6. Partes fundamentales de una máquina inyectora

Fuente: (UniOvi, 2018)

2.2.1 Unidad de cierre

Se trata generalmente de una prensa hidráulica o mecánica, con una fuerza de cierre bastante grande que contrarresta la fuerza ejercida por el polímero fundido al ser inyectado en el molde. Las fuerzas localizadas pueden generar presiones del orden de cientos de MPa. Si la fuerza de cierre es insuficiente, el material escapará por la unión del molde, causando así que la pieza final tenga defectos de rebabas. (Baeza, 2015).

La fuerza de cierre se calcula mediante la ecuación,

$$F_c = \frac{P_m \cdot S_p}{100} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

F_c = Fuerza de cierre [kN]

P_m = Presión en el interior de la cavidad [bar]

S_p = Superficie proyectada [cm²]

Es recomendable que la fuerza de cierre máxima de la máquina a seleccionar, sea aproximadamente un 20% superior a la necesaria para la inyección de la pieza en cuestión. (Baeza, 2015).

2.2.1.1 Presión de inyección

Según (Baeza, 2015), esta depende de la configuración de la pieza y de la fluidez del material. Se calcula, con:

$$PL = K_f \cdot K_p \cdot R_f \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

PL = Presión de llenado [bar]

K_f = Factor de fluidez [bar/mm]

K_p = Factor grueso de pared

R_f = Recorrido de fluidez [mm]

El factor de fluidez depende de cada material. Para el caso del PLA es de 6,09/10[g/min] (Rojas & Osswald, 2015).

2.2.1.2 Velocidad de inyección

La velocidad de avance del husillo es la velocidad con la cual el husillo inyecta en el interior del molde la masa plastificada. Para la determinación del tiempo de llenado ideal, deberá iniciarse la inyección ajustada a una baja velocidad, pero con suficiente volumen. Para poder alcanzar cada una de las velocidades de inyección tiene que ajustarse la presión hidráulica al máximo en la fase de llenado. (Baeza, 2015).

2.2.1.3 Monitoreo de temperatura

Para (Baeza, 2015), la temperatura del molde durante el proceso de inyección es determinante para un acabado de calidad en la pieza y la reducción de tiempos de producción. A continuación vemos una **Tabla 3** de referencia con las temperaturas de cavidad aconsejables para distintos materiales.

Tabla 3
Temperaturas para moldes dependientes del material

MATERIAL	RANGO DE TEMPERATURAS [°C]
Acetato de glucosa	40 – 60
Acrílicos	50 – 90
Poliámidas	80 – 120
Policarbonatos	80 – 110
Polietileno B.D.	5 – 50
Polietileno A.D.	5 – 60
Polipropileno	10 – 60
Poliestireno	20 – 50
ABS	50 – 80
Acetatos	70 – 100

Fuente: (Baeza, 2015)

2.2.1.4 Tiempo de enfriamiento

Cuando finaliza el tiempo de llenado de la cavidad comienza el tiempo de enfriamiento de la pieza y finaliza con la expulsión de la misma. Sin embargo, debemos diferenciar entre este y el tiempo de enfriamiento restante que obtenemos de la diferencia entre el tiempo de enfriamiento

físico y el tiempo de postpresión. Determinar un tiempo de enfriamiento correcto es de suma importancia en la fabricación por inyección de plástico ya que puede llegar a significar el 85% del tiempo de ciclo de moldeo. (Baeza, 2015).

Debemos garantizar que la pieza pueda ser desmoldada en el mínimo tiempo posible sin riesgo de deformaciones. Un tiempo demasiado corto aumenta la contracción, las deformaciones por la expulsión en una pieza que no es lo suficientemente rígida aun o incluso en piezas de paredes gruesas puede darse la situación de una nueva fusión del material debido a que la temperatura en el interior de la pieza es aún muy elevada. (Baeza, 2015).

Para calcular el tiempo de enfriamiento conveniente de manera simple aunque aproximada, para un espesor de pared entre 1 y 4 mm, podemos utilizar esta ecuación (Baeza, 2015):

$$TF = \frac{-e_{máx}^2}{2\pi\alpha_n} \cdot \ln \left[\frac{\pi T_{exp} - T_{mold}}{4(T_{mat} - T_{mold})} \right] \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

TF = Tiempo de enfriamiento [seg]

$e_{máx}$ = Espesor máximo de la pieza [cm]

α_n = Difusividad térmica del material [cm²/seg]

T_{exp} = Temperatura de desmoldeo de la pieza [°C]

T_{mold} = Temperatura del molde [°C]

T_{mat} = Temperatura del material [°C]

Como se interpreta por la ecuación, el tiempo de enfriamiento se incrementa con el cuadrado del espesor de la pieza. Para un espesor determinado, una temperatura de molde baja y una temperatura de extracción elevada, se reduce considerablemente el tiempo de enfriamiento. (Baeza, 2015).

2.2.2 Molde de inyección

El molde (**Figura 7**) consta de dos partes o placas que componen la forma que se quiere moldear y se sujeta a las placas de cierre, de la manera más simple, en dos mitades. La parte de la izquierda es fija y la de la derecha es móvil. La exactitud del mecanizado es fundamental para prevenir la formación de una fina capa de plástico (flash) en las juntas que separan ambas partes del molde. Los tamaños de los moldes van desde los 5 mm de diámetro de los marcos portabolas del cojinete hasta los 4 m de los cascos de los barcos. (UniOvi, 2018).

Independientemente del tamaño de la pieza a fabricar, las partes del molde son las mismas para todas ellas (UniOvi, 2018):

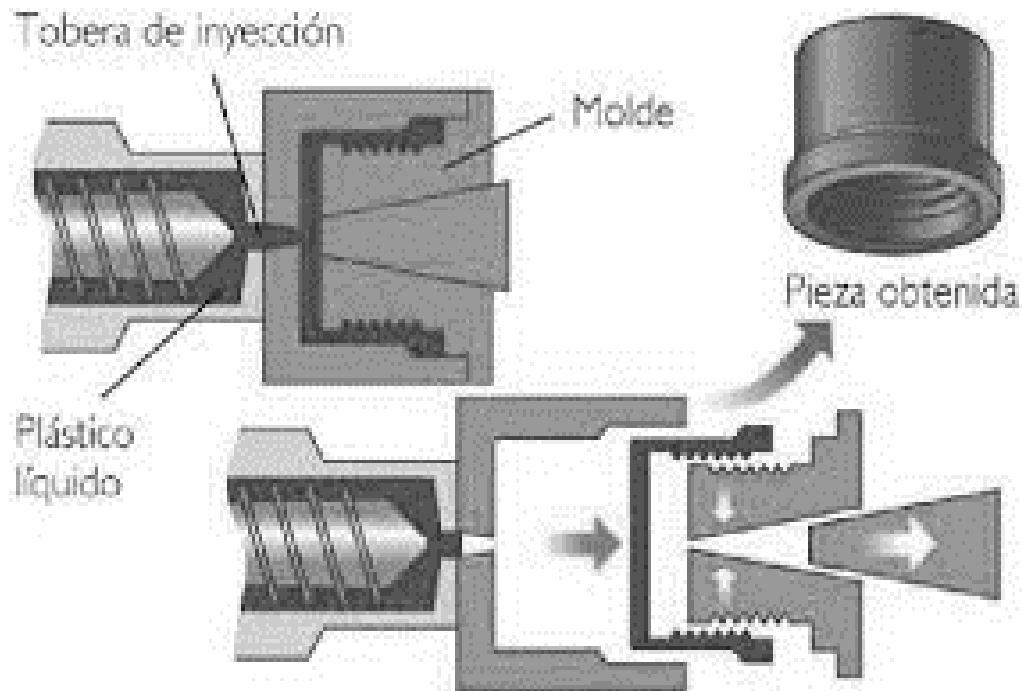


Figura 7. Detalle del molde de inyección

Fuente: (UniOvi, 2018)

2.2.2.1 Placas de apoyo

Permiten integrar dentro de la estructura de la máquina el molde, las mismas que cumplen la función de soporte que impide el libre movimiento del molde, logrando de esta manera un agarre firme con la inyectora. Generalmente son de acero.

2.2.2.2 Canales de enfriamiento

Según, (UniOvi, 2018), los moldes se suministran con canales de enfriamiento a través de los cuales pasa el agua. La temperatura del agua varía para los diversos productos. El agua muy fría da los tiempos de circulación más cortos, pero algunas veces se requieren temperaturas más altas del molde, especialmente con polímeros cristalinos, con el fin de lograr las propiedades óptimas del producto terminado.

Están calculados para controlar la temperatura del molde con gran precisión en el rango comprendido entre los 20 y los 100 °C. Las condiciones típicas de trabajo vienen dadas en la **Tabla 4**.

Tabla 4
Condiciones del moldeo por inyección de termoplásticos

Polymer	T_g °C	T_M °C	T_{poly} °C	T_{mould} °C
<i>Amorphous polymers</i>				
PC	150	-	280 - 320	85 - 120
SAN	120	-	200 - 260	30 - 85
ABS	100	-	200 - 280	40 - 90
PS	100	-	170 - 280	5 - 70
PMMA	105	-	150 - 200	50 - 90
uPVC	82	-	180 - 210	20 - 60
<i>Semi-crystalline polymers</i>				
PET	70	265	270 - 280	120 - 140
PTFE	40	220	220 - 280	80 - 130
PA 6	50	215	230 - 290	40 - 60
POM	-82	181	180 - 230	60 - 120
PP	-15	176	200 - 300	20 - 60
HDPE	-80	135	240 - 300	20 - 60
LDPE	-80	115	180 - 260	20 - 60

Fuente: (UniOvi, 2018)

2.2.2.3 Pernos de expulsión

Sirven para separar la parte fija de la parte móvil permitiendo que quede liberada la pieza moldeada. Se accionan mecánicamente por medio de un tornillo de resalto. Cuando se llena el molde se debe extraer el aire que se halla en él. Por lo común, esto pasa de manera espontánea gracias al espacio libre de los pernos expulsores, pero algunas veces se abren pequeños orificios de

ventilación, de unos 0,025 mm de diámetro, suficiente para que salga el aire y no permita la entrada de material fundido. (UniOvi, 2018)

Si la ventilación es inadecuada, puede haber fallos en el proceso o en el producto. El caso más crítico es que quede atrapada una burbuja de aire, lo que provocaría un hoyo en la pieza moldeada. Un fallo más común es que el material se quemara, debido a un escape rápido del aire. El aire puede escapar tan rápido que la temperatura se eleve lo suficiente como para degradar localmente el polímero y provocar quemaduras sobre la pieza moldeada. (UniOvi, 2018)

2.2.2.4 Pernos guía

Aseguran una perfecta alineación de la cavidad del molde con el resto de la estructura. Es decir, aseguran la exactitud del molde. (UniOvi, 2018)

2.2.2.5 Anillo de localización

Según (UniOvi, 2018), asegura la correcta alineación con el canal de salida (boquilla) de la máquina de inyección. El plástico fundido sigue el siguiente camino desde la máquina hasta la cavidad de impresión de la pieza requerida:

Boquilla \rightleftharpoons Cavidad de entrada al molde (sprue bush) \rightleftharpoons Canales \rightleftharpoons Cavidad de entrada a la zona de impresión \rightleftharpoons Zona de impresión (molde)

2.2.2.6 Bebedero (sprue bush)

Es el canal que une la cavidad del molde con la boquilla de la máquina y por el cual el material entra al molde. Este canal está en la parte fija del molde, y sin embargo, el plástico que solidifica en su interior ha de salir cuando se desmoldea (**Figura 8**). Para que esto se lleve a cabo perfectamente esta cavidad incorpora una clavija de sujeción en su parte final que “corta” el plástico para que deslice más fácilmente. Debido al desgaste al que está sometido este canal, se hacen reemplazables y de fácil colocación. (UniOvi, 2018)

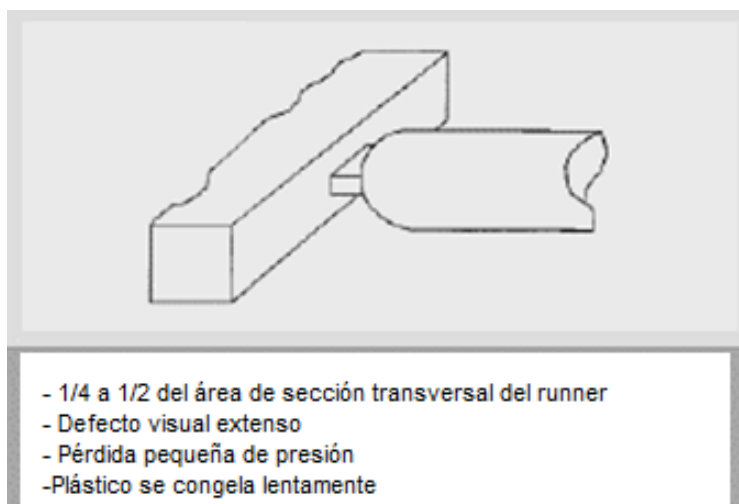


Figura 8. Orificio para la inyección del material convencional

Fuente: (UniOvi, 2018)

2.2.2.7 Canales de colada o alimentación (runners)

Son los canales que conectan el bebedero (sprue bush) con la entrada de la cavidad (gate) al objeto de transferir el plástico fundido a las cavidades del molde. Usados en los moldes con varias zonas de impresión para conectar el primer canal de entrada al molde (sprue bush) con las diferentes zonas de impresión. Su geometría ideal responde a formas con grandes secciones transversales (para que fluya bien el polímero fundido), pero con pequeñas áreas superficiales (para reducir las posibilidades de un enfriamiento prematuro). El tamaño de los canales depende del material que se está moldeando. Además deben de ser lo más cortos que sea posible, con el fin de reducir pérdidas de presión innecesarias. (UniOvi, 2018).

2.3 Artritis

La artritis es la inflamación de las articulaciones por efecto de degradación que sufren los cartílagos que recubre las terminaciones de los huesos en el cuerpo humano. Varios pueden ser los orígenes de ésta enfermedad degenerativa que sufre la mayor parte de la población entre las cuales podemos mencionar:

- Enfermedad Auto-inmunitaria (el sistema inmunitario del cuerpo ataca por error al tejido sano)
- Fractura ósea
- Desgaste y deterior general de las articulaciones
- Infección por bacterias o virus
- Cristales como el ácido úrico o el dihidrato de pirofosfato cálcico

Dentro de ésta enfermedad degenerativa existen varias zonas a las que puede afectar y provoca serias complicaciones, una de las cuales podemos mencionar como Artritis de Manos, cuyo principal efecto es la limitación de movilidad en estos miembros, como se aprecia en la **Figura 9**.



Figura 9. Artritis de Manos

Fuente: (Rockville , 2017)

Considerando la limitación de movilidad que sufren las manos a causa de ésta enfermedad, se analizan las dificultades que presentan los pacientes en la vida diaria y una de ellas es a la hora de servirse los alimentos, es por ello que con el apoyo en la tecnología se pretende ayudar a las personas que sufren de artritis en las manos. El presente trabajo de investigación se enfoca en la manufactura de cubiertos y utensilios de cocina, **Figura 10**, que a pesar de la limitada capacidad de movilidad en las manos de éstas personas, puedan seguir manipulando de forma razonable.



Figura 10. Cubierto para personas con poca fuerza en la mano
Fuente: (DISCUBRE, 2018)

2.4 Antropometría de la mano

La antropometría se define como una rama de las ciencias humanas que trabaja con las dimensiones del cuerpo; particularmente: talla, forma, fuerza, flexibilidad, movilidad y capacidad de trabajo. Los humanos son variables (en dimensión, proporción, forma, y en otras características) y el diseño de usuario está centrado en la comprensión de esta variabilidad (Pheasant, 2003).

Según (Mondelo, 1994), la antropometría es “la disciplina que describe las diferencias cuantitativas de las medidas del cuerpo humano, estudia las dimensiones tomando como referencia distintas estructuras anatómicas, y sirve de herramienta en la ergonomía con objeto de adaptar el entorno a las personas”.

Para la realización de una tarea manual específica existen múltiples factores que se requieren para realizarla de manera óptima. Destreza, precisión, factores psicomotrices, control de la fuerza y control de los movimientos de la mano, son algunos de esos factores. Pero debemos considerar un factor muchas veces no tan evidente como lo es la antropometría característica, además de entender la relación que se establece entre esta y la eficiencia, efectividad, confort y

salud en tareas manuales determinadas, sobre todo durante la manipulación de herramientas. (Cubillos & Medina, 2010).

Según (Cubillos & Medina, 2010), existen diversas medidas importantes que se pueden obtener de registros antropométricos básicos de la mano. Un ejemplo de esas medidas son las que muestran en la **Tabla 5** en donde podemos ver datos de antropométricos de la población adulta británica. Algunas de estas medidas se hacen indispensables al momento de la correcta creación y diseño implementos manuales.

Estas medidas sirven como referencia para las dimensiones que se requieren para la elaboración de conceptos acordes a nuestra realidad local.

Tabla 5

Medidas antropométricas de una población británica estándar

Dimension	Men				Women			
	5th %ile	50th %ile	95th %ile	SD	5th %ile	50th %ile	95th %ile	SD
1. Hand length	173	189	205	10	159	174	189	9
2. Palm length	98	107	116	6	89	97	105	5
3. Thumb length	44	51	58	4	40	47	53	4
4. Index finger length	64	72	79	5	60	67	74	4
5. Middle finger length	76	83	90	5	69	77	84	5
6. Ring finger length	65	72	80	4	59	66	73	4
7. Little finger length	48	55	63	4	43	50	57	4
8. Thumb breadth (IPJ) ^a	20	23	26	2	17	19	21	2
9. Thumb thickness (IPJ)	19	22	24	2	15	18	20	2
10. Index finger breadth (PIPJ) ^b	19	21	23	1	16	18	20	1
11. Index finger thickness (PIPJ)	17	19	21	1	14	16	18	1
12. Hand breadth (metacarpal)	78	87	95	5	69	76	83	4
13. Hand breadth (across thumb)	97	105	114	5	84	92	99	5
14. Hand breadth (minimum) ^c	71	81	91	6	63	71	79	5
15. Hand thickness (metacarpal)	27	33	38	3	24	28	33	3
16. Hand thickness (including thumb)	44	51	58	4	40	45	50	3
17. Maximum grip diameter ^d	45	52	59	4	43	48	53	3
18. Maximum spread	178	206	234	17	165	190	215	15
19. Maximum functional spread ^e	122	142	162	12	109	127	145	11
20. Minimum square access ^f	57	67	77	6	51	59	66	5

^a IPJ is the interphalangeal joint, i.e., the articulation between the two segments of the thumb.

^b PIPJ is the proximal interphalangeal joint, i.e., the finger articulation nearest to the hand.

^c As for dimension 12, except that the palm is contracted to make it as narrow as possible.

^d Measured by sliding the hand down a graduated cone until the thumb and middle fingers only touch.

^e Measured by gripping a flat wooden wedge with the tip end segments of the thumb and ring fingers.

^f The side of the smallest equal-sided aperture through which the hand will pass.

Fuente: (Pheasant, 2003)

Según (Yunis, 2005), ocho dimensiones han sido identificadas como útiles para el diseño de herramientas de uso manual, estas son: longitud de la mano, longitud de la palma, ancho de la

mano, ancho máximo de la mano, diámetro de agarre, espesor de la mano, circunferencia de la mano y circunferencia máxima de la mano, como se muestra en la **Figura 11**.

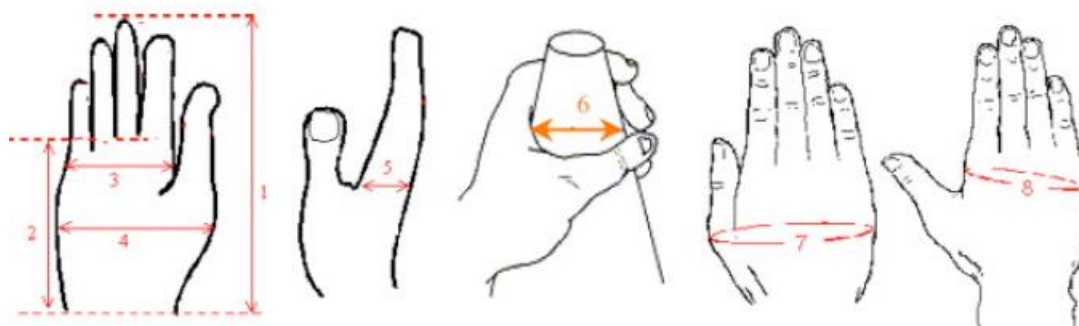


Figura 11. Medidas antropométricas de la mano

Fuente: (Yunis, 2005)

En donde los números representan y se miden de la siguiente manera:

Tabla 6

Descripción de las medidas antropométricas de la mano

DIMENSIÓN	UBICACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	Longitud máxima de la mano	Medido desde el pliegue más distal y palmar de la muñeca, hasta el extremo distal de la tercera falange
2	Longitud de la mano o longitud palmar	Desde el pliegue más distal y palmar de la muñeca hasta la una línea proyectada desde el pliegue más proximal de la segunda falange
3	Ancho de la mano	Distancia entre las cabezas del segundo y quinto metacarpiano desde su zona más lateral
4	Ancho máximo de la mano	Distancia entre la cabeza del quinto metacarpiano por lateral hasta cabeza del primer metacarpiano por lateral
5	Espesor de la mano	Se mide con la mano desde una proyección lateral y es la distancia que se comprende entre una línea proyectada desde la cabeza del segundo metacarpiano por palmar, hasta una línea proyectada del segundo metacarpiano por dorsal
6	Diámetro de agarre	Se toma el diámetro máximo de agarre solicitado en una estructura cónica entre la primera y tercera falange
7	Circunferencia máxima de la mano	Se registra rodeando la muñeca en torno a la cabeza del primer metacarpiano pasando por la eminencia hipotenar
8	Circunferencia de la mano	Se registra rodeando la mano a modo de perímetro pasando por la cabeza del quinto metacarpiano siendo como punto de partida y

CONTINÚA



		término algún punto en la cabeza del segundo metacarpiano
9	Longitud de las falanges	Se miden por la cara dorsal de la mano con las falanges flexionadas en 90° y se mide la distancia entre la cabeza del metacarpiano correspondiente y el extremo de la misma falange

Fuente: (Yunis, 2005)

2.5 Impresión 3D

La impresión 3D, como se muestra en la **Figura 12**, es un proceso aditivo que construye objetos de una capa a la vez de abajo hacia arriba. La tecnología adecuada depende de los materiales, la estética, las propiedades mecánicas y el rendimiento que se requieren. Generalmente se utilizan polímeros para este tipo de herramientas de prototipado rápido, como el PLA, ABS, PET; actualmente esta tecnología ha emigrado a otras aplicaciones como la medicina, manufactura con metales, alimentos, etc.

Es un método de fabricación y prototipado rápido, ampliamente usado en la industria desde hace más de 20 años, consiste en generar modelos con volumen en variedad de materiales a partir de un archivo digital. (M3D, 2015).

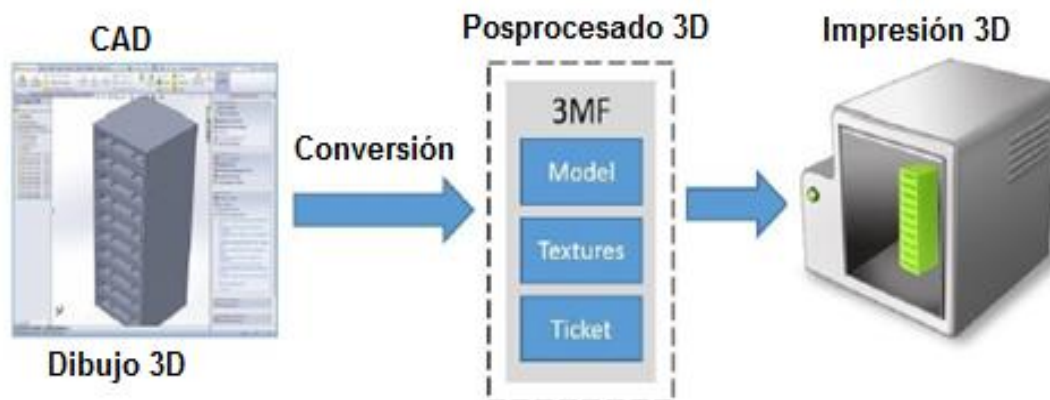


Figura 12. Secuencia de la impresión 3D

Fuente: (M3D, 2015)

2.5.1 Tecnologías de Impresión 3D

2.5.1.1 FMD (Fused Deposition Modeling)

Modelado por filamento extruido por una boquilla para construir objetos en plástico principalmente (**Figura 13**). Crea piezas capa por capa con termoplásticos de grado de ingeniería. FDM se utiliza a menudo para construir geometrías complejas y piezas funcionales, como prototipos, piezas de producción de bajo volumen, ayudas de manufactura, plantillas y fijaciones. Patentado en 1989 por Scott Crump. (stratasys, 2018).

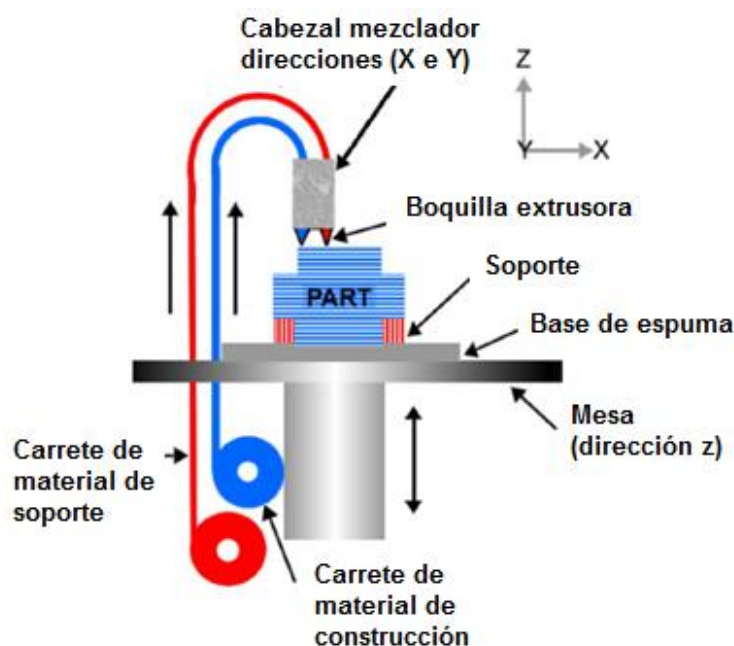


Figura 13. Impresión 3D por tecnología FMD

Fuente: (M3D, 2015)

2.5.1.2 PJ – Polyjet

Es un proceso de impresión 3D que inyecta y cura delgadas capas de fotorpolímero líquido con energía UV. Es capaz de imprimir en capas de 16 micrones y en múltiples durómetros y muchos colores para piezas de varios materiales, como se muestra en la **Figura 14**. PolyJet es una excelente opción para modelos y prototipos realistas de alta resolución, moldes de inyección de tirada corta y patrones maestros para moldaje por uretano. Se llena una cámara con resina fotorpolímero y una luz UV cura la resina una capa tras otra. Patentado en 2007 por Objet Inc. (stratasys, 2018).

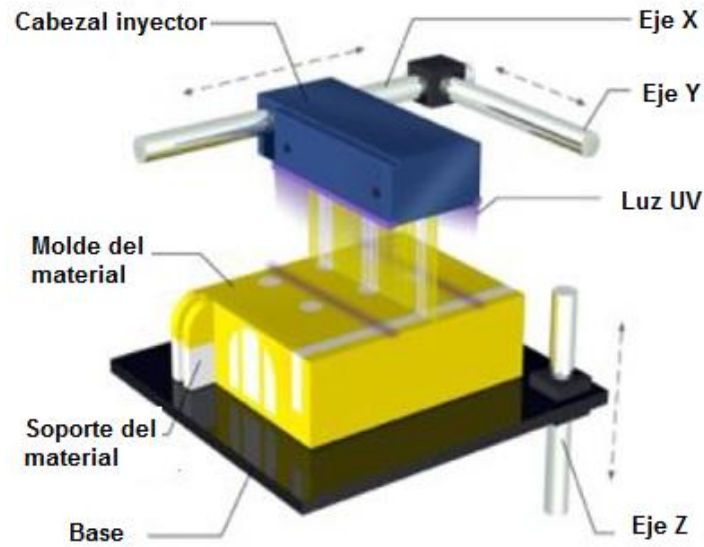


Figura 14. Impresión 3D por PJ-Polyjet
Fuente: (M3D, 2015)

2.5.1.3 SLS (*Selective Laser Sintering*)

La sinterización por láser (también conocida como sinterización por láser selectiva, SLS o LS), **Figura 15**, utiliza un láser CO₂ para calentar y fundir el polvo termoplástico resistente para construir piezas versátiles con una elevada elongación a quiebre. Las piezas y los prototipos de producción de LS proporcionan soluciones livianas, resistentes al calor y a los químicos. Patentado en 1986 por Dr. Carl Deckard. (M3D, 2015).

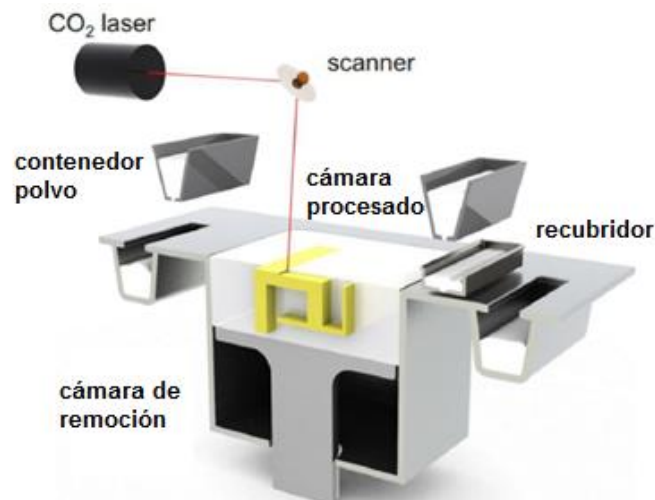


Figura 15. Impresión 3D por SLS
Fuente: (M3D, 2015)

2.5.1.4 STL (Stereolitografía)

La estereolitografía (también conocido como SL o SLA) fabrica piezas capa por capa mediante un láser UV para solidificar las resinas de fotopolímero líquido, como se indica en la **Figura 16**. Se utiliza comúnmente para producir modelos conceptuales, patrones maestros, prototipos grandes y patrones de moldeado por inversión. Patentado en 1986 por Chuck Hall. (M3D, 2015)

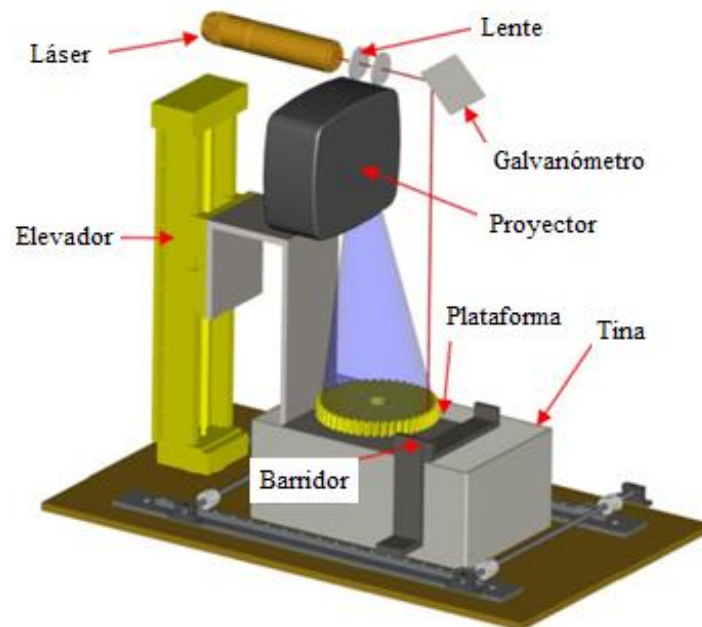


Figura 16. Impresión 3D por STL
Fuente: (M3D, 2015)

2.6 Desarrollo del Concepto

Según (Ulrich & Eppinger, 2013), un proceso de desarrollo del producto es la secuencia de pasos o actividades que una empresa utiliza para concebir, diseñar y comercializar un producto. Muchos de estos pasos y actividades son intelectuales y organizacionales más que físicos.

Según (Ulrich & Eppinger, 2013), el proceso de desarrollo de concepto incluye las siguientes actividades, como se muestra en la **Figura 17**:

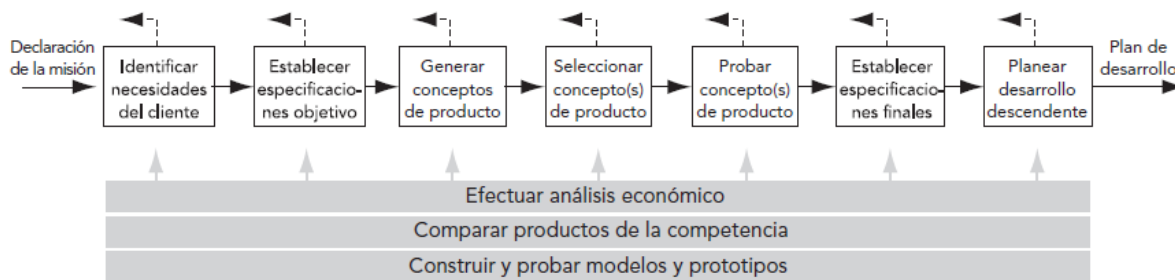


Figura 17. Fases de desarrollo del concepto

Fuente: (Ulrich & Eppinger, 2013)

- **Identificar las necesidades del cliente:** El objetivo de esta actividad es entender las necesidades del cliente y comunicarlas en forma efectiva al equipo de desarrollo. El resultado de este paso es un conjunto de enunciados cuidadosamente contruidos de las necesidades del cliente, organizados en una lista jerárquica con valores de importancia para muchas o todas las necesidades.
- **Establecer especificaciones objetivo:** Las especificaciones dan una descripción precisa de lo que el producto tiene que hacer. Son la traducción de las necesidades del cliente en términos técnicos. Los objetivos de las especificaciones se establecen claramente en el proceso y representan las expectativas del equipo de desarrollo. Posteriormente, estas especificaciones se refinan para que sean consistentes con las restricciones impuestas por la selección de un concepto de producto realizada por el equipo. El resultado de esta etapa es una lista de especificaciones objetivo. Cada una de las especificaciones consta de una métrica, así como de valores marginales e ideales para ésta.
- **Generación de conceptos:** La meta de la generación de conceptos es explorar en su totalidad el universo de conceptos de producto que puedan abordar las necesidades del cliente. La generación de conceptos incluye una mezcla de búsqueda externa, solución creativa de problemas dentro del equipo y exploración sistemática de los diversos fragmentos de solución que genera el equipo. El resultado de esta actividad es por lo general un conjunto de 10 a 20 conceptos, cada uno de ellos típicamente representado por un bosquejo y un breve texto descriptivo.

- **Selección del concepto:** La selección del concepto es la actividad en la que se analizan y en forma secuencial se eliminan varios conceptos de producto, con objeto de identificar el concepto(s) más prometedor(es). El proceso requiere por lo general de varias iteraciones y puede iniciar la generación y refinamiento de conceptos adicionales.
- **Prueba del concepto:** Uno o más conceptos se prueban para verificar que las necesidades del cliente se han satisfecho, se evalúa el potencial de mercado del producto y se identifica cualquier defecto que debe ser corregido durante un desarrollo posterior. Si la respuesta del cliente es mala, el proyecto del desarrollo puede terminar o se pueden repetir actividades anteriores según sea necesario.
- **Establecer especificaciones finales:** Las especificaciones objetivo establecidas antes en el proceso se revisan después de que un concepto se ha seleccionado y probado. En esta etapa, el equipo debe dedicarse a especificar valores de la métrica que reflejen las restricciones inherentes en el concepto del producto, limitaciones identificadas por medio de modelado técnico y concesiones entre costo y desempeño.
- **Planeación del proyecto:** En esta actividad final del desarrollo del concepto, el equipo crea un programa detallado de desarrollo, concibe una estrategia para reducir al mínimo el tiempo de desarrollo e identifica los recursos necesarios para completar el proyecto. Los resultados principales de las actividades iniciales se pueden capturar de manera útil en una bitácora que contiene la declaración de la misión, las necesidades del cliente, los detalles del concepto seleccionado, las especificaciones del producto, el análisis económico del producto, el programa de desarrollo, la asignación de personal para el proyecto y el presupuesto. La bitácora sirve para documentar el convenio (contrato) entre el equipo y la alta administración de la empresa.
- **Análisis económico:** El equipo, a veces con el apoyo de un analista financiero, construye un modelo económico para el nuevo producto. Este modelo se usa para justificar la

continuación del programa general de desarrollo y para resolver concesiones específicas, por ejemplo, entre costos de desarrollo y costos de manufactura. El análisis económico se muestra como una de las actividades en curso de la fase de desarrollo del concepto. Un análisis económico previo casi siempre se efectuará incluso antes de que el proyecto se inicie y este análisis se actualiza a medida de que se disponga de más información.

- **Comparación de productos de la competencia:** Es de suma importancia la comprensión de los productos de la competencia para lograr el posicionamiento exitoso de un nuevo producto; además, este conocimiento puede ser una rica fuente de ideas para el diseño del producto y el proceso de producción. La comparación de productos de la competencia se efectúa en apoyo de muchas de las actividades iniciales.
- **Modelado y construcción de prototipos:** Cada una de las etapas del proceso de desarrollo del concepto abarca varias formas de modelos y prototipos. Éstas pueden incluir, entre otras: modelos iniciales para “pruebas de concepto”, que ayudan al equipo de desarrollo a demostrar la factibilidad; modelos “sólo de forma”, que se pueden presentar a clientes para evaluar la ergonomía y el estilo; modelos de hoja de cálculo de concesiones técnicas, y modelos experimentales de prueba, que se pueden usar para establecer parámetros de diseño para desempeño robusto.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS DE CUBERTERÍA

Para el desarrollo de los posibles conceptos, se aplica la metodología sugeridas por (Ulrich & Eppinger, 2013), descrita en la *Figura 17*, y utilizando los datos obtenidos por el estudio “Propuesta para mejorar la funcionalidad de la mano de una persona que sufre artritis” (Universidad Autónoma de Occidente, 2014).

A continuación se procede con el desarrollo de los conceptos.

3.1 Identificación de necesidades

Para la identificación de las necesidades se utilizará el estudio (Universidad Autónoma de Occidente, 2014) donde se determinaron en un grupo formado por 36 personas con artritis en las manos, que se detallan en **Tabla 7**.

Tabla 7

Necesidades registradas a 36 personas con artritis en las manos

Necesidad General:

Diseñar cubertería para personas que sufran de artritis para que les permita la manipulación de alimentos con agarre firme, disminuya la deformación característica de la enfermedad y permitiendo al usuario desempeñar actividades cotidianas con normalidad sin un considerable gasto energético.

Orden	Necesidad Detectada
1	Seguro
2	Ergonómico
3	Liviano
4	Que permita solucionar múltiples tareas cotidianas
5	Estética
6	Realizar movimientos de desplazamiento
7	Tener agarre firme
8	Tener dimensiones proporcionales
9	Fácil de usar
10	Resistentes a factores tribológicos
11	Portable
12	Que permita el normal desempeño de usuario
13	Que genere poco gasto energético de parte del usuario
14	Que no fomente las deformaciones existente de las personas que sufren artritis, en lo posible que las detenga o disminuya
15	Agarre objetos

Fuente: (Universidad Autónoma de Occidente, 2014)

3.2 Establecer especificaciones – objetivo

En la **Tabla 8**, se clasifican las necesidades de acuerdo a criterios de utilidad, siendo: *metas y/o objetivos*: necesidades relevantes que están acorde al objetivo del proyecto; *restricciones*: posibles limitaciones para el diseño de conceptos; *funciones*: actividades que cumplirán los conceptos.

Tabla 8

Listado de criterios de utilidad

Orden	Necesidad Específica	Metas y/o objetivos	Restricciones	Funciones
1	Liviano	X		
2	Ergonómico	X		
3	Seguro			X
4	Que permita solucionar múltiples tareas cotidianas			X
5	Estética	X		
6	Realizar movimientos de desplazamiento	X		
7	Tener agarre firme	X		
8	Tener dimensiones proporcionales	X		
9	Fácil de usar			X
10	Resistentes a factores tribológicos		X	
11	Portable	X		
12	Que permita el normal desempeño de usuario	X		
13	Que genere poco gasto energético de parte del usuario	X		
14	Que no fomente las deformaciones existente de las personas que sufren artritis, en lo posible que las detenga o disminuya	X		
15	Agarre objetos			X

Fuente: (Universidad Autónoma de Occidente, 2014)

En la **Tabla 9**, se hace una jerarquización de las necesidades – objetivos seleccionados en la **Tabla 8**, considerando tres criterios conceptuales: armónico con el usuario; equilibrio entre usuarios, forma y función; estética y seguridad.

Se utiliza la siguiente escala de ponderación de importancia:

1 = Alta

2 = Media

3 = Baja

Tabla 9*Jerarquización de las necesidades – objetivos*

Orden	Objetivo	Interpretación del Objetivo	Criterios conceptuales			
			Armónico con el usuario	Equilibrio entre usuario, forma y función	Estética	Seguridad
1	Liviano	Movimiento fluido		3		
2	Ergonómico	Ergonómico	2			
3	Estética	Acabados estéticos			2	
4	Realizar movimientos de desplazamiento, rotación y traslación	Desplazamiento		2		
5	Tener agarre firme	Agarre Firme		1		
6	Fácil de usar	Fácil de usar	1			
7	Portable	Portable	3			
8	Que permita el normal desempeño de usuario	Buenas proporciones			1	
9	Que genere poco gasto energético de parte del usuario					
10	Que no fomente las deformaciones, en lo posible que las detenga	No fomenta deformaciones				1

Fuente: (Universidad Autónoma de Occidente, 2014)

En la **Tabla 10** se describen las especificaciones métricas que debe cumplir el prototipo con el objetivo de determinar sus características precisas y medibles que satisfagan las necesidades detectadas. Dichos valores de las métricas son tomadas como promedio de varios cubiertos plásticos que se comercializan libremente.

Tabla 10*Lista de métricas para cubertería*

Orden	Número de necesidad	Métrica	Unidades	Valores
1	1,7, 9	Peso	gramos	8
2	2, 3, 6,8	Dimensiones geométricas	milímetros	160x35x1
3	4	Giros	grados	360
4	5	Elasticidad	Mpascal	80
5	10	Deformación	milímetro/milímetro	60

A continuación en la **Tabla 11** se realiza una Matriz de Pares, la misma que permite dar un peso en relevancia a cada objetivo descrito en la **Tabla 9**.

Tabla 11
Matriz de Pares

OBJETIVOS	Fácil de usar	Ergonómico	Portable	Agarre Firme	Desplazamiento	Movimiento fluido	Buenas proporciones	Acabados estéticos	No fomenta deformaciones	Total	Total Normalizado	Total en Porcentaje
Fácil de usar		0	0	0	0	1	1	1	0	3	4	9%
Ergonómico	1		0	0	1	1	1	1	0	5	6	13%
Portable	1	1		1	1	1	1	1	0	7	8	18%
Agarre Firme	1	1	0		1	1	1	1	0	6	7	16%
Desplazamiento	1	0	0	0		1	1	1	0	4	5	11%
Movimiento fluido	0	0	0	0	0		1	1	0	2	3	7%
Buenas proporciones	0	0	0	0	0	0		1	0	1	2	4%
Acabados estéticos	0	0	0	0	0	0	0		0	0	1	2%
No fomenta deformaciones	1	1	1	1	1	1	1	1		8	9	20%
TOTAL										36	45	100%

Fuente: (Universidad Autónoma de Occidente, 2014)

De la matriz de pares, se deduce que el límite de relevancia será el 10%, obteniéndose los siguientes resultados para objetivos de mayor importancia puesto que los otros no se considerarán.

1. No fomenta deformaciones	20%
2. Portable	18%
3. Agarre firme	16%
4. Ergonómico	13%
5. Desplazamiento	11%

En conclusión,

- a) El primer criterio conceptual que presenta mayor peso de ponderación porcentual, descrito en la **Tabla 9** es:

Armónico con el usuario	40%
-------------------------	-----

El cual contiene dos objetivos, cuya ponderación en la **Tabla 11**, es:

1. Portable	18%
2. Ergonómico	13%

- b) El segundo criterio conceptual que presenta mayor peso de ponderación porcentual, descrito en la **Tabla 9** es:

Equilibrio entre usuario, forma y función	34%
---	-----

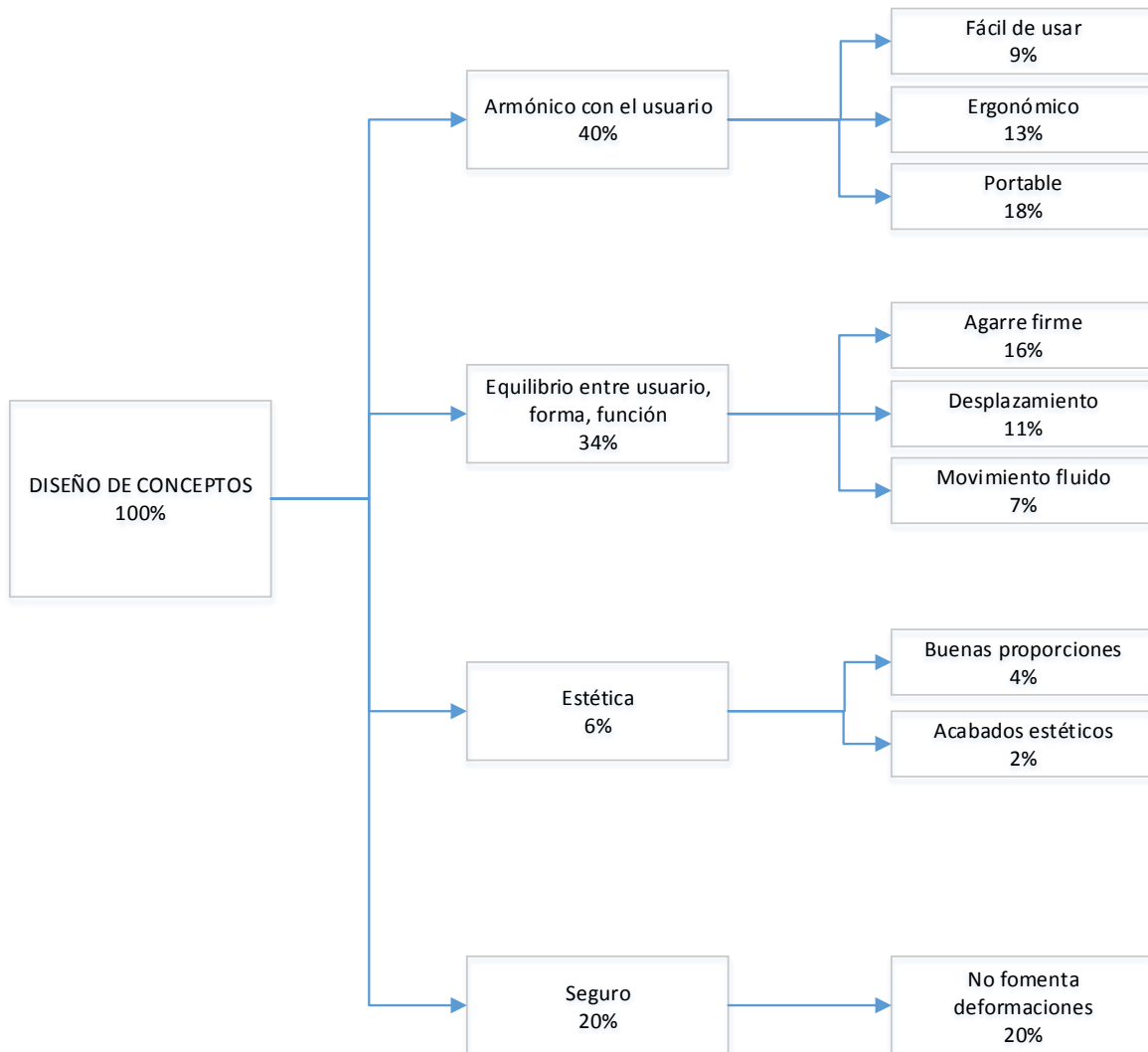
El cual contiene dos objetivos, cuya ponderación en la **Tabla 11**, es:

1. Agarre firme	16%
2. Desplazamiento	11%

- c) De acuerdo a la **Tabla 11**, el objetivo que más consideración amerita para la generación de conceptos es “No fomenta deformaciones” pues tiene 20% de ponderación.

A continuación, se resume lo antes expuesto en el mapa conceptual de la **Tabla 12**.

Tabla 12
Objetivos ponderados



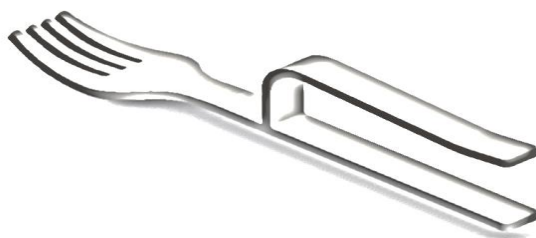
Cabe recalcar que para el diseño de conceptos se deben considerar todas las necesidades (objetivos) antes descritas, pero principalmente las que tienen mayor ponderación, como es el caso de “No fomenta deformaciones” con un 20%.

De acuerdo a la metodología propuesta por (Ulrich & Eppinger, 2013), y considerando la información anterior, se procede con la generación conceptos de productos.

3.3 Generación de conceptos

A partir del análisis realizado a las necesidades, se proponen los siguientes conceptos:

3.3.1 Concepto A



Utensilio con acople sobre el mango.

Tiene una abertura que permite insertarse entre la palma y dorso de cualquiera de las manos que presenten dificultades en su apertura y cierre debido a rigidez en los tendones.

Provee de firmeza en cuando a la manipulación de los alimentos, es de fácil movimiento y traslado, posee una abertura con la dimensión acorde a un tamaño de mano estándar y sobretodo impide movimientos bruscos de los músculos.

Figura 18. Bosquejo del concepto A

3.3.2 Conceptos B



Utensilio con mango grueso.

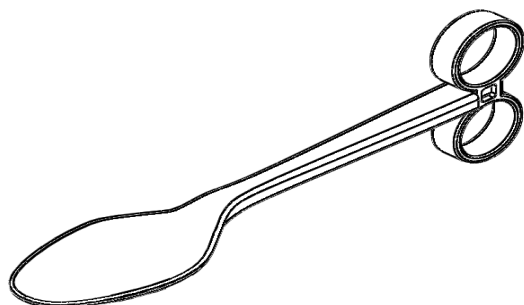
Este tenedor presenta un mango con diámetro mayor respecto a los mangos tradicionales.

Permite mejorar el agarre con los dedos; tiene un peso reducido debido a que el mango es hueco, logrando de esta manera una mejor portabilidad.

Presenta una inclinación en el vástago para facilitar el desplazamiento desde los alimentos hacia la boca sin tener que hacer movimientos bruscos de la mano afectada.

Figura 19. Bosquejo del concepto B

3.3.3 Concepto C



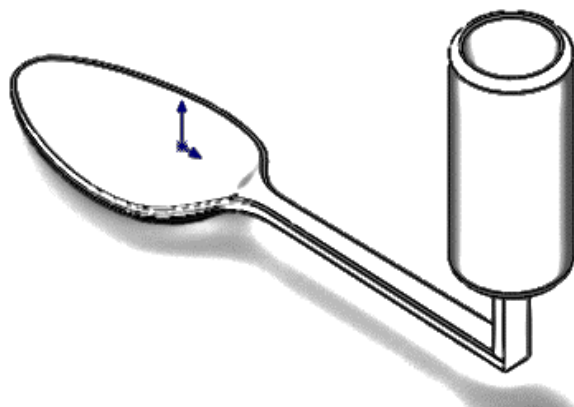
Utensilio con anillos.

Cuchara que acopla unos anillos por su parte posterior con la finalidad de que los dedos puedan ingresar en sus perforaciones, los mismos que está diseñados conforme a una medida estándar de grosor de los dedos en pacientes con artritis en manos.

Brinda una ayuda en la sujeción de la cuchara para manos que no pueden realizar la acción de cierre imposibilitando el agarre de una cuchara convencional.

Figura 20. Bosquejo del concepto C

3.3.4 Concepto D



Utensilio con mango circular.

Es un modelo de cuchara con mango circular que permite un agarre vertical, logrando de esta manera que la mano de la persona se mantenga siempre en forma vertical y con los dedos hacia adentro.

La dirección del mango vertical es perpendicular a la dirección del vástago de la cuchara, con la finalidad de evitar giros bruscos de la mano.

Figura 21. Bosquejo del concepto D




3.4 Selección del concepto por diseñadores

Para la selección del concepto, de los presentados en el apartado anterior, se procede a la evaluación de sus características y prestaciones que cumplan el objetivo seleccionado en la **Tabla 12**, que se refiere a no fomentar deformaciones en la mano.

Según (Montull Morer, Salvat Salvat, Inglés Novell, & Miralles Rull, 2004), año), clínicamente, existen 4 tipos de deformaciones de la mano provocadas por la artritis, y se describen en la **Tabla 13**.

Tabla 13

Principales deformaciones de la mano

<p>Sinovitis de la articulación MTCF pulgar</p> <p>Fragilización del tendón del extensor corto (distensión y más tarde ruptura), progresivamente el extensor largo se luxa hacia dentro, provocando una hiperextensión de la IF. Es bien tolerada, excepto en el caso de inestabilidad IF,</p>	<p>Pulgar en Z: MTCF en flexión e IF en hiperextensión.</p> <p>Pulgar adductus</p> 
<p>Sinovitis de la articulación MTCF dedos del segundo al quinto</p> <p>Dorsalización y acortamiento de la musculatura intrínseca, lo que aumenta su efecto de extensión sobre la IFP. Ésta sufre una subluxación anterior lo que modifica la efectividad del tendón extensor de la IFD (predominio del flexor).</p> <p>En el plano funcional, es la deformidad más molesta, pues impide las prensiones digitales pluridigitales y cilíndricas.</p>	<p>Dedo en cuello de cisne: IFP en hiperextensión y IFD en flexión.</p>  <p>Mano en ráfaga: desviación cubital de las MTCF 2.^a a 5.^a flexionadas en dirección palmar.</p> 
<p>Sinovitis IFP</p>	<p>En ojal (Butonniere o Boston-hole): Flexión de la IFP más hiperextensión de la IFD.</p>

CONTINÚA



Rotura de la parte central del tendón extensor de la base de la IFP, como consecuencia las bandeletas laterales pasan a ser flexoras, saliendo de entre ellas la cabeza de la falange. Al no tener un extensor útil, la segunda falange se coloca en flexión y todo el efecto extensor recae sobre la tercera (cuyo flexor ha entrado en insuficiencia mecánica) provocándole una hiperextensión.

Las prensiones digitales y pluridigitales son aún posibles, pero se ven dificultadas.



Sinovitis IFD

Rotura de la porción final del tendón extensor a nivel de la IFD.

Poco frecuente y, en principio, poco molesta

Dedo en martillo: flexión de la IFD.



Fuente: (Montull Morer, Salvat Salvat, Inglés Novell, & Miralles Rull, 2004)

La manifestación clínica más habitual (en la mano AR) es el dolor en las articulaciones afectadas que empeora con el movimiento, aunque no siempre se relaciona con el grado de inflamación. En un intento de aliviar su dolor, el paciente disminuye la movilidad y dispone la articulación de forma que decrezca la sollicitación mecánica de la cápsula (evitando su distensión). (Montull Morer, Salvat Salvat, Inglés Novell, & Miralles Rull, 2004).

Considerando los argumentos anteriores, a continuación se selecciona el concepto que presente mayor prestación, utilizando una ponderación en escala de 1 a 5, siendo:

1 = No cumple 3 = Medianamente cumple 5 = Si cumple

Dichos resultados se presenta en la **Tabla 14**.

Tabla 14

Comparación de objetivos con conceptos

OBJETIVOS CONCEPTOS	No fomenta deformaciones	Portable	Agarre firme	Ergonómico	Desplazamiento	TOTAL	PONDERACIÓN
Concepto A	5	5	2	5	5	22	88%
Concepto B	3	5	1	5	5	19	76%
Concepto C	5	5	5	5	5	25	100%
Concepto D	3	5	1	5	5	19	76%

De acuerdo a los resultados obtenidos en la *Tabla 14*, el concepto C tiene una ponderación del 100%, por lo que, considerando las ventajas descritas anteriormente queda seleccionado bajo nuestro criterio de diseñadores.

3.5 Validación de material para prototipos

Para la validación del material, se utilizarán dos métodos: por etapa límite y el método gráfico (Diagramas de Ashby); los mismos que se encuentra dentro del software de selección de materiales, que es una base de datos digital que contiene información sobre elementos, materiales y procesos ingenieriles.

A continuación se describen la estrategia conceptual para selección de materiales por *etapa límite* (Granta Design, 2013):

Función: Cubertería destinada a facilitar la alimentación personas que sufre de artritis en las manos.

Objetivos:

- No fomenta deformaciones
- Portable
- Agarre firme
- Ergonómico
- Desplazamiento

Restricciones: Los valores que a continuación se describen están tomados como promedio de algunos de los polímeros más utilizados en la fabricación de cubertería plástica, como son: polietileno, policarbonato, nylon, silicona y polipropileno (FOOD SAFETY INNOVATION, 2012).

- Densidad	[gr/cm ³]	< 1,50
- Módulo de Young (E)	[GPa]	< 6
- Límite elástico (Sy)	[MPa]	< 60
- Esfuerzo de tracción	[MPa]	< 70

- Conductividad térmica [W/m°C] < 0,15
- Procesos Moldeo por inyección e Impresión 3D
- Biodegradable Si
- Reutilizable Si

Insertados los valores de restricción del material antes mencionado, se obtiene:

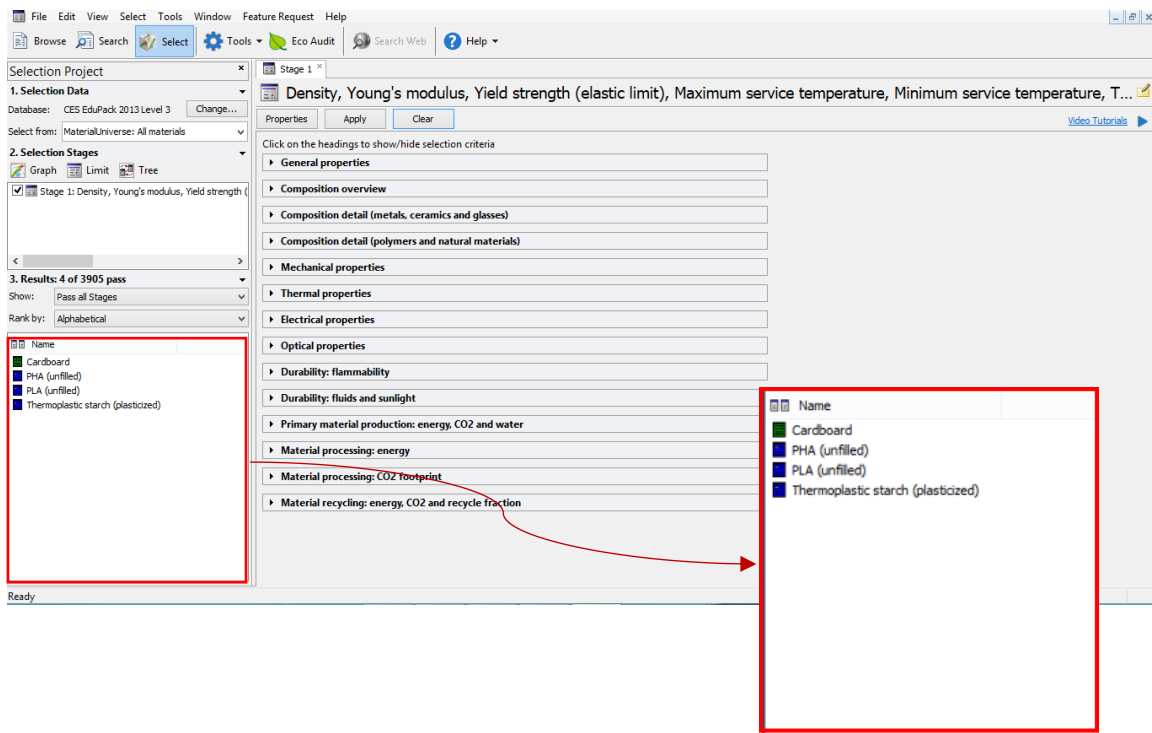


Figura 22. Filtrado de materiales con restricciones

En la **Figura 22**, se determina que los materiales que cumplen las condiciones requeridas para la elaboración de los prototipos tanto por impresión 3D como por moldeo por inyección son: cartón, PLA, PHA, TPS, de los cuales seleccionamos el PLA (ácido poliláctico), el mismo que se trató vastamente en el Capítulo II.

Para corroborar la exactitud en la selección del material, se procederá a aplicar la *selección por índices de material* (Granta Design, 2013):

Función: La cuchara será representado como elemento viga sometido a flexión.

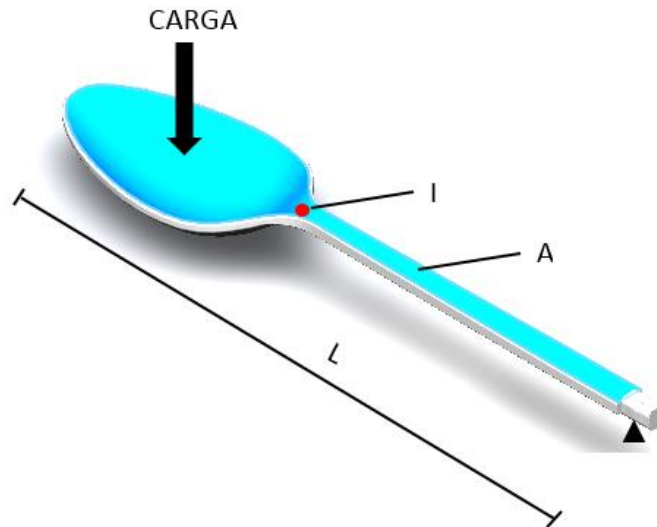


Figura 23. Cuchara como elemento viga.

- Restricciones:*
- Longitud fija
 - Deber tener rigidez a flexión $> S$
 - Ecuación para las restricciones:

$$S = \frac{CEI}{L^3}; \quad \text{Pero,} \quad I = \frac{A^2}{12}$$

$$S = \frac{CEA^2}{12L^3} \quad \text{Ecuación 4}$$

A = área

L = longitud

E = módulo de Young

I = momento de inercia para una viga

C = constante

Objetivo: Minimizar la masa, m .

$$m = AL\rho \quad \text{Ecuación 5}$$

m = masa

ρ = densidad

L = longitud

A = área

Reemplazando A de la Ecuación 5 y reemplazando en la Ecuación 4, obtenemos:

$$S = \frac{CEm^2}{12L^5\rho^2} \quad \text{Ecuación 6}$$

Despejando la masa m de la Ecuación 6, obtenemos la función métrica:

$$m = \left(\frac{12L^5S}{C} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho}{E^{\frac{1}{2}}} \right) \quad \text{Ecuación 7}$$

Por lo tanto, obtenemos el índice de material.

$$M = \frac{E^{\frac{1}{2}}}{\rho} \quad \text{Ecuación 8}$$

Para filtrar los resultados en el software de selección de materiales, se requiere el valor de la pendiente de la recta, la misma que se calcula así:

$$E = M^2\rho^2 \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\log E = 2 \log \rho + 2 \log M \quad \text{Ecuación 10}$$



Pendiente

Una vez determinado el índice de material, se procede a realizar los diagramas de Ashby, graficando en el software el módulo de Young (E) vs la densidad (ρ).

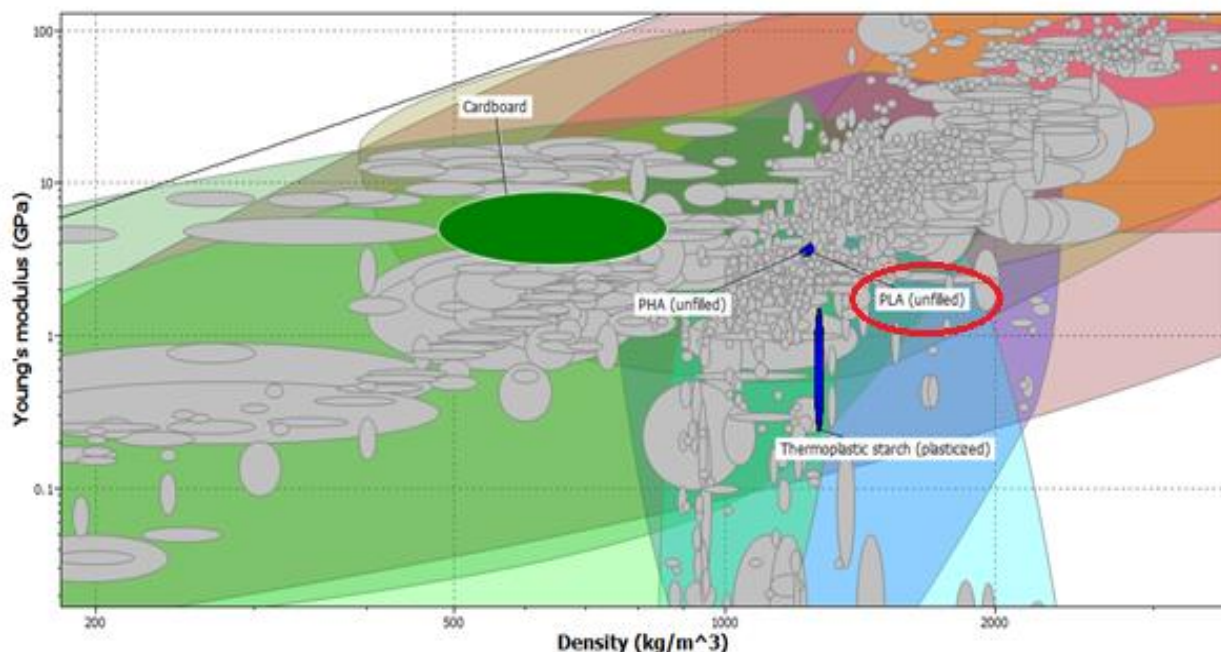


Figura 24. Filtrado de materiales por índice de material

De la **Figura 24**, se puede determinar que los materiales que cumplen las condiciones requeridas para la elaboración de los prototipos tanto por impresión 3D como por moldeo por inyección son los mismos que los obtenidos por el método de etapa límite de los cuales seleccionamos el PLA (ácido poliláctico).

Para verificar la selección anterior, se procede a calcular en la **Tabla 15** los índices de material para los materiales filtrados.

Tabla 15

Cálculos de índices para materiales filtrados

MATERIAL	E [GPa]	ρ [kg/m³]	$M = \frac{E^{1/2}}{\rho}$	USD/kg
Cardboard	8,9	860	109,70	12,4
PHA	4	1250	50,60	7
PLA	3,83	1250	49,50	2,65
Thermoplastic starch (plasticized)	1,5	1280	30,26	6,04

Considerando que se requiere un material plástico que se va a utilizar tanto en impresión 3D como moldeo por inyección, el PLA es el que mejor prestaciones tiene, en cuanto a mediana rigidez, menor masa, y menor costo.

3.6 Determinación de mediciones para diseño de prototipos

Para la determinar las mediciones antropométricas de las manos de la persona con artritis, se sacaron promedios de las dimensiones de 36 personas para establecer parámetros iniciales. (Cubillos & Medina, 2010).

Según (Cubillos & Medina, 2010), las medidas antropométricas de la mano se detallan en la **Tabla 16**.

Tabla 16

Caracterización antropométrica de la mano

DIMENSIONES ANTROPOLÓGICAS DE LA MANO	MEDIA DE LAS DIMENSIONES ANTROPOMÉTRICAS DE LA MANO (cm)
LM	10,43
LMM	18,83
AM	8,53
AMM	10,55
EM	2,80
DDP*	1,82
DDI*	1,80
DDME*	1,75
DDA*	1,71
DDM*	1,49

LM: Largo de la mano, LMM: Largo máximo de la mano, AM: Ancho de la mano, AMM: Ancho máximo de la mano, EM: Espesor de la mano, DDP: Diámetro dedo pulgar, DDI: Diámetro dedo índice, DDME: Diámetro dedo medio, DDA: Diámetro dedo anular, DDM: Diámetro dedo meñique. *Mediciones en la falange proximal.

Fuente: (Cubillos & Medina, 2010)

En la **Figura 25** se muestra la forma de tomar las mediciones descritas en la **Tabla 16**.

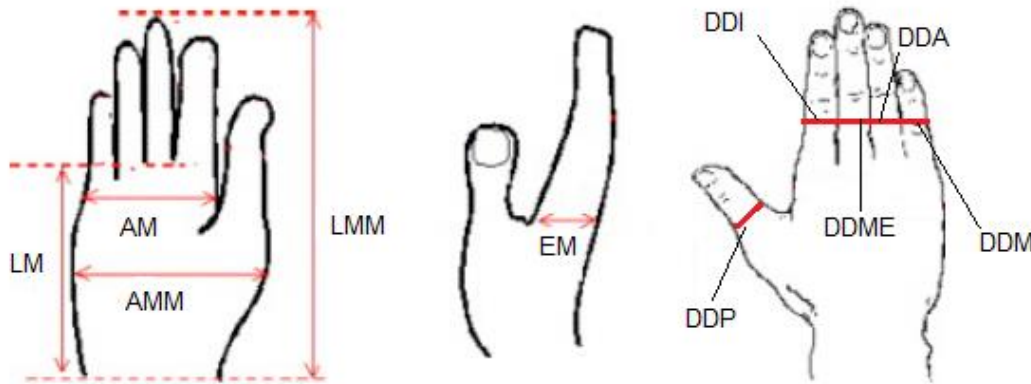


Figura 25. Ubicación de las medidas antropométricas en la mano
Fuente: (Cubillos & Medina, 2010)

3.6.1 Diseño CAD de los prototipos

Según las dimensiones establecidas en la **Tabla 16**, se procede a diseñar mediante software SolidWorks V.16 los prototipos establecidos para llevarlos a impresión 3D y mediante pruebas seleccionar el concepto más funcional.

Cabe recalcar que para el diseño de los conceptos se tomaron en consideración las medidas antropométricas de la mano, en especial los valores referentes a los diámetros de los dedos, ancho y largo de la mano.

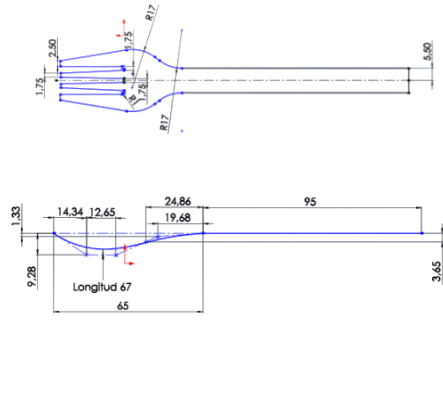
La impresión en plástico de los modelos mostrados en la **Tabla 17** se realizan aplicando parámetros específicos descritos en el **Anexo 2**.

Tabla 17

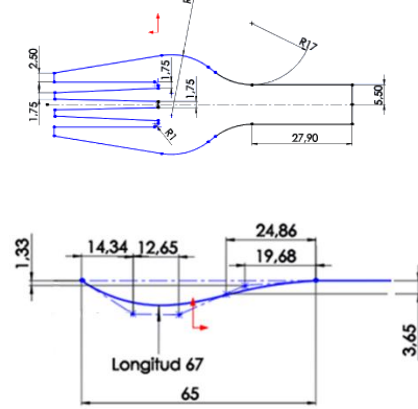
Diseño CAD de los conceptos seleccionados

Elaboración de croquis, según dimensiones establecidas en la **Tabla 16**, y considerando medidas de cubertería estándar.

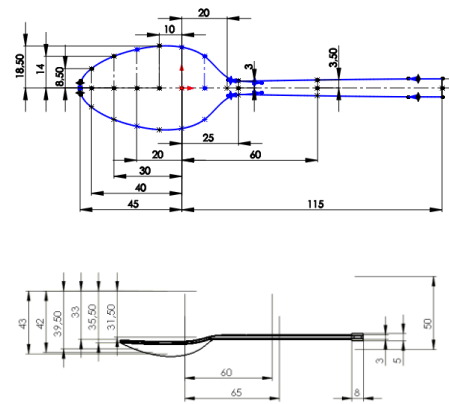
Concepto A



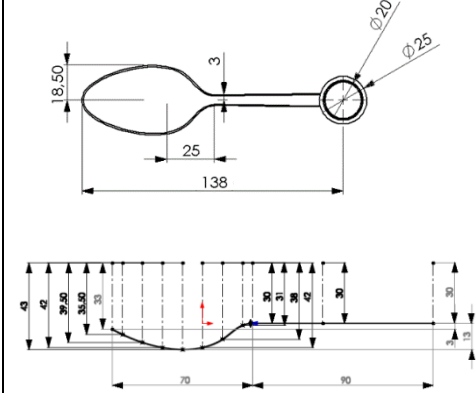
Concepto B



Concepto C



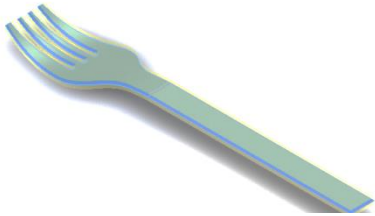
Concepto D



Extrusión del croquis con el espesor destinado para uno de los conceptos

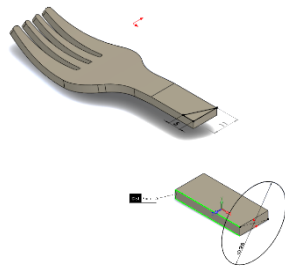
Concepto A

Espesor = 3 mm



Concepto B

Espesor = 3 mm



Concepto C

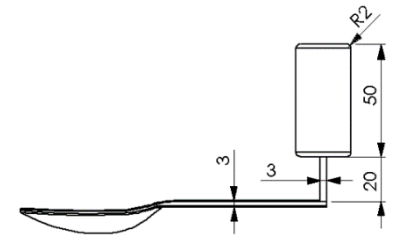
Espesor = 1.5 mm



Concepto D

Espesor Cavity = 1.75 mm

Espesor Mango = 2 mm

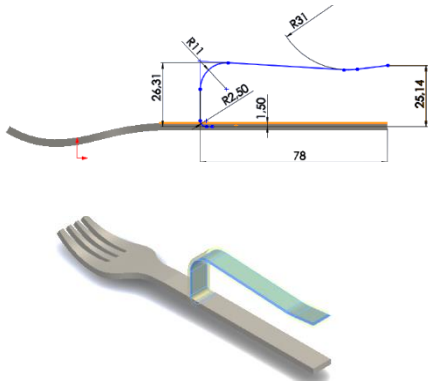


CONTINÚA →

Diseño del mango de acuerdo a las necesidades y objetivos de las personas con artritis, analizados en anteriormente y según dimensiones establecidas en la **Tabla 16**

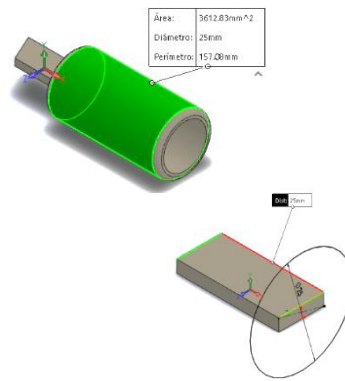
Concepto A

Espesor acople = 3 mm



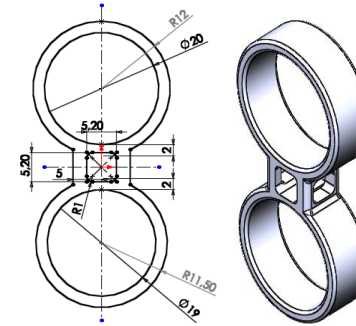
Concepto B

Espesor = 3 mm
Ángulo = 131°



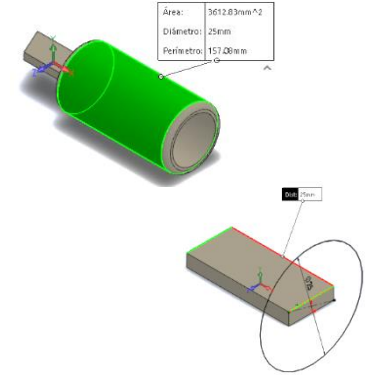
Concepto C

Ancho = 8 mm



Concepto D

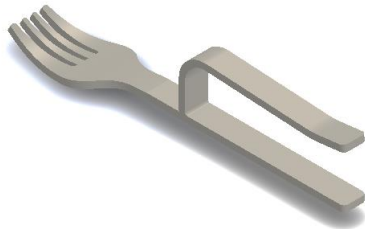
Espesor = 3 mm
Ángulo = 131°



Diseños finales CAD de los conceptos.

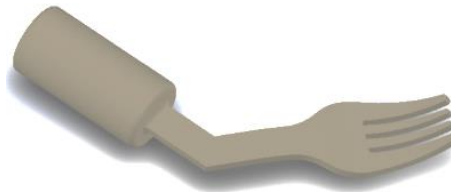
Concepto A

Material: PLA



Concepto B

Material: PLA



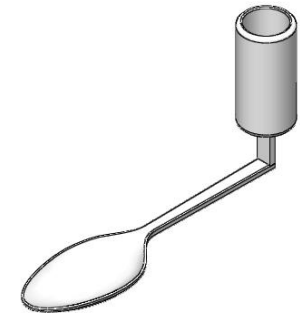
Concepto C

Material: PLA



Concepto D

Material: PLA



CAPÍTULO IV

SELECCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL CONCEPTO

4.1 Selección del concepto

Para la selección del concepto más funcional y que cumpla los requerimientos, se realizan pruebas experimentales de campo con una persona que presentan problemas de artritis en las manos, bajo carta de consentimiento en el *Anexo 3*, para que utilice los cuatro prototipos y escoja el que mejor desempeño tenga.

La persona con quien se realizó las pruebas se describe en la Foto 1.

Foto 1.

Paciente con artritis en las manos



Nombre: Hilda Magdalena Salazar Sánchez

Edad: 69 años

Localidad: Ambato - Tungurahua

Peso: 120 lb

Estatura: 150 cm

Detalles Enfermedad: Artritis en las manos desde el año 2009. Esta persona necesitaba de ayuda para llevar sus alimentos a la boca ya que no podía sujetar la cubertería común.

La deformación se puede apreciar en la Foto 2.

Foto 2.

Artritis en las manos



Toma frontal de las manos izquierda y derecha con mal formaciones debido a la artritis localizada en éstas extremidades.

Foto 3.

Prueba del concepto A



Prueba del prototipo del tenedor con el acople tipo mordaza, en la mano derecha del paciente. La persona nos comenta que tiene un poco de dificultad al sujetar el trinche debido a que no puede cerrar bien su mano y la abertura en su parte posterior hace que su mano resbale.

Foto 4.

Prueba del concepto B



Prueba del prototipo del tenedor con mango cilíndrico. El paciente comenta que siente bien el agarre al mango cilíndrico, y aún más cómodo porque en ocasiones sus dedos se hinchan.

Foto 5.

Prueba del concepto C



Prueba del prototipo de la cuchara con acople de anillos en la mano derecha, donde se observa una buena sujeción del implemento.

El paciente comenta que siente cómoda con éste ejemplar ya que no tiene que hacer esfuerzo para sujetar la cuchara debido a que los anillos en sus dedos hacen éste trabajo por ella, facilitando la tarea de llevar los alimentos desde el plato hacia su boca.

Foto 6.

Prueba del concepto D



Prueba de la cuchara con acople cilíndrico donde el paciente manifiesta que en varias ocasiones sus dedos se hinchan lo que dificulta el agarre del mango cilíndrico.

En la **Tabla 18**, se presenta la calificación asignada por la paciente respecto al concepto más funcional, considerando la ponderación en una escala de 1 a 5, siendo:

1 = No cumple

3 = Medianamente cumple

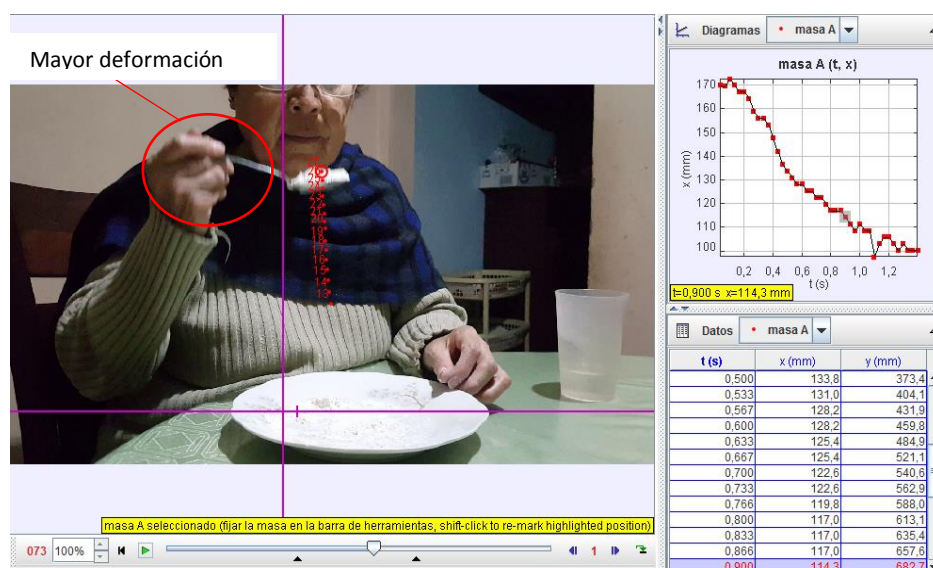
5 = Si cumple

Tabla 18*Comparación de objetivos con conceptos*

OBJETIVOS CONCEPTOS	No fomenta deformaciones	Portable	Agarre firme	Ergonómico	Desplazamiento	TOTAL	PONDERACIÓN
Concepto A	3	5	1	3	5	17	68%
Concepto B	1	5	1	5	5	17	68%
Concepto C	5	5	3	3	5	21	84%
Concepto D	1	5	1	3	3	13	52%

De acuerdo a los resultados obtenidos en la **Tabla 18**, el concepto C tiene una ponderación del 84%, por lo que, considerando las ventajas descritas anteriormente queda seleccionado para la etapa de optimización. Para corroborar la selección del concepto C, se realiza un estudio biomecánico de desplazamiento utilizando software de biomecánica; en el mismo se compara la trayectoria y tiempo que tarda el llevarse la comida a la boca utilizando una cuchara tradicional con respecto al concepto prototipado.

En la **Figura 26**, se estudia la trayectoria bidimensional y tiempo con respecto a la mano de la paciente utilizando una cuchara con mango tradicional, en donde se aprecia las dificultades en cuanto al agarre y desplazamiento, y sobre todo la deformación a la que están sometidos los dedos.

**Figura 26.** Estudio biomecánico de la mano con cuchara de mango tradicional

En la **Figura 27**, se estudia la trayectoria bidimensional y tiempo con respecto a la mano de la paciente utilizando una cuchara con los acoples, en donde se aprecia que la deformación de los dedos es menor debido a que el agarre mejora porque las anillos van sujetos, esto permite que el desplazamiento tenga mayor libertad, lo que se evidencia en las curvas y datos numéricos extraídos del software.

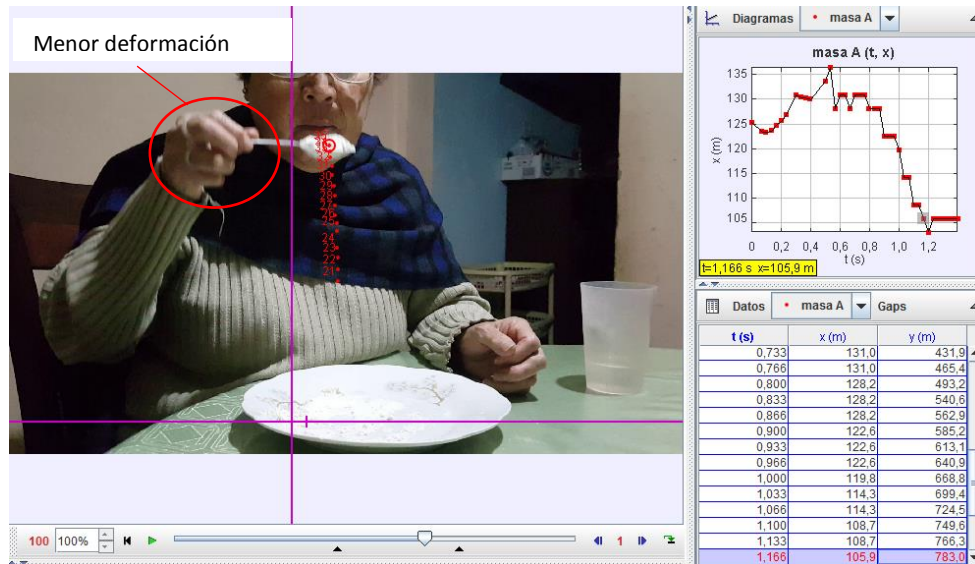


Figura 27. Estudio biomecánico de la mano con cuchara con acoples

Para la optimización se consideran los dos objetivos que tienen alta ponderación: agarre firme y ergonomía.

4.2 Optimización topológica del concepto seleccionado

Una vez seleccionado el concepto C, se procede a su optimización topológica mediante el software CAE y SolidWorks. Para esto, se parte desde el modelo geométrico de la cuchara que se detalla en la **Figura 28**, y con las siguientes especificaciones:

<i>Material:</i>	PLA
<i>Masa:</i>	9,66 g
<i>Espesor:</i>	2 mm
<i>Volumen:</i>	7786,33 m ³
<i>Área:</i>	8958,84 m ²

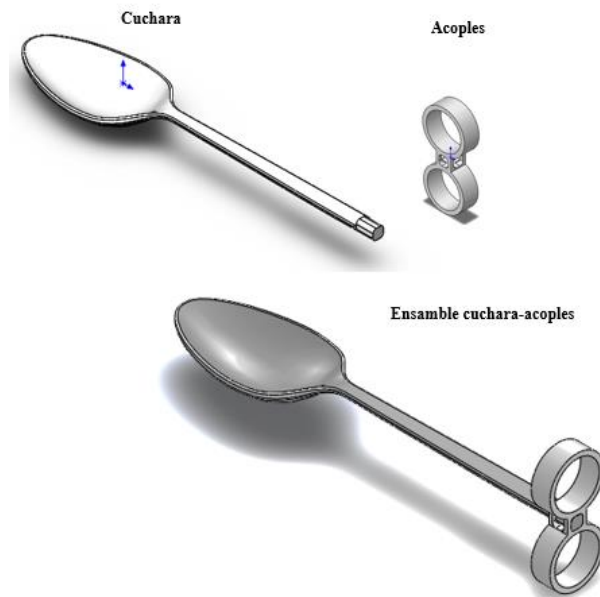


Figura 28. Concepto C seleccionado

4.2.1 Análisis estático del concepto

En el programa SolidWorks con el módulo de “Simulación Estática” se realiza el estudio respectivo para observar los esfuerzos y deformaciones a los que se somete la pieza. En éste análisis se toman en consideración 2 puntos importantes:

- Sujeción de la pieza: en los acoples de anillos.
- Carga real aproximada: 0,38 N según datos experimentales recolectados y observados en la **Figura 29.**



Figura 29. Datos recolectados de la carga real en una cuchara

Según la **Figura 29**, se puede calcular el peso máximo aproximado de contenido y experimental que puede cargar una cuchara:

Masa contenida = Peso de la cuchara llena – Peso de la cuchara

Masa contenida = 83 gr – 44 gr = 39 gr = 0,039 kg

Peso contenido = 0,039 kg $\left(9,8 \frac{m}{s^2}\right) = \mathbf{0,38\ N}$

El valor experimental de 0,38 N se utiliza como dato de carga inicial en el software, el mismo que es aplicado a lo largo de la cara superior de la cuchara con dirección perpendicular hacia abajo, como se muestra en la **Figura 30**.

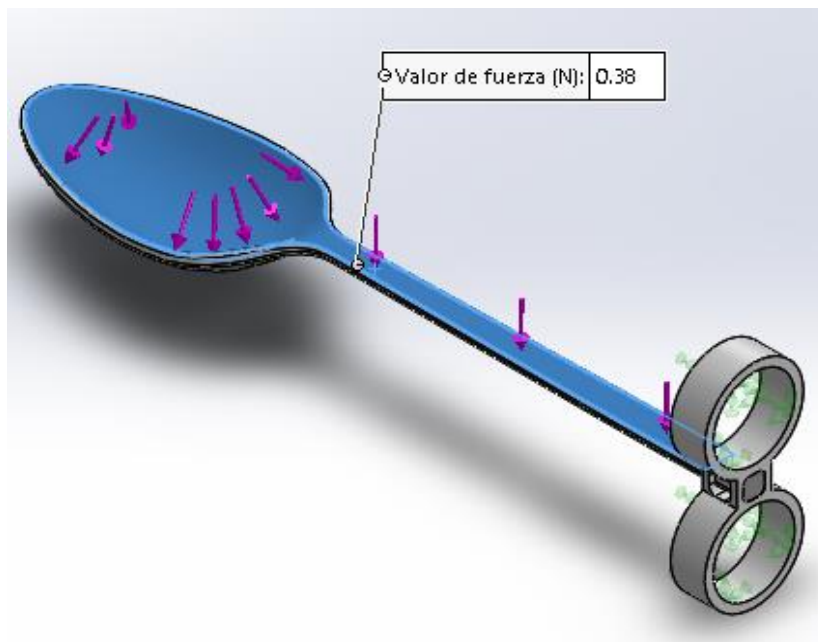


Figura 30. Aplicación de carga y sujeciones fijas

En la **Figura 31**, se realiza el análisis estático del concepto C, aplicando una carga de 0,38N que simulan la acumulación de alimentos, obteniéndose un valor máximo de esfuerzo que soporta la cuchara de 6,950 MPa, el mismo que no influye para que se produzca fractura en el prototipo, según la Teoría de Von Mises.

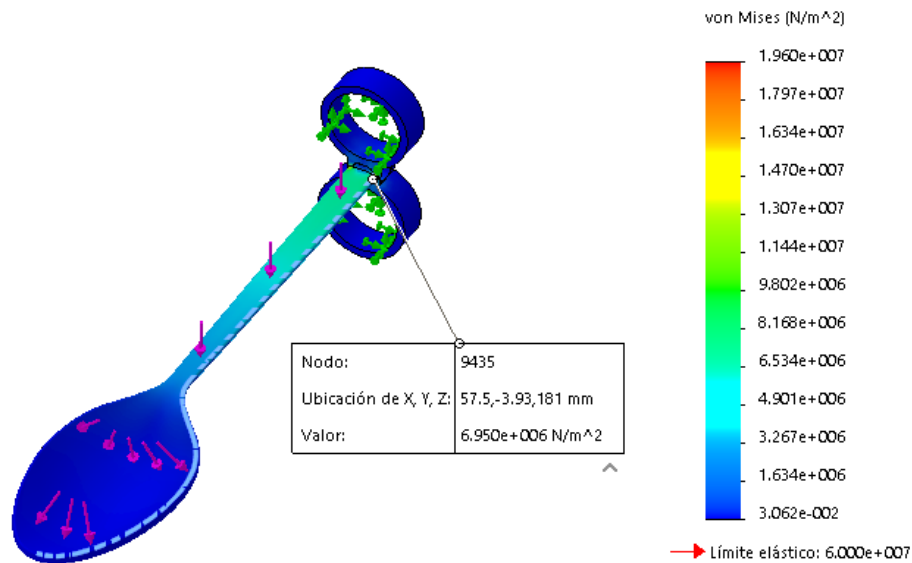


Figura 31. Resultados del análisis estático – Tensión Máxima

En la **Figura 32**, se observa mediante acercamiento, que el punto de mayor esfuerzo está ubicado en la unión de la cuchara con el acople de anillo.

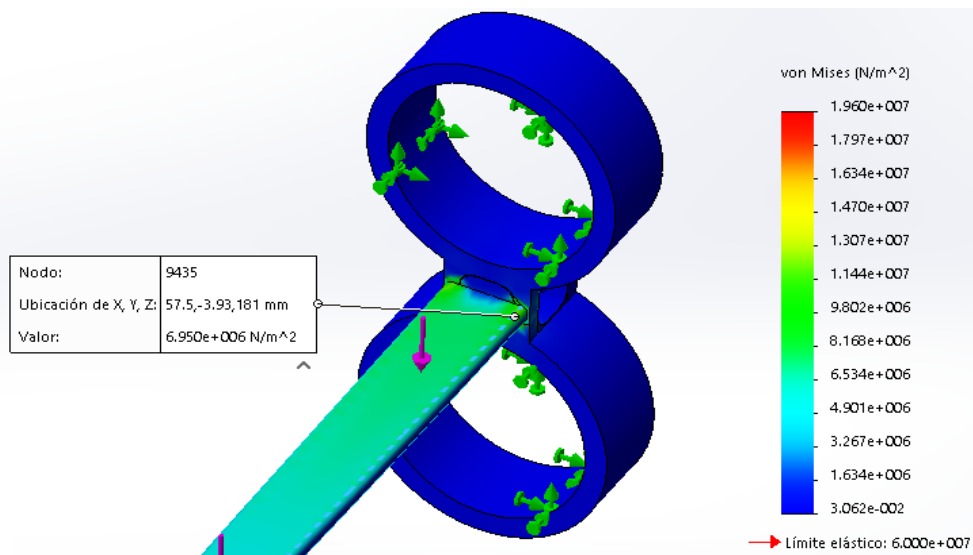


Figura 32. Punto de mayor tensión

En la **Figura 33**, se realiza el análisis estático en la cuchara a moldearse, aplicando una carga de 0,38N (39 gr.) que simulan la acumulación de alimentos, obteniéndose un desplazamiento máximo de 1,080 mm.

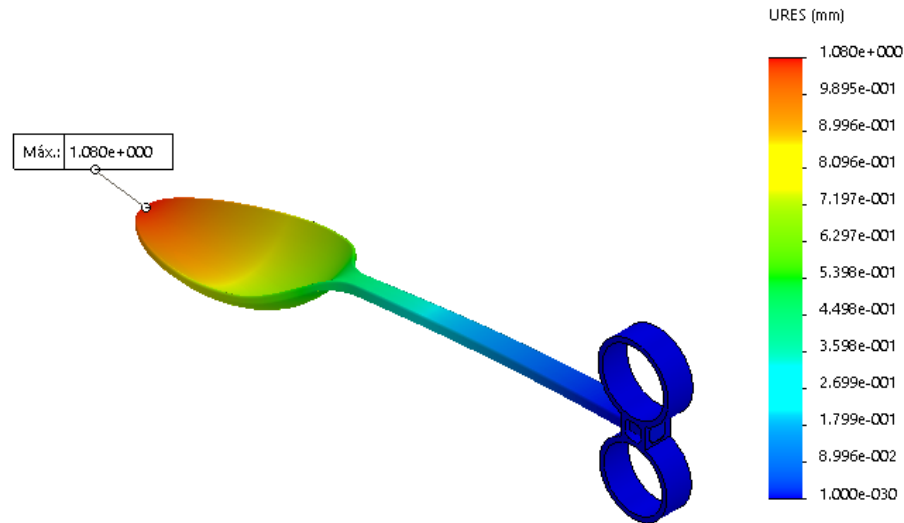


Figura 33. Resultados del análisis estático – Desplazamiento

La deformación que se produce por efecto de la carga es relativamente baja, con un valor de 0,002841%, por lo que no presenta problemas producto de la flexión, valor que se puede apreciar en la **Figura 34**.

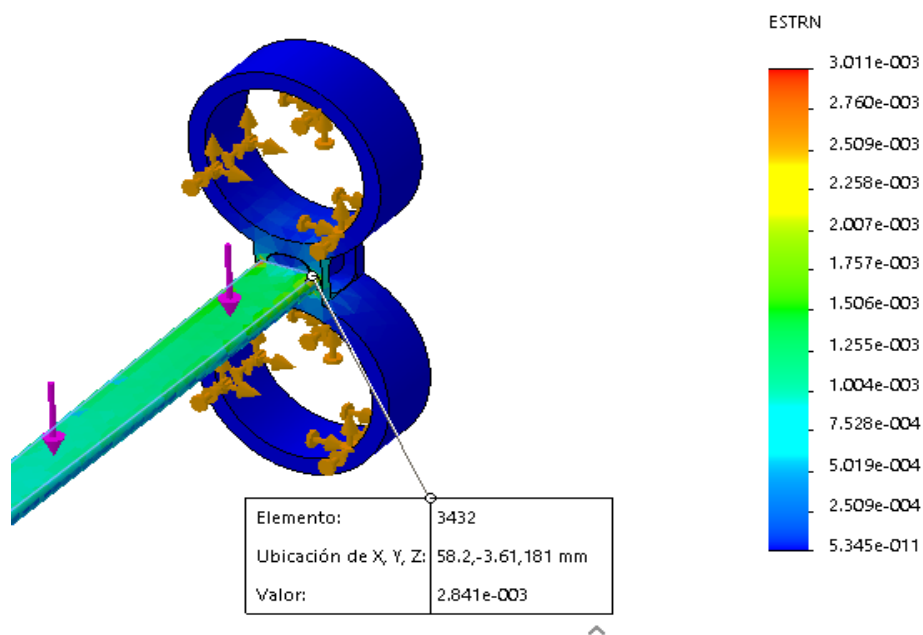


Figura 34. Resultados del análisis estático – Deformación unitaria

De acuerdo a cálculos realizados por el software, el factor de seguridad, **Figura 35**, del conjunto cuchara-acoples es de 2.8, aplicando la Teoría de Von Mises, lo que significa que la cuchara está sobredimensionada.

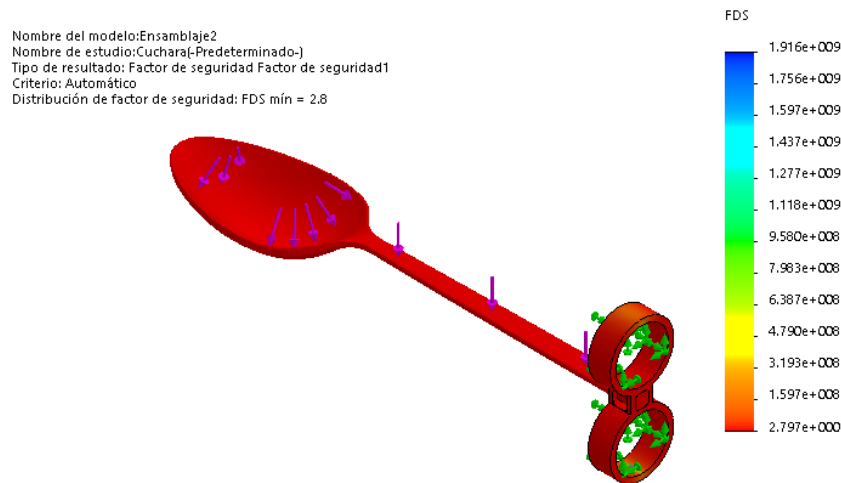


Figura 35. Factor de seguridad – Von Mises

4.2.2 Optimización topológica de masa

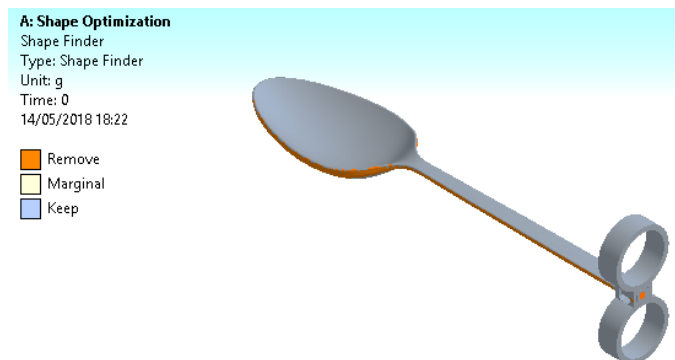
Mediante software CAE se procede a la optimización de masa, insertando los siguientes parámetros de cálculo:

Material: PLA

Tamaño de elemento finito: 1 mm

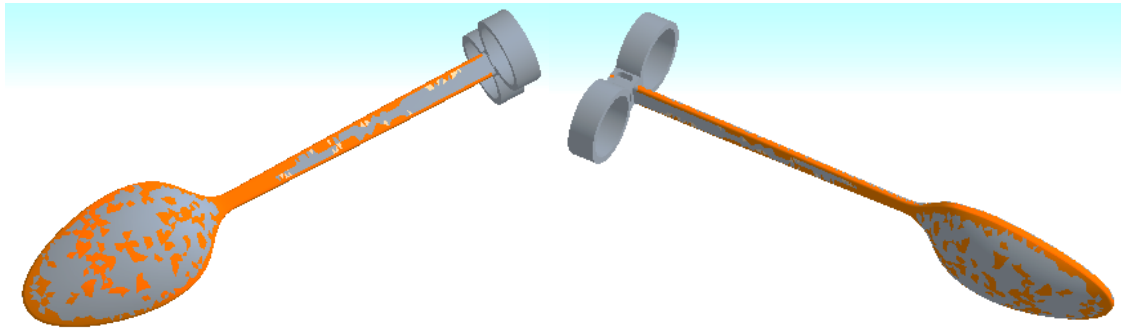
Porcentaje de optimización: 90%

En la **Figura 36**, se observa gráficamente los valores optimizados mediante software.



CONTINÚA





Remove = remover; **Marginal** = margen; **Keep** = mantener

Figura 36. Optimización topológica de masa

En la **Figura 37**, se observan los resultados numéricos calculados por el software:

Masa original = 9,6469 g
 Masa optimizada = 8,5505 g
 Masa marginal = 1,0964 g

Details of "Shape Finder" ⌵	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
[-] Definition	
Target Reduction	90, %
Suppressed	No
[-] Results	
<input type="checkbox"/> Original Mass	9,6469 g
<input type="checkbox"/> Marginal Mass	9,8059e-003 g
<input type="checkbox"/> Optimized Mass	8,5505 g

Figura 37. Resultados de optimización

En consecuencia, se tiene la posibilidad de reducir 1,0964 g de PLA, distribuido a lo largo de la cuchara, por lo que, el espesor se reducirá a 1,75 mm.

4.2.3 Optimización de forma

La primera optimización de forma se aplica en los acoples para los dedos; en el modelo original son argollas cerradas, pero la modificación se realiza cortes de 2 mm de punta a punta para facilitar su expansión dependiente del diámetro de los dedos del usuario, como se muestra en la *Figura 38*.

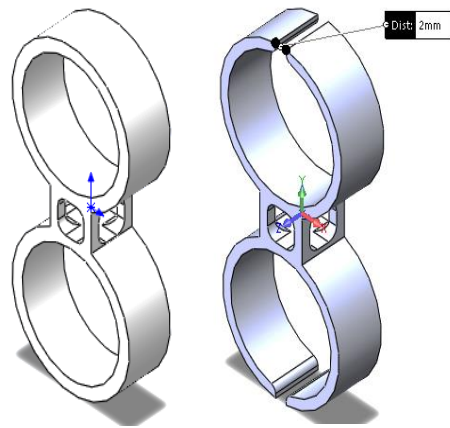


Figura 38. Cortes en las argollas de anillo

La segunda optimización de forma, se refiere al diseño de seguros sobre la cuchara, *Figura 39*, que permiten mejorar la sujeción con los acoples, con una altura de 0,10 mm.

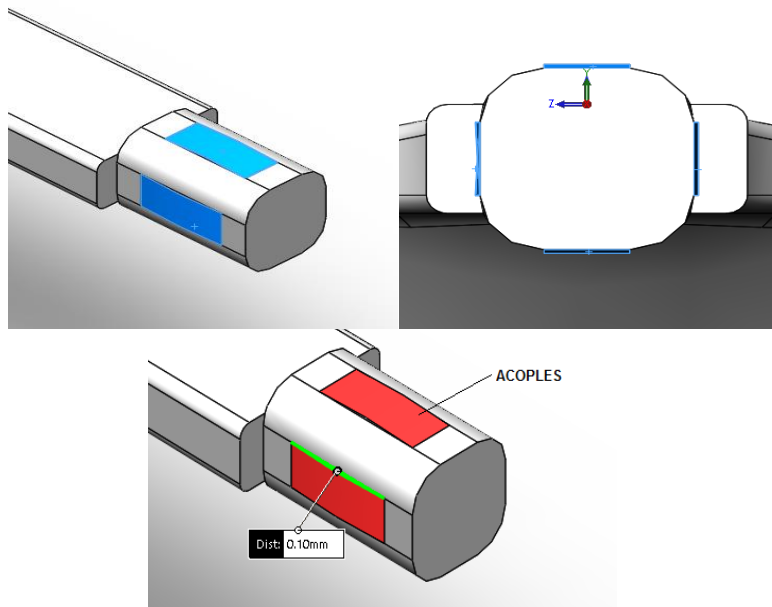


Figura 39. Diseño de seguros para acoples

La tercera optimización de forma, **Figura 40**, consiste en eliminar filos cortantes mediante redondeos de 1mm de radio, los mismos que evitan que ocurran accidentes por cortes.

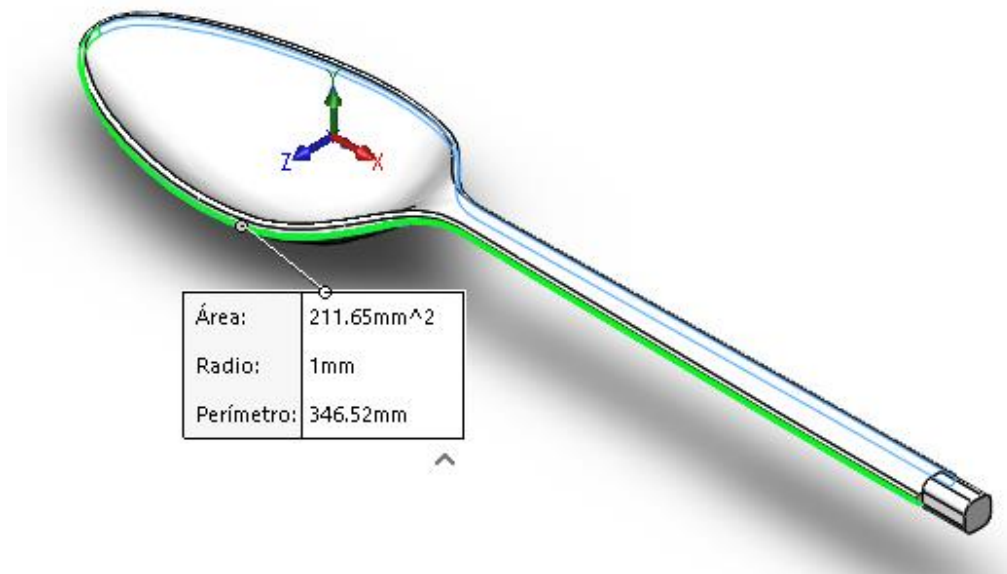


Figura 40. Redondeo de filos cortantes

4.3 Análisis estático del modelo optimizado de la cuchara

En el programa SolidWorks con el módulo de “Simulación Estática” se realiza el estudio respectivo para observar los esfuerzos y deformaciones a las que se someterá la pieza. En éste análisis se tomará en consideración 2 puntos importantes:

1. Sujeción de la pieza: en el eje que soporta el acople de anillos.
2. Carga real aproximada: 0,38 N según datos experimentales recolectados y observados en la **Figura 29**.

En la **Figura 41**, se realiza el análisis estático en la cuchara a moldearse, aplicando una carga de 0,38 N (38 gr.) que simulan la acumulación de alimentos, obteniéndose un desplazamiento máximo de 4,85 mm.

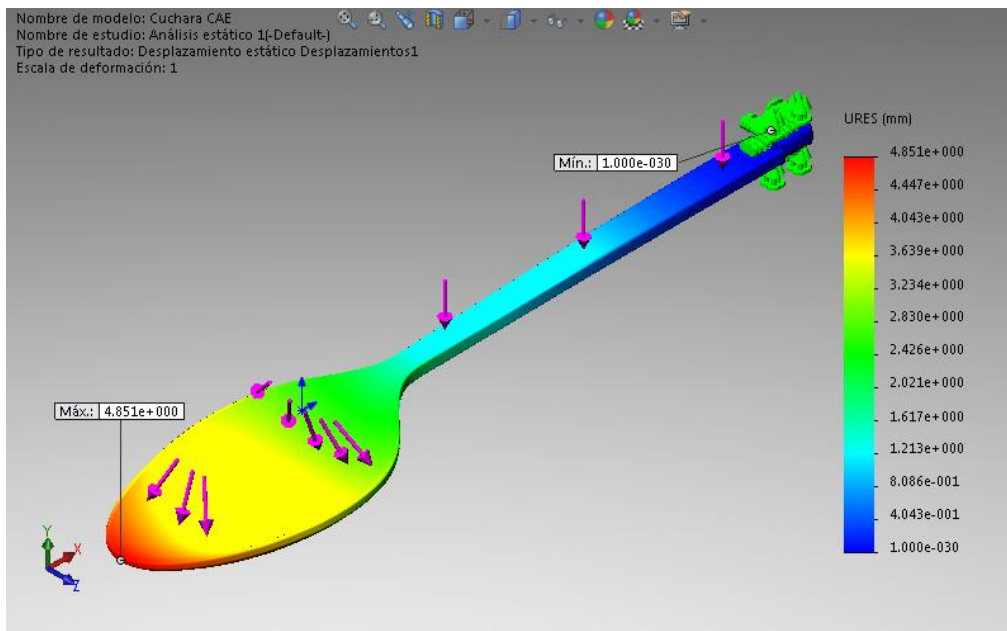


Figura 41. Resultados del análisis estático de la cuchara – Desplazamiento

En la **Figura 42**, observamos la simulación de esfuerzos estáticos y aplicando la teoría de Von Mises, resulta un valor de tensión máxima es 4.9 MPa, que es menor al límite de fluencia del PLA utilizado (62MPa).

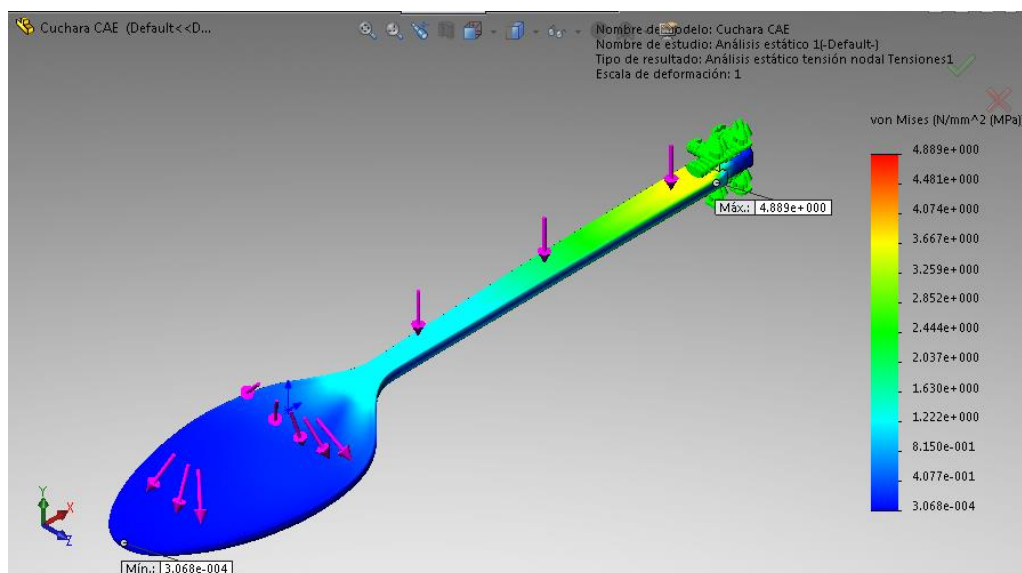


Figura 42. Resultados del análisis estático – Tensión Máxima

Zona de tensión máxima en la cuchara (ubicada en el chaflán entre: mango-eje del acople), descrito en la *Figura 43*.

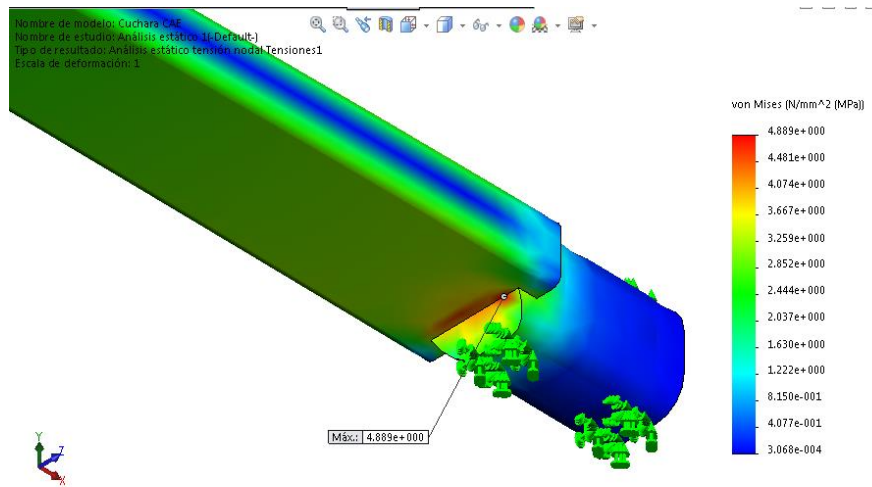


Figura 43. Zona de tensión máxima en la cuchara

4.4 Análisis por fatiga del modelo optimizado de la cuchara

En el programa SolidWorks con el módulo de “Fatiga” se realiza el estudio respectivo para observar porcentaje de daño y los ciclos de vida de la cuchara con los acoples. En este análisis se considerará lo siguiente:

Número de ciclos: 1000

Carga: 0,38 N

En las *Figura 44* y *Figura 45*, se observan que los únicos puntos de posible rotura se encuentran en la unión entre la cuchara y los acoples de anillo, con un valor aproximadamente del 34% de daño para 1000 ciclos de utilización.

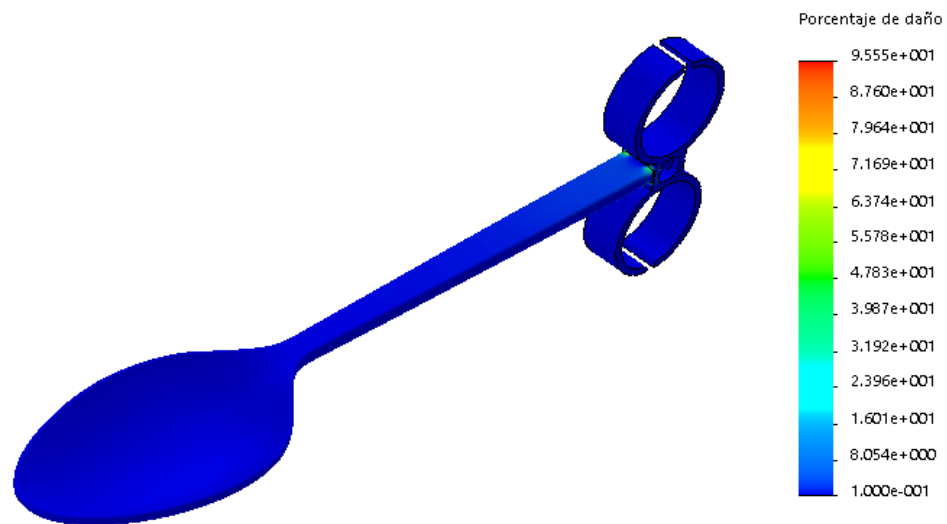


Figura 44. Porcentaje de daño por fatiga – Vista global

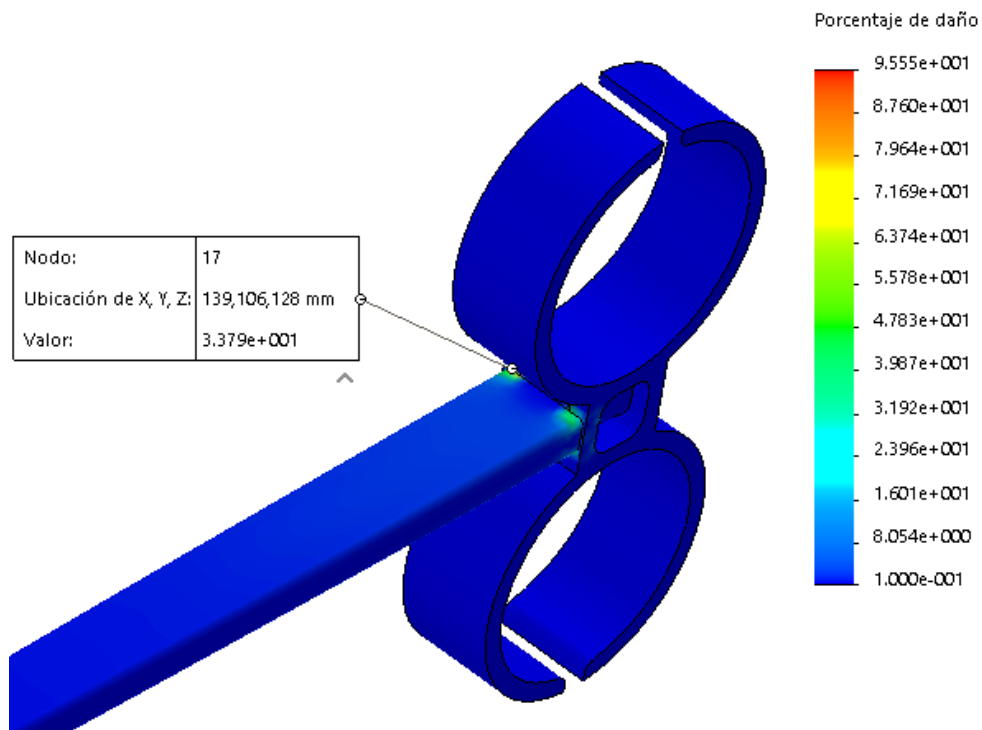


Figura 45. Porcentaje de daño por fatiga – Vista aproximación

En la **Figura 46**, se observa el número de ciclos que soporta cada tramo de la cuchara, según el software, desde el centro hacia la unión con los acoples de anillos promedia una vida de aproximadamente de 45000 ciclos.

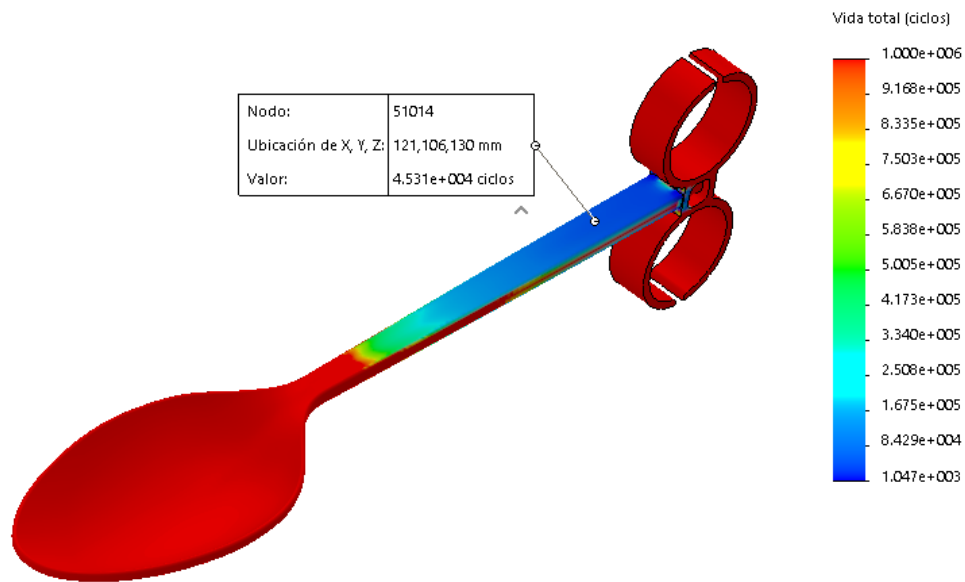


Figura 46. Vida total en ciclos

4.5 Análisis estático del modelo optimizado de los acoples de anillo

Para este análisis se colocará una carga de 50N (5kg) en el interior de los anillos simulando la presión que ejercerían dedos más anchos que el diámetro del acople, obteniéndose en la **Figura 47**, un desplazamiento máximo de 4,09 mm.

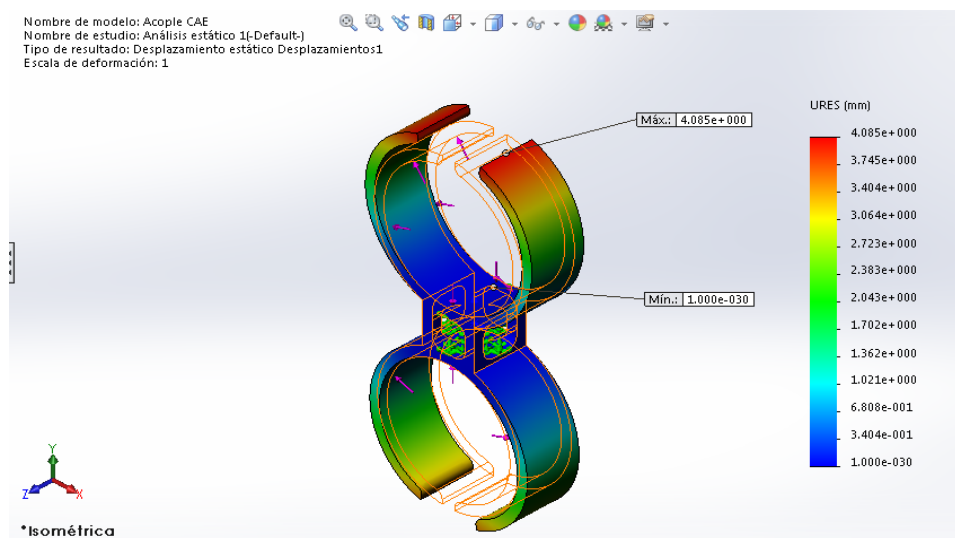


Figura 47. Resultados del análisis estático del acople de anillos – Desplazamiento

En las *Figura 48* y *Figura 49*, se presenta el detalle de la zona de tensión máxima en el acople de anillos (ubicada en la unión de los anillos con la base perforada) que es de 51,73 MPa menor al límite de fluencia de 62 MPa.

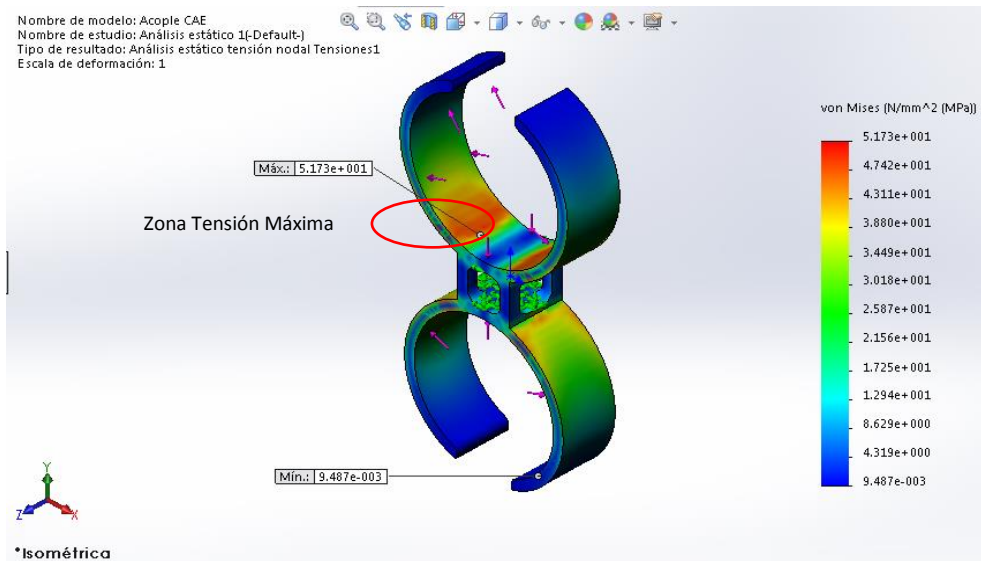


Figura 48. Resultados del análisis estático del acople de anillos – Tensión Máxima

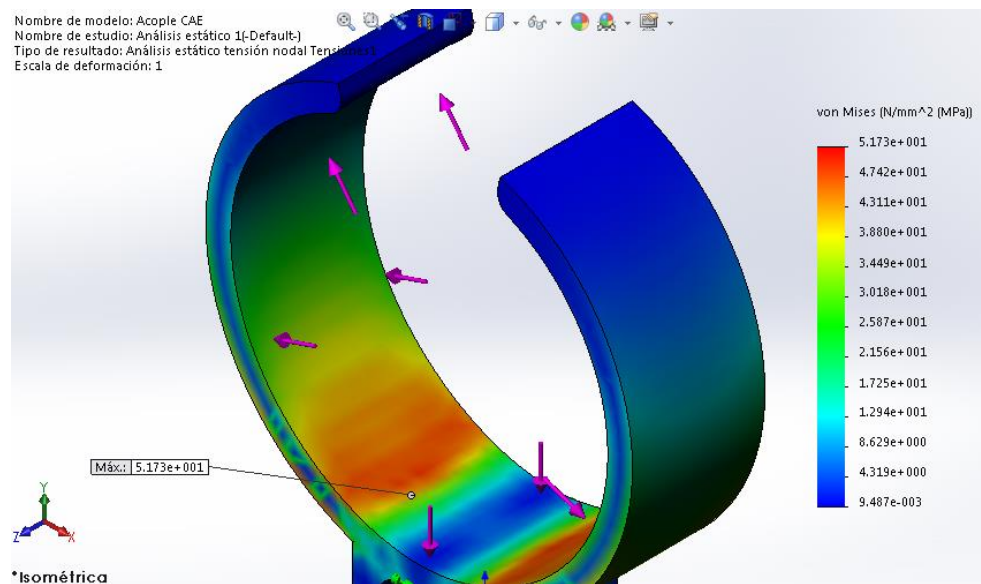


Figura 49. Resulta Zona de tensión máxima en el acople de anillos

CAPÍTULO V

DISEÑO DEL MOLDE

5.1 Materiales para moldes de inyección

Para que un material sea utilizado para la fabricación de moldes para inyección de plástico, deben cumplir los siguientes requisitos (JICA, 2018):

- Maquinabilidad (Material blando y fácil de maquinar)
- Resistencia al desgaste (Material duro y difícil de desgastarse)
- Anticorrosividad (Material inoxidable)
- Tenacidad (Material persistente contra golpes)
- Resistencia (Material resistente a la tensión, la compresión, y a la flexión)
- Homogeneidad (Material de propiedades homogéneas en general)
- Facilidad para aplicar tratamiento térmico (Material resistente a la deformación por el tratamiento térmico)
- Conductividad térmica (Material que tenga alta conductividad térmica)
- Rentabilidad (Material económico)
- Comercialización (Material fácil de conseguir)

Hay que considerar además que no existe un material que cumpla con todos los requerimientos, por lo que, la selección se basa en el objetivo y la aplicación.

Según (Baeza, 2015), se comprende que un material no puede presentar todas las propiedades que se necesitan. Por lo tanto, antes de fabricar el molde, es preciso exponer y debatir las propiedades indispensables impuestas por su aplicabilidad. Estas pueden estimarse según los cuatro puntos de vista siguientes:

- Tipo de masa de moldeo a elaborar (exigencias relativas a corrosión, abrasión, conductividad térmica y viscosidad).
- Tipo y magnitud del esfuerzo mecánico previsible (tamaño de la cavidad, presión de inyección, variaciones de forma, presión residual).
- Método de obtención del vaciado del bloque (arranque de viruta, estampado, erosión).
- Tratamiento térmico necesario.

5.1.1 Selección del material

A continuación, se procede a la selección del material para la fabricación del molde de inyección.

Función: Molde de inyección para fabricación de prototipos de cubertería utilizando PLA para personas con artritis en las manos.

Objetivos: - Minimizar el costo

Restricciones:

- Elaboración de prototipos
- Peso reducido
- Fácil de mecanizar
- Elevada conductividad térmica
- Estabilidad química
- Comercial

El material seleccionado es ALUMINIO ALEADO GRUPO 7000: Al-Zn-Mg-Cu, cuyas características se describen a continuación (PLASTICRAFT, 2008):

- Alta conductividad térmica (aproximadamente 3 veces más que el acero)
- Peso ligero (Una tercera parte del acero)
- Dureza (Como máximo un 85% del acero)

- Rigidez (Aproximadamente una tercera parte del acero)
- Maquinabilidad (De 2 a 3 veces más que el acero al carbono)
- Menor tiempo de mecanizado

En la **Tabla 19** se hace la comparación entre los tiempos de mecanizado del acero con el aluminio.

Tabla 19

Comparación de tiempos de manufactura entre el acero y aluminio

Proceso de mecanizado	Tiempo en % - Acero	Tiempo en % - Aluminio
Fresado de las caras y lados	100	16
Taladrado	100	17
Debastado	100	20
Acabado	100	30
Tiempo de mecanización total	100 (2 horas y 46 minutos)	24 (40 minutos)

Fuente: (PLASTICRAFT, 2018)

Del grupo 7000, el Aluminio comercial que se utilizará, se describe a continuación:

Importador: IVÁN BOHMAN C.A.

Aluminio: DURALUMINIO

Nombre comercial: PRODAX

Descripción: Es una aleación de aluminio de alta resistencia, laminado en caliente, que se entrega en barras redondas y placas, tratadas térmicamente. Las mismas son sometidas a una operación especial de estiramiento en frío para el máximo alivio de tensiones. Dado su alta resistencia y buena estabilidad, Prodax se ha convertido en un material ampliamente utilizado en la industria de moldes y matrices.

Condición de entrega: Tratado térmicamente a 146 – 180 Brinell

- **Áreas de aplicación:**

Tabla 20*Áreas de aplicación del PRODAX*

Áreas de aplicación	Prototipos	Serie cortas	Serie Medianas	Serie Largas
Moldes de soplado	x	x	x	x
Formado al vacío	x	x	x	x
Moldeo de espuma	x	x	x	(x)
Moldes	x	x	x	(x)
Moldes de inyección de termoplásticos	x	x	(x)	
Moldeo de goma	x	x		
Placas contenedoras y de apoyo, guías y sujetadores				

Fuente: (IVÁN BOHMAN, 2008)

- **Propiedades físicas:**

Tabla 21*Propiedades físicas del PRODAX*

Densidad kg/m ³ lbs/pulg ³	2830 0,102
Módulo de elasticidad N/mm ² PSI	71 500 10,3 x 10 ⁶
Coefficiente de expansión térmica por °C de 20 °C a 100 °C por °F (68 - 212 °F)	23 x 10 ⁻⁶ 12,8 x 10 ⁻⁶
Conductibilidad térmica W/m °C Btu pulg/ple °F	165 1 144
Calor específico J/Kg °C Btu/lb °F	890 0,20

Fuente: (IVÁN BOHMAN, 2008)

- **Propiedades mecánicas:**

Tabla 22*Propiedades mecánicas del PRODAX*

Placas (espesor) mm	Resistencia a la tracción N/mm ²	Límite de fluencia N/mm ²
>10 - 50	590	550
>50 - 100	570	520
>100 - 150	550	500
>150 - 200	535	485
>200 - 300	430	365
barras redondas (diámetro) mm		
40	680	630
100	680	620
200	670	610

Fuente: (IVÁN BOHMAN, 2008)

5.1.2 Datos de la máquina inyectora de plástico

Para la ejecución del proyecto se utilizará la máquina inyectora de plástico MATEU SOLE española año 90, la misma que cuenta con las características técnicas que se describen en la **Tabla 23**:

Tabla 23*Parámetros de inyección*

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Presión de inyección	20	MPa
Masa de inyección	15	gr
Voltaje de funcionamiento	220	V
Temperatura máxima	660	°C
Velocidad de inyección (referente a PE)	0,63	g/seg
Diámetro de la boquilla	11,87	mm
Diámetro interno de la boquilla	8,12	mm
Pre calentamiento de la resistencia (promedio)	10,44	seg
Cierre del cilindro (promedio)	1,09	seg
Bajada del émbolo	1,79	seg
Retorno del émbolo (promedio)	1,64	seg
Enfriamiento	10,02	seg
Apertura del cilindro	3,77	seg

Fuente: (Mateu Solé, 2018)

El material a inyectar es el PLA (ácido poliláctico), el mismo que posee las siguientes parámetros de manufactura (*Tabla 24*) que se utilizarán en el proceso de moldeo por inyección.

Tabla 24*Propiedades típicas para PLA Generic*

PROPIEDADES FÍSICAS		
Densidad/ Gravedad Específica	Valor Típico - Unidad	Método de Ensayo
--	1,24	ASTM D792
73°F	1,24 a 1,26 gr/cm ³	ISO 1183
Velocidad de Fundido	Valor Típico - Unidad	Método de Ensayo
210°C/ 2,16 kg	6 a 78 gr/10 min	ASTM D1238
190°C/ 2,16 kg	1,5 a 36 gr/10 min	ISO 1133
Contracción de Moldeo		
Flujo: 73°F	3,7E-3 a 4,1E-3 in/in	ASTM D955
73°F	0,30 a 1,1 %	ISO 294-4
PROPIEDADES MECÁNICAS		
Módulo de Tensión	Valor Típico - Unidad	Método de Ensayo
73°F	293000 a 514000 psi	ASTM D638
73°F	45000 A 815000 psi	ISO 527-2
Tensión		
Punto de fluencia, 73°F	8840 a 9500 psi	ASTM D638
Punto de fluencia, 73°F	2250 a 10400 psi	ISO 527-2
Rotura, 73°F	7080 a 8150 psi	ASTM D638
Rotura, 73°F	2000 a 10200 psi	ISO 527-2
73°F	6930 a 10000 psi	ASTM D638
Elongación	Valor Típico - Unidad	Método de Ensayo
Punto de fluencia, 73°F	9,8 a 10%	ASTM D638
Punto de fluencia, 73°F	1,0 a 8,5%	ISO 527-2
Rotura, 73°F	0,50 a 9,2%	ASTM D638
Rotura, 73°F	1,0 a 12%	ISO 527-2
Módulo de Flexión		
73°F	347000 a 715000 psi	ASTM D790
73°F	44200 a 1,38E+6 psi	ISO 178
Resistencia a la Flexión		
73°F	6950 a 16000 psi	ASTM D790
Impacto	Valor Típico - Unidad	Método de Ensayo
Fuerza de Impacto Charpy Notched (73°F)	0,67 a 2,6 ft.lb/in ²	ISO 179
Resistencia al impacto Charpy sin entalle (73°F)	4,0 a 11 ft.lb/in ²	ISO 179

CONTINÚA

Resistencia al Impacto Izod con ranura		
73°F	0,30 a 0,88 ft.lb/in ²	ASTM D256
73°F	1,6 a 3,0 ft.lb/in ²	ISO 180
PROPIEDADES TÉRMICAS		
Temperatura de deflexión bajo carga	Valor Típico - Unidad	Método de Ensayo
66 psi, No recocido	121 a 126°F	ASTM D648
66 psi, No recocido	122 a 248°F	ISO 75-2/B
264 psi, No recocido	118 a 122°F	ISO 75-2/A
Temperatura de transición vítrea	Valor Típico - Unidad	Método de Ensayo
--	134 a 136°F	ASTM E1356
--	111 a 145°F	DSC
Temperatura de Ablandamiento Vicat	130 a 146°F	ISO 306
Temperatura de Fusión	315 a 338°F	
Temperatura máxima de cristalización (calorimetría de barrido diferencial, DSC)	266 a 327°F	ASTM D3418
Inyección	Valor Típico - Unidad	Método de Ensayo
Temperatura de secado	113 a 172°F	
Tiempo de secado	2,9 a 6,0 hr	
Humedad máx. recomendada	0,010 a 0,30 %	
Temperatura de la parte trasera	302 a 365°F	
Temperatura de la parte central	338 a 410°F	
Temperatura de la parte delantera	374 a 393°F	
Temperatura de la boquilla	375 a 402°F	
Temp. de procesamiento (fusión)	353 a 464°F	
Temperatura del molde	61 a 224°F	
Presión de inyección	11400 a 11500 psi	
Contrapresión	72,5 a 160 psi	
Velocidad del husillo	75 a 153 rpm	
Extrusión	Valor Típico - Unidad	Método de Ensayo
Temperatura de secado	120 a 195°F	
Tiempo de secado	2,8 a 10 hr.	
Humedad máx. recomendada	5,0E-3 a 0,30%	
Temp. de la zona 1 del cilindro	327 a 374°F	
Temp. de la zona 2 del cilindro	331 a 377°F	
Temp. de la zona 3 del cilindro	335 a 402°F	
Temperatura del adaptador	338 a 390°F	
Temperatura de Masa Fundida	373 a 446°F	
Temperatura del cabezal	329 a 392°F	

Fuente: (PROSPECTOR, 2018)

5.1.3 Variables del moldeo por inyección más importantes

5.1.3.1 Masa a inyectar

Para calcular la cantidad de polímero que se va a inyectar, se requiere conocer tanto el volumen de la cuchara (V) como la densidad del PLA.

$$M_{cuchara} = V \rho_{PLA} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$M_{cuchara} = 7,35 \text{ cm}^3 \left(1,24 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$M_{cuchara} = 9,114 \text{ g}$$

5.3.1.2 Capacidad de inyección del PLA

La capacidad de inyección nominal de la máquina es de 15g para el polietileno, por lo que se procede a calcular la capacidad para el PLA.

$$Ci_{PLA} = \frac{Ci_{PE} \cdot \rho_{PLA}}{\rho_{PE}} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

Ci_{PLA} = Capacidad de inyección para el ácido poliláctico

Ci_{PE} = Capacidad de inyección para el polietileno

ρ_{PLA} = Densidad del ácido poliláctico

ρ_{PE} = Densidad del polietileno

$$Ci_{PLA} = \frac{15 \text{ g} \left(1,24 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)}{0,92 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$$

$$Ci_{PLA} = 20,2 \text{ g}$$

5.3.1.3 Presión de inyección

Este parámetro es el más influyente en el correcto llenado del molde y determina la fuerza de empuje que trata de abrir el molde. Se requiere determinar el máximo recorrido del flujo de material, medido desde la boquilla de inyección hasta el punto más alejado del molde de la cuchara, que es 240 mm.

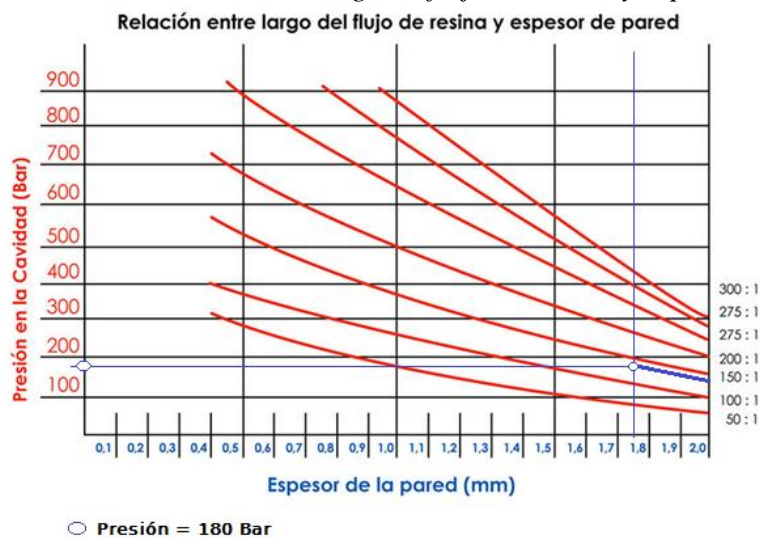
Calculando la relación de flujo (RF):

$$RF = \frac{\text{Recorrido máximo de flujo}}{\text{Espesor de pared}} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$RF = \frac{240\text{mm}}{1,75\text{mm}} = 137,14 \approx 137$$

Entonces, la relación de flujo es de 137:1, y utilizando la **Tabla 25**, determinamos la presión mínima de inyección en el molde.

Tabla 25 Relación entre largo de flujo de resina y espesor de pared



Fuente: (TECNOVA, 2018)

De acuerdo a la **Tabla 23**, se obtiene una presión en la cavidad de 180 bar (18MPa) aproximadamente.

5.3.1.4 Fuerza de cierre

Este valor permite determinar la fuerza necesaria de la máquina para cerrar el molde durante el proceso de inyección. Se calcula multiplicando la presión de inyección (P_{iny}) por el área proyectada (A_p) de la cuchara y acoples (**Figura 50**) sobre la cara de la placa móvil (molde núcleo), con un valor total de 3781,74 mm² (0,003782 m²).

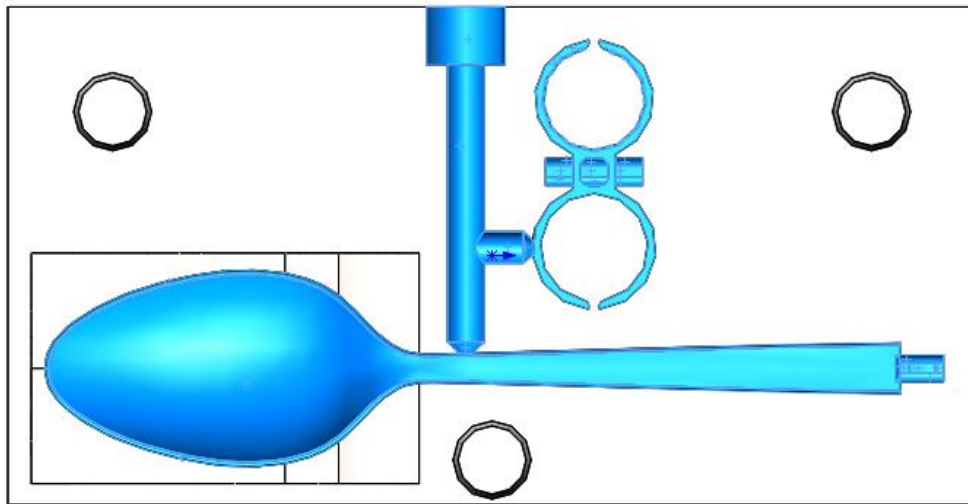


Figura 50. Área proyectada de la cuchara y acoples

Para calcular la fuerza de cierre (F_c), aplicamos la ecuación:

$$F_c = A_p \cdot P_{iny} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$F_c = (0,003782 \text{ m}^2) \left(18 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)$$

$$F_c = 68,08 \text{ kN} = 6,9 \text{ ton}$$

Por lo tanto, la fuerza de cierre calculada es de 6,9 ton, pero según (TECNOVA, 2018) se debe adicionar el 20% sobre la fuerza nominal, entonces, el requerimiento es de 8,28 ton.

5.3.1.5 Tiempo de enfriamiento

Es el tiempo medido desde que termina la inyección hasta la apertura completa del molde, es decir, el tiempo que toma en solidificarse la cuchara.

Utilizando la ecuación:

$$TF = \frac{-e_{m\acute{a}x}^2}{2\pi\alpha_n} \cdot \ln \left[\frac{\pi T_{exp} - T_{mold}}{4(T_{mat} - T_{mold})} \right] \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

TF	= Tiempo de enfriamiento	[seg]
$e_{m\acute{a}x}$	= Espesor máximo de la pieza	[0,175 cm para el PLA]
α_n	= Difusividad térmica del material	[5,97 x 10 ⁻³ cm ² /seg para el PLA]
T_{exp}	= Temperatura de desmoldeo de la pieza	[158°C]
T_{mold}	= Temperatura del molde	[25°C]
T_{mat}	= Temperatura del material	[200°C]

$$TF = \frac{-0,175^2}{2\pi(5,97 \times 10^{-3})} \cdot \ln \left[\frac{\pi(158) - 30}{4(200 - 30)} \right] = 0,30 \text{ segundos}$$

5.3.1.6 Tiempo de inyección

Es el tiempo que transcurre para que el material fundido fluya desde el orificio de entrada al molde hasta el punto más lejano de la cavidad donde se va a depositar el material.

Este parámetro depende de varios factores como: la cantidad de material a ser inyectado, densidad y viscosidad del material, porcentaje de la capacidad de inyección que se está usando de la máquina inyectora, características del molde, etc.

5.3.1.7 Velocidad de inyección

La velocidad calcularemos en función a los datos obtenidos del polietileno (PE).

$$S_{PLA} = S_{PE} \frac{\rho_{PLA}}{\rho_{PE}} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

S_{PLA} = velocidad de inyección del PLA

S_{PE} = velocidad de inyección del polietileno

ρ_{PLA} = densidad del PLA

ρ_{PE} = densidad del polietileno

$$S_{PLA} = \left(0,63 \frac{g}{seg}\right) \frac{1,24}{0,92} = 0,85 \frac{g}{seg}$$

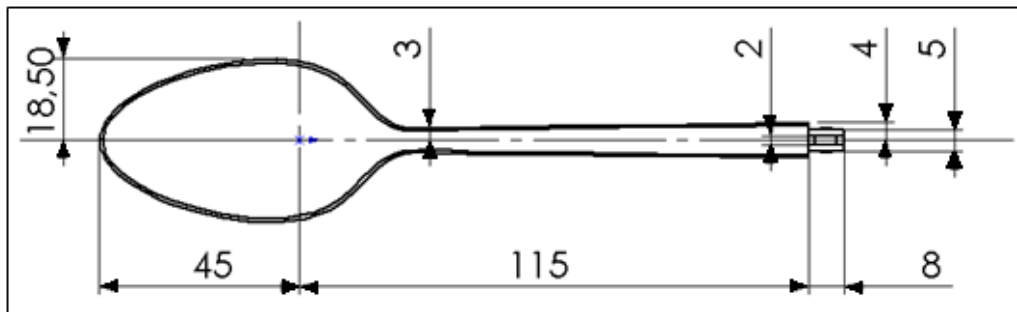
5.2 Simulación del proceso de inyección

Para realizar el proceso de simulación de inyección de la pieza se emplea el paquete informático del programa CAD de SolidWorks denominado SolidWorks Plastics, del mismo se extraen los parámetros calculados para aplicar en el diseño y fabricación del molde requerido para conformar la pieza final.

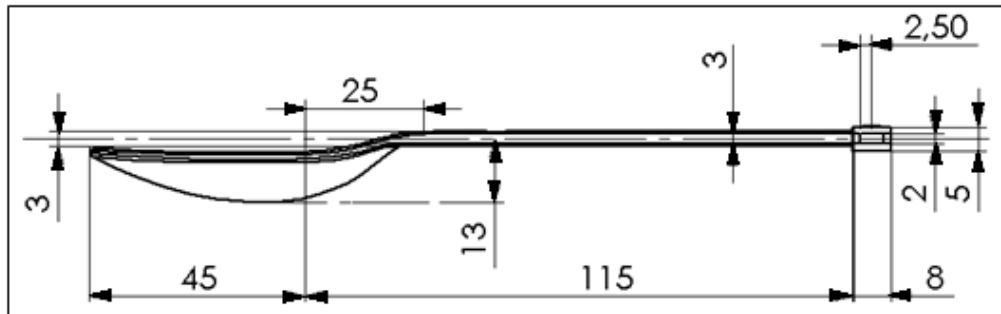
5.2.1 Modelo de las piezas a ser inyectadas

En las *Figura 51* y *Figura 52*, se presentan las figuras (medidas en milímetros) que se va a inyectar:

Vista Superior - Cuchara



Vista Perfil - Cuchara



Vista 3D - Cuchara

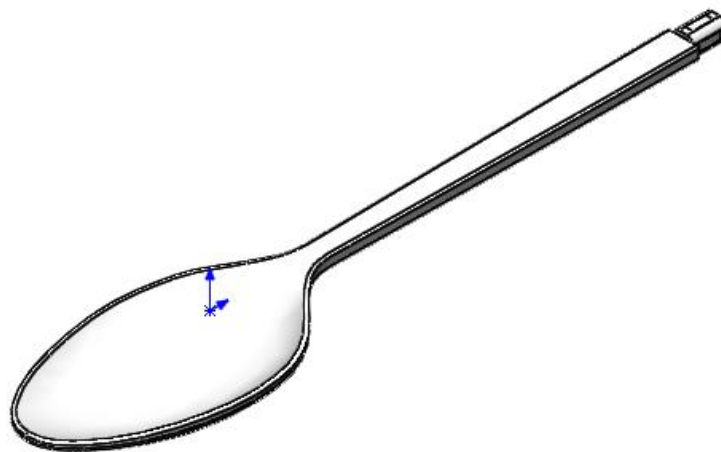
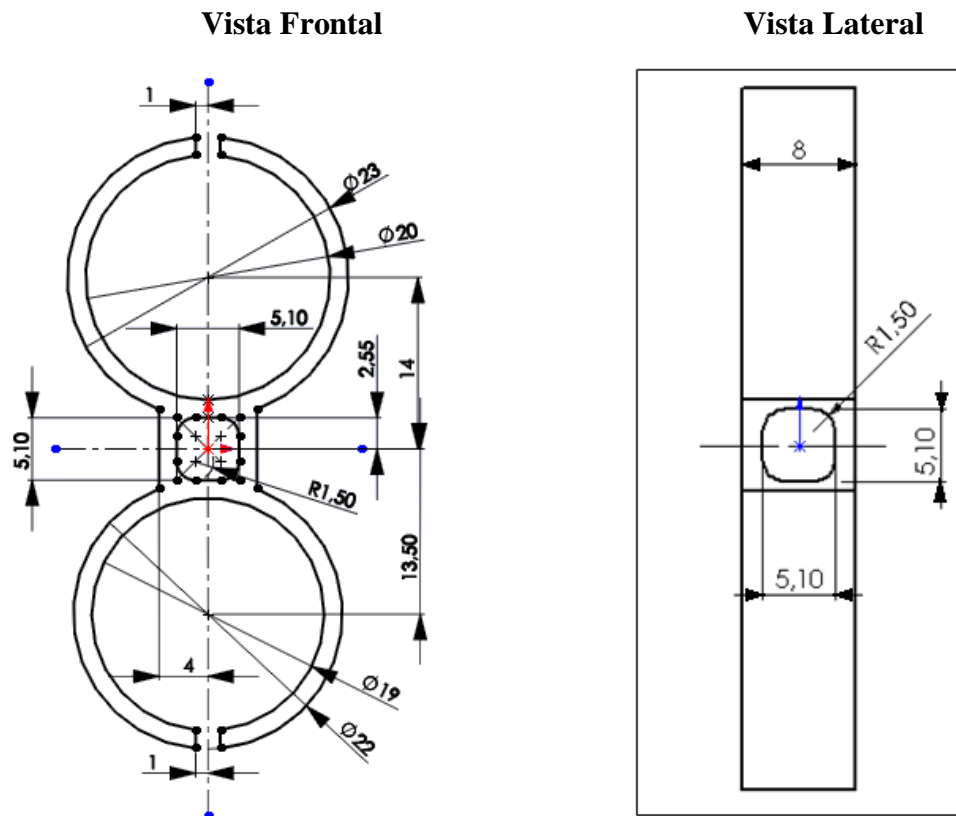


Figura 51. Croquis de la cuchara



Vista 3D

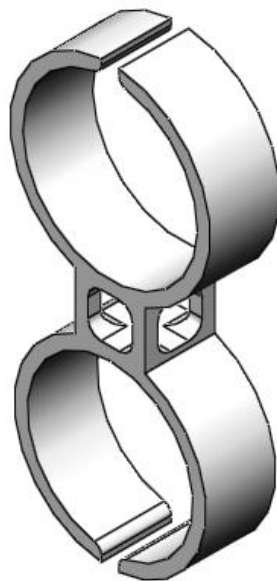


Figura 52. Croquis del acople de anillos

5.2.2 Parámetros para la simulación

Para la simulación en SolidWorks Plastics del proceso de inyección de la pieza se requiere varios parámetros específicos para introducir en éste software y uno de ellos es el material (seleccionado previamente) que se explica a continuación:

Nombre Fabricante: NatureWorks

Nombre Técnico: Ingeo™ Biopolymer 3001D

Tabla 26

Propiedades Físicas y Mecánicas del PLA Ingeo 3001D

Table 1 - Typical Material & Application Properties ⁽¹⁾		
Physical Properties	Ingeo Resin	ASTM Method
Specific Gravity	1.24	D792
MFR, g/10 min (210°C, 2.16kg)	22	D1238
Clarity	Transparent	
Mechanical Properties		
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	9,000 (62)	D638
Tensile Elongation, %	3.5	D638
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16)	D256
Flexural Strength (MPa)	15,700 (108)	D790
Flexural Modulus (MPa)	515,000 (3600)	D790
Heat Distortion Temperature (°C)	55	E2092

Processing Temperature Profile		
Melt Temperature	390°F	200°C
Feed Throat	70°F	20°C
Feed Temperature (crystalline pellets)	330°F	165°C
Feed Temperature (amorphous pellets)	300°F	150°C
Compression Section	380°F	195°C
Metering Section	400°F	205°C
Nozzle	400°F	205°C
Mold	75°F	25°C
Screw Speed	100-175 rpm	
Back Pressure	50-100 psi	
Mold Shrinkage	.004 in/in. +/- .001	

Fuente: (Nature Works, 2018)

5.2.3 Ingreso de datos del material al software de simulación

A continuación ingresamos los datos del material en SolidWorks ya que en la base de datos que viene por defecto no consta el polímero biodegradable PLA del cual estará manufacturado nuestro producto.

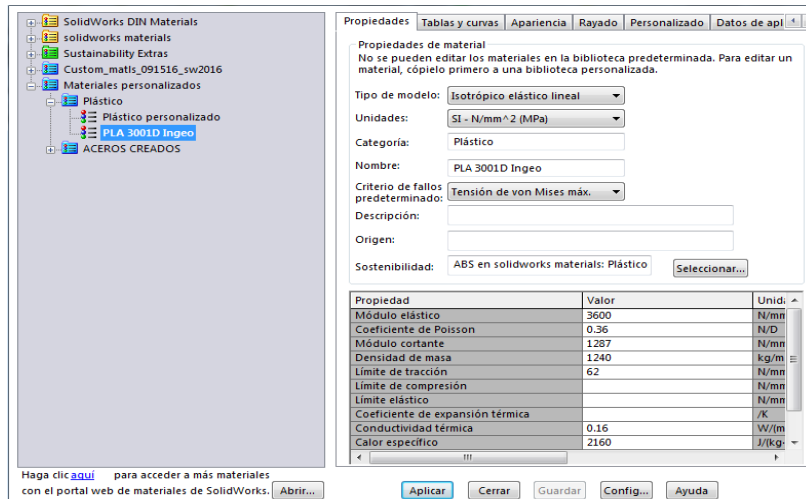


Figura 53. Creación Polímero PLA en SolidWorks

5.2.4 Análisis del proceso de inyección

Para este paso se ubica la cuchara y el acople de anillos en un mismo plano para que de esta manera la simulación se realice conjuntamente en las 2 piezas y nos arroje los parámetros de inyección lo más cercano a la realidad, como se muestra en la **Figura 54**.

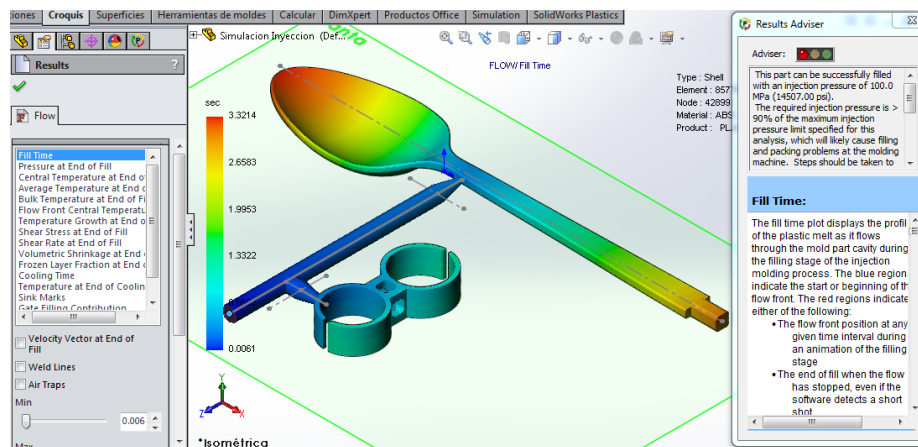


Figura 54. Resultados de la simulación de inyección – Tiempo y Presión de llenado

Según los datos que arroja la simulación mostrada en la **Figura 54** se visualiza los 2 parámetros iniciales y esenciales como son:

- Tiempo de inyección: 3,32 segundos
- Presión de llenado: 100 MPa

Adicional, en la **Figura 55** se observa una condición desfavorable presente en el proceso de inyección de plásticos como es el aire atrapado dentro de la cavidad lo que provoca que el material plástico se quemé alrededor de éste aire obturado

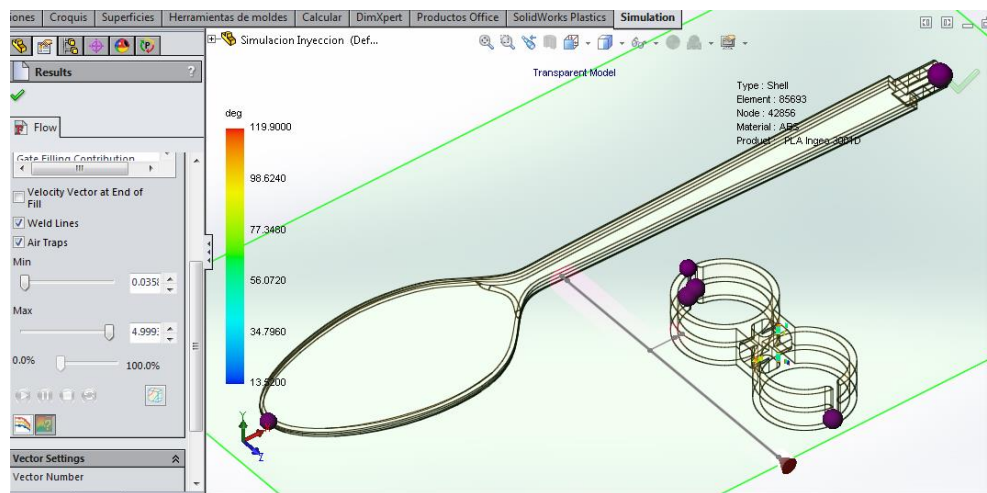


Figura 55. Resultados de la simulación de inyección – Aire atrapado

En el presente estudio tenemos la limitante de presión máxima de llenado, dado por la máquina inyectora seleccionada previamente que es de 20 MPa, por ésta razón se debe reducir dicha presión modificando ciertas variables como:

- Tiempo de inyección
- Diseño de *runners* (conductos por donde fluye el material fundido hacia las cavidades del molde)

Teniendo en cuenta estas puntualizaciones se realiza las siguientes modificaciones:

- Tiempo inyección: se incrementa de 3.32 segundos (calculados por el software) a 8 segundos.

- Diseño de *runners*: Ø2 y Ø7 (en forma de cono), mismo que está dado por la geometría del mango de la cuchara que es por donde ingresara el material fundido a la cavidad del molde y por el “*Sprue*” o boquilla de la maquina inyectora.

Para éste diseño de *runners*, **Figura 56**, se accede al “Equilibrado de *Runner*” que es otra de las funciones especiales que viene con el mismo software utilizado.

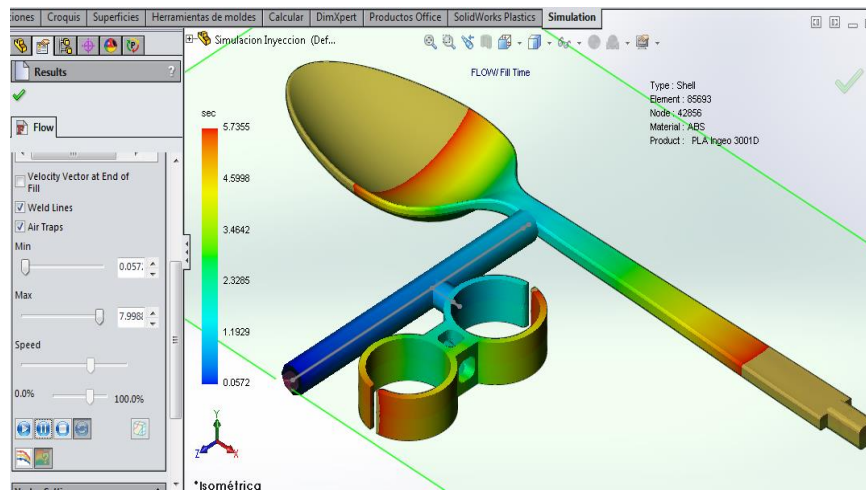


Figura 56. Resultados de la simulación de inyección – Equilibrado de *runners*

En la **Figura 57** se observa que el software realiza una cierta modificación en cuanto a la geometría de los “*Runners*” y que sumado al aumento del tiempo de inyección da como resultado una presión máxima de llenado de 19MPa lo que viabiliza el proceso de inyección en la máquina de llenado seleccionada.

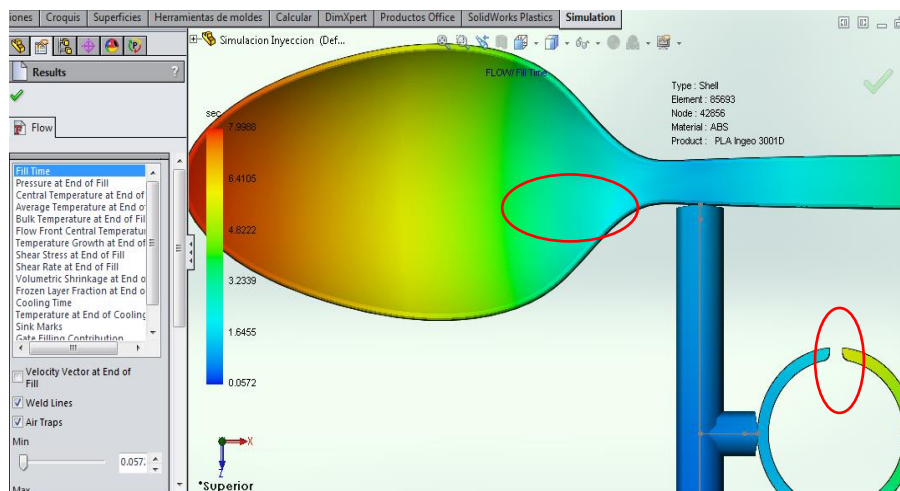


Figura 57. Detalle del cambio de geometría de los “*Runners*”

A continuación se analiza todos los parámetros de inyección que nos arroja el software:

5.2.4.1 Tiempo de llenado (Fill Time)

En la **Figura 58**, se observa en color azul el inicio del frente de flujo de plástico fundido y en color rojo el final del relleno cuando el flujo se ha detenido. Se ha considerado un tiempo de 8 segundos (modificados intencionalmente para bajar la presión máxima de llenado limitada por la máquina inyectora que es de 20 MPa).

Los puntos de inyección se han colocado de tal forma que el material fundido llene las 2 cavidades al mismo tiempo lo cual funciona correctamente para cada geometría por separado pero no así en conjunto que por cuestiones de forma considerablemente distintas entre las piezas se obtiene tiempos de llenado diferentes para sus respectivas cavidades aún después de equilibrar automáticamente los “*Runners*”;

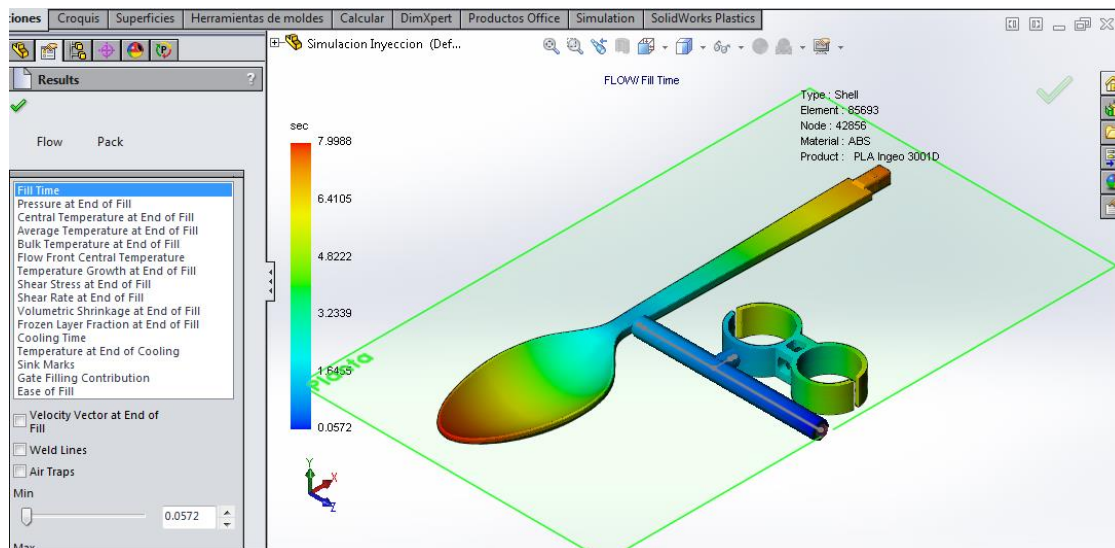


Figura 58. Simulación del tiempo de llenado

5.2.4.2 Presión de llenado (Pressure at End of Fill)

En la **Figura 59**, se observa la presión máxima requerida que es de 19,04 MPa, y es la idónea para llenar las cavidades del molde con el material que ingresa fundido, ésta presión cae distribuida a lo largo de toda la longitud de la pieza.

Otro detalle que se aprecia es la presión casi igualmente distribuida hacia los puntos más lejanos del punto de inyección de cada una de las cavidades por separado, lo que se traduce en un mejor empaquetado de las piezas.

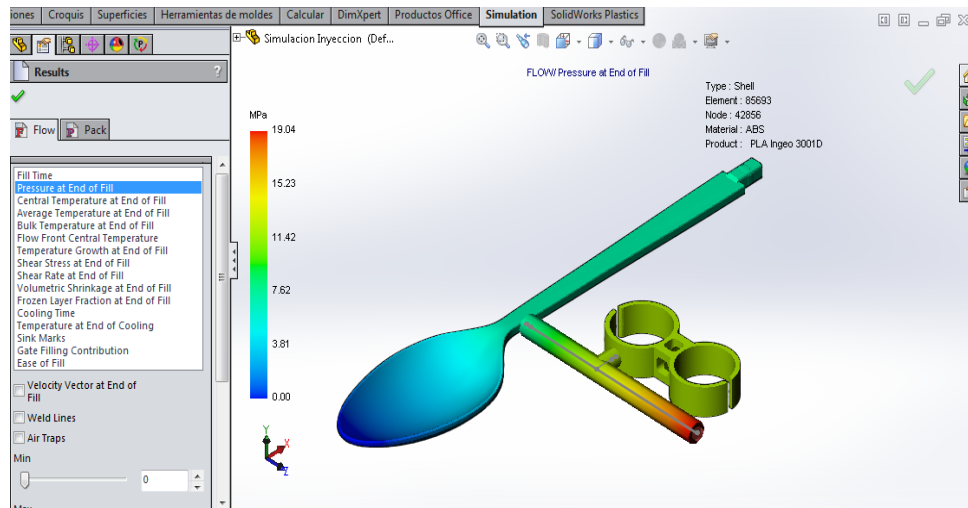


Figura 59. Simulación de la presión de llenado

5.2.4.3 Temperatura promedio al final del llenado (Average Temp. at End of Fill)

Este parámetro nos muestra la temperatura del plástico fundido ubicado en la posición central entre las superficies del molde y en las zonas donde existe mayor concentración de temperatura puede haber depresiones superficiales y alabeos; ayuda a visualizar las zonas más calientes de la pieza y proceder a colocar los canales de enfriamiento pero en nuestro estudio no se considerarán los mismos por ser un prototipo.

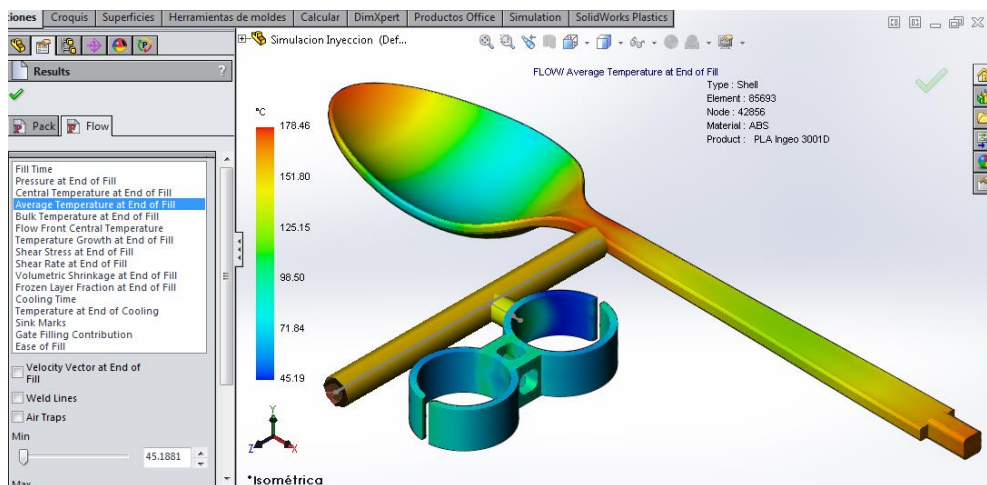


Figura 60. Simulación de la temperatura promedio al final del llenado

5.2.4.4 Temperatura de abultamiento al final del llenado (*Bulk Temperature at End of Fill*)

Ésta temperatura muestra cuanto ha cambiado el derretimiento del material dentro del molde al final del llenado, **Figura 61**, y desde la temperatura de fusión, indicando en azul el enfriamiento al final del relleno y en rojo el calor que aún se retiene y que podría causar abultamiento en zonas específicas de la pieza lo cual se minimiza con los conductos de refrigeración del molde que como se dijo anteriormente no se incluirá por tratarse de un prototipo.

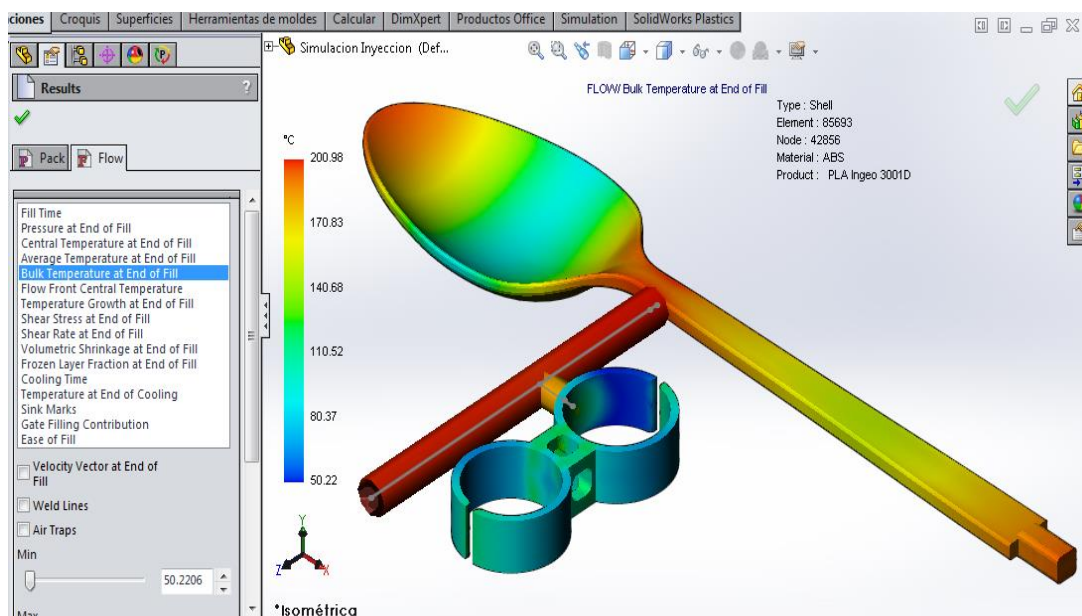


Figura 61. Simulación de la temperatura de abultamiento al final del llenado

5.2.4.5 Aumento de temperatura al final del llenado (*Temperature Growth at End of Fill*)

En el proceso de inyección de plástico se puede dar un fenómeno como es el incremento de la temperatura del material fundido por encima de la temperatura de fusión debido a las elevadas tasas de corte o cizallamiento provocando degradación del material. En la **Figura 62**, se observa dicho fenómeno y se comprueba que ésta temperatura es prácticamente nula lo que no provocaría degradación del material, que para el material seleccionado está sobre los 200 °C.

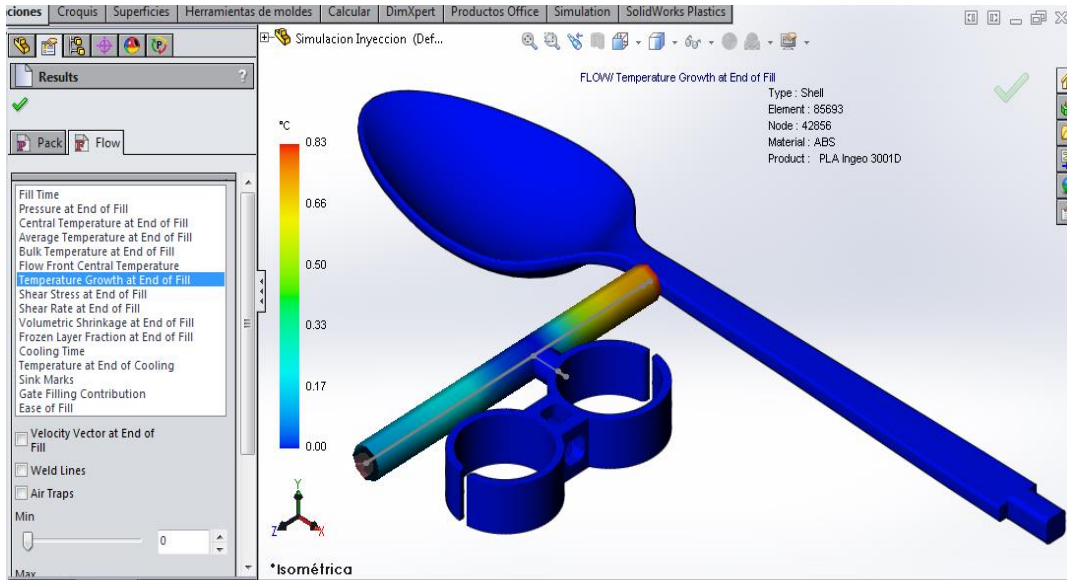


Figura 62. Simulación del aumento de temperatura al final del llenado

5.2.4.6 Esfuerzo cortante al final del relleno (*Shear Stress at End of Fill*)

Al fluir el material derretido dentro de las cavidades del molde, se producen esfuerzos cortantes paralelos a las paredes de éstas cavidades y en dirección al flujo que provocaría fallos en el material, que en la **Figura 63**, se observa un valor máximo de 0,65 MPa.

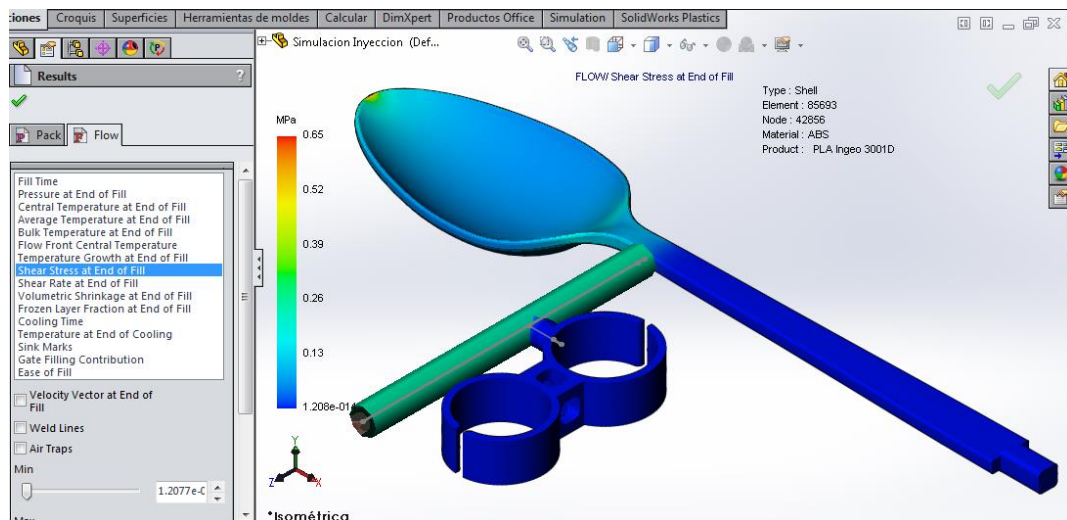


Figura 63. Simulación del esfuerzo cortante a final del llenado

5.2.4.7 Contracción volumétrica al final del llenado (*Volumetric Shrink at End of Fill*)

Es un parámetro muy importante que nos indica si se produjo espacios vacíos dentro del relleno de las cavidades lo que provocaría una contracción en zonas aledañas a ésta falla en el material. En la **Figura 64** se visualiza que éste fenómeno está totalmente ausente.

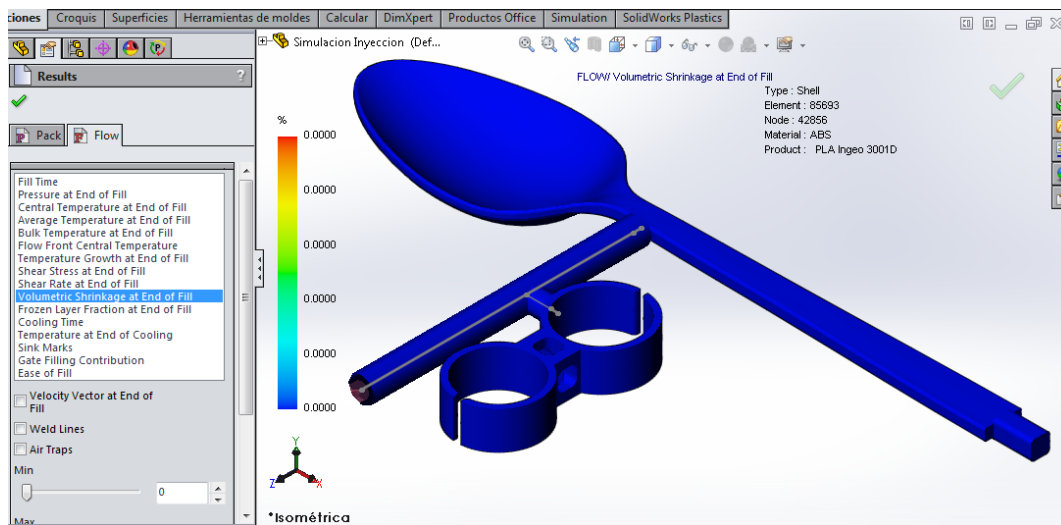


Figura 64. Simulación de la contracción volumétrica al final del llenado

5.2.4.8 Capa congelada al final del llenado (*Frozen Layer Fraction at End of Fill*)

Muestra las áreas donde hay mayor o menor fracción de capa congelada producida en el material fundido al entrar en contacto con las paredes de las cavidades del molde que como se sabe tiene gran diferencia de temperatura con la del material derretido.

En la **Figura 65**, se observan las áreas donde hay mayor fracción de capa congelada (zonas rojas) y existe el riesgo que no se empaque tan bien el material, esto se podría minimizar reduciendo el tiempo de inyección pero como ya se ha comentado anteriormente, éste tiempo no se puede disminuir porque aumentaría la presión máxima de llenado y la maquina inyectora seleccionada ya no alcanzaría a llenar correctamente las cavidades del molde.

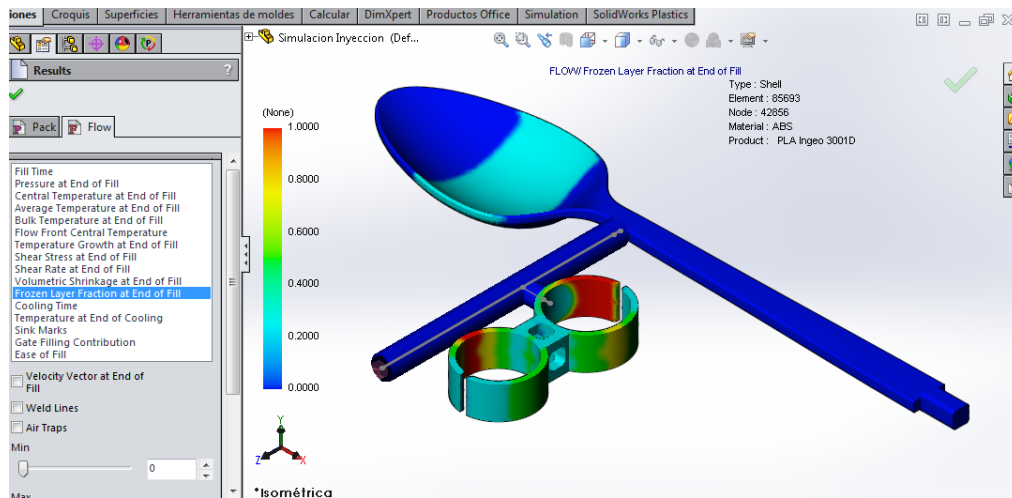


Figura 65. Simulación de la fracción de capa congelada

5.2.4.9 Tiempo de Enfriamiento (Cooling Time)

Es el tiempo que toma enfriar el material una vez que ha fluido dentro del molde hasta la temperatura de este último. Típicamente, el tiempo de enfriamiento es el 70% del ciclo total de empaquetado (SolidWorks, 2016). En la **Figura 66**, se aprecian estos tiempos.

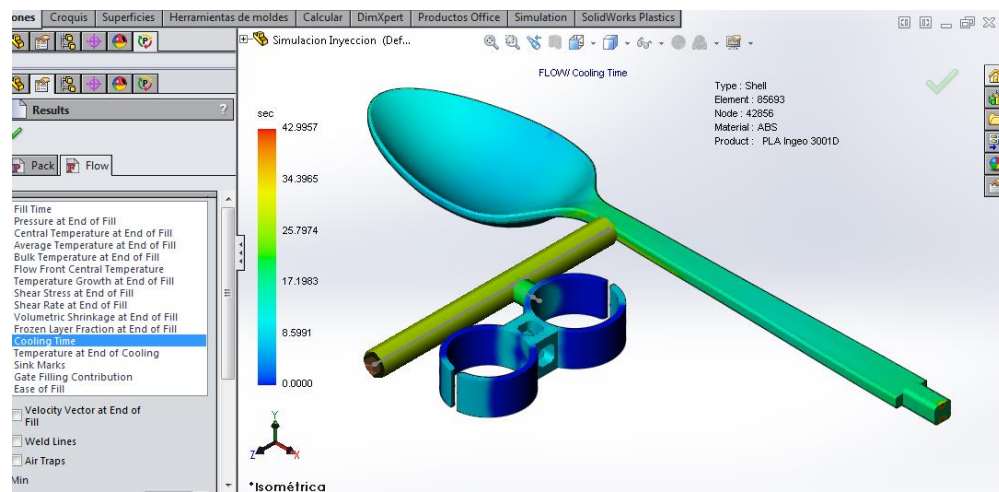


Figura 66. Simulación del tiempo de enfriamiento

5.2.4.10 Marcas de Hundimiento (Sink Marks)

Son depresiones en la superficie de las piezas de plástico moldeadas por inyección que se manifiesta donde hay mayor concentración del material ya que por las propiedades aislantes de

temperatura de los polímeros, retienen el calor focalizándose en su núcleo y consiguientemente jalando material de la superficie hacia dentro lo que provoca las marcas de hundimiento. En la **Figura 67**, se ve que no hay presencia de dichas marcas.

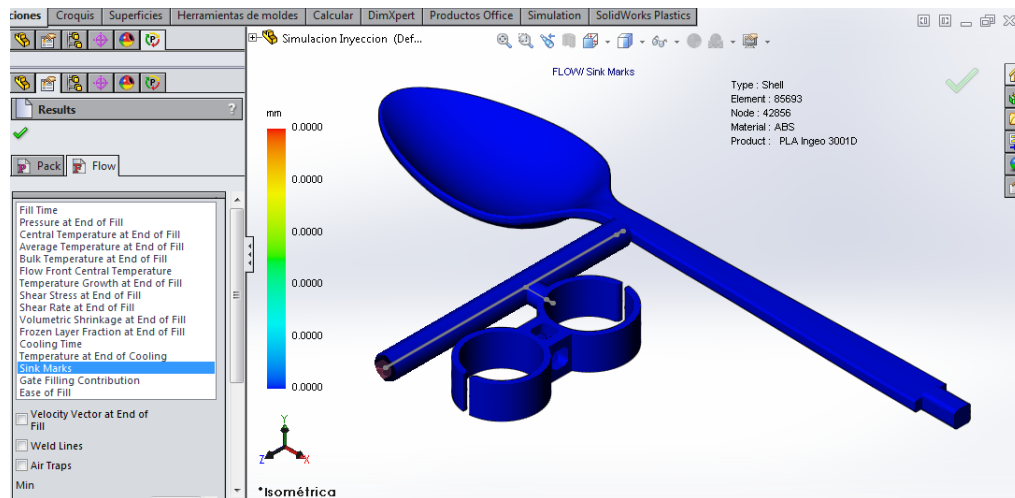


Figura 67. Simulación de las marcas de hundimiento

5.2.4.11 *Facilidad de llenado (Easy of Fill)*

Este parámetro indica en verde las áreas que pueden ser llenadas con presiones de inyección normales. En la **Figura 68**, se observa la facilidad de llenado correspondiente al proceso que se analizando en el presente estudio.

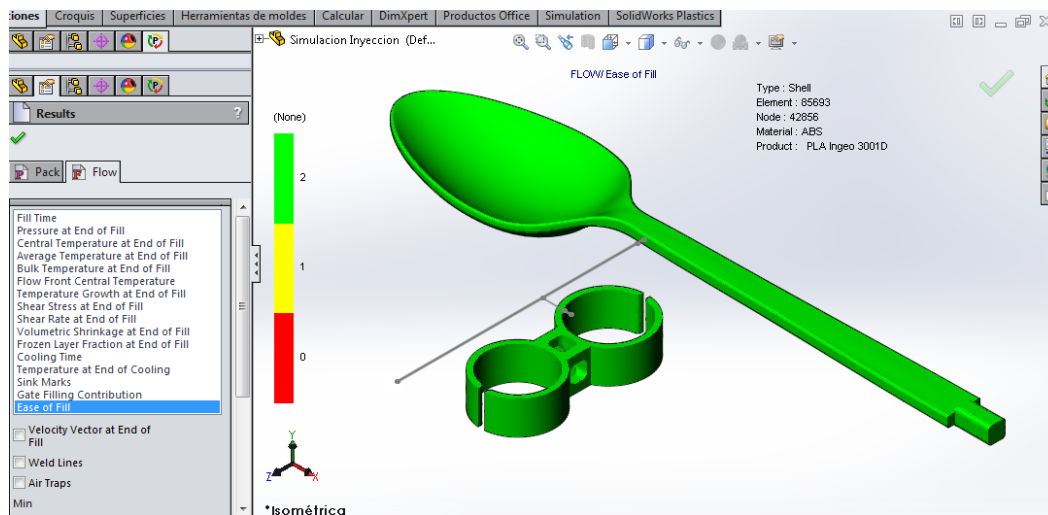


Figura 68. Simulación de facilidad de llenado

5.2.4.12 Fuerza de Cierre

Se refiere a la fuerza necesaria para mantener unidas las 2 placas del molde y el material fundido no pueda escaparse por sus uniones formando rebabas y caídas de presión de inyección por fugas de material. En las siguientes figuras se presentan la fuerza requerida para las direcciones X, Y, Z, como se muestra en las siguientes figuras.

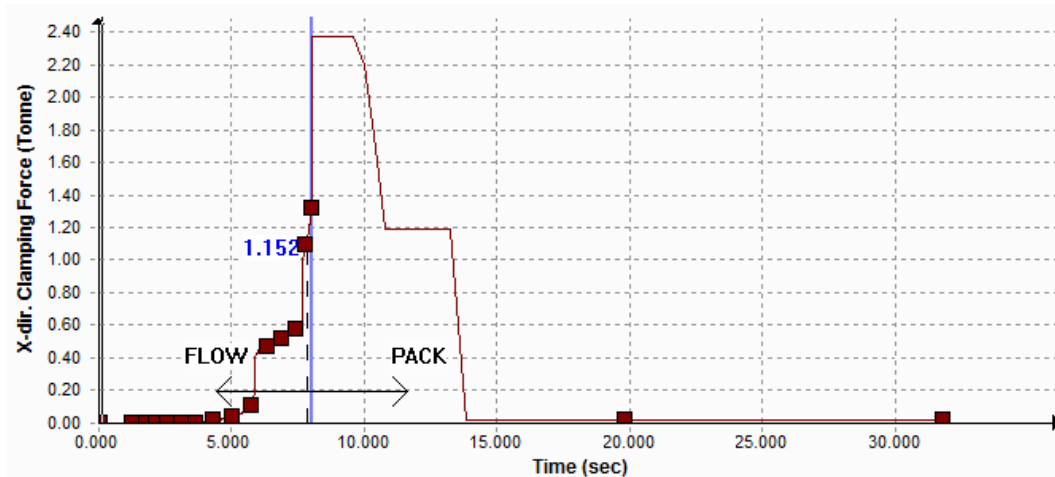


Figura 69. Simulación de la fuerza de cierre en la dirección X

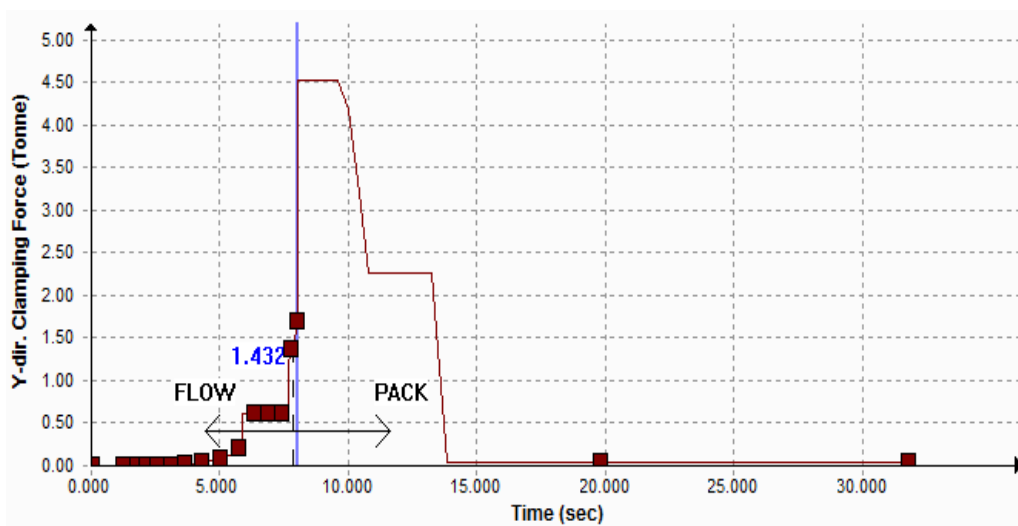


Figura 70. Simulación de la fuerza de cierre en la dirección Y

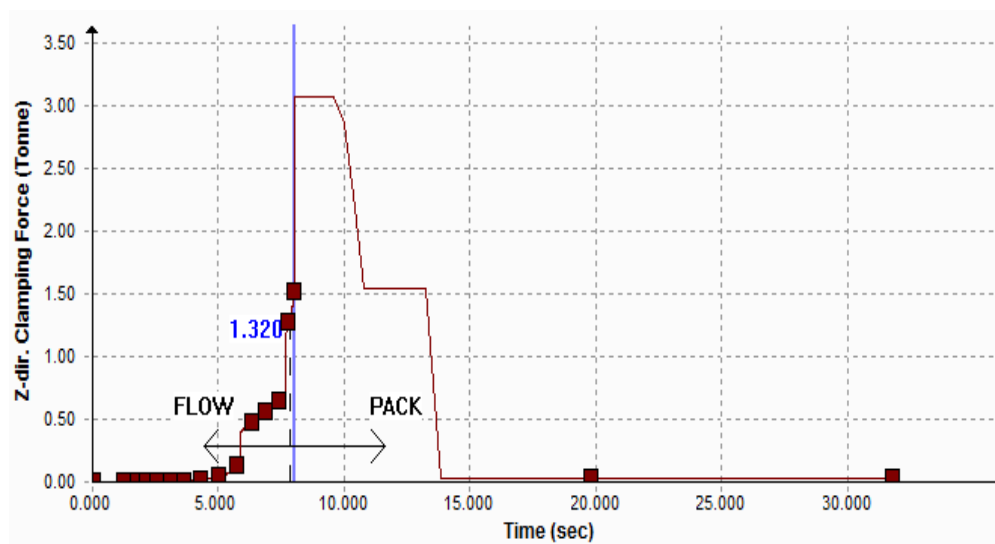


Figura 71. Simulación de la fuerza de cierre en la dirección Z

Las tres gráficas anteriores nos muestran las presiones de cierre que se necesita especificada en cada una de las direcciones X, Y, Z de donde se concluye que para el proceso realizado se necesita una fuerza de cierre mínima de 1,432 ton.

Una vez establecidos los parámetros indispensables para el presente proceso de inyección, a continuación se resumen en una tabla para una mejor visualización de los mismos:

Tabla 27

Tabla de Parámetros Finales

INFORMACIÓN DEL MODELO

Nombre:	Cuchara con acoples de anillo
Peso:	9,56 gr
Volumen:	8,54 cc
Tamaño de piezas en el molde:	X - 179,80 mm
	Y - 18,40 mm
	Z- 90,61 mm

INFORMACION DEL MATERIAL

Material:	Ácido Poliláctico (PLA)
Nombre del producto:	Ingeo™ Biopolymer 3001D
Temperatura de fusión:	200 °C
Temperatura del molde:	25 °C

CONTINÚA



Temperatura de expulsión:	158,06 °C
Temperatura de transición vítrea:	58 °C
Calor específico:	2160 J/(Kg-°K)
Conductividad Térmica:	0,16 W/(m-°K)
Módulo de Young:	3500 Mpa
Índice de Poisson:	0,33

INFORMACION DEL PROCESO DE INYECCION

Fuerza de cierre:	1,432 Ton
Tiempo de llenado:	8 seg.
Tiempo de enfriamiento:	43 seg.
Presión de inyección:	19 Mpa
Temperatura al final de la inyección:	200,92 °C
Temperatura promedio al final del llenado:	178,46 °C
Temperatura de abultamiento al final del llenado:	200,98 °C
Aumento de la temperatura al final del llenado:	0,83 °C
Temperatura al final del enfriamiento:	158,06 °C
Esfuerzo cortante al final del relleno:	0,65 Mpa
Trampas de aire:	No
Facilidad de llenado:	100%
Marcas de hundimiento:	0,0 mm

Con el resumen de datos que se observa en la **Tabla 27** los cuales fueron extraídos por un proceso de simulación mediante el software SolidWorks Plastics y los cuales nos dan una buena aproximación a los fenómenos de un proceso real, seguidamente se explica el proceso para la fabricación del molde de inyección.

5.2.5 Fabricación del molde de inyección

Para la fabricación del molde de inyección se aplica el módulo de “Herramientas de moldes” con el que cuenta SolidWorks y para éste propósito se divide el proceso en las siguientes secciones:

- Molde de la cuchara
- Molde del acople de anillos
- Porta núcleos y cavidades
- Placas del molde

Un aspecto fundamental a considerar dentro de la fabricación de moldes es el encogimiento que los polímeros sufren en el proceso de inyección, lo cual se traduce en una reducción volumétrica del material que depende del nivel de cristalización al cual es sometido. Para el biopolímero que se utilizará (PLA) se ha seleccionado un factor de encogimiento del 2.5%.

5.2.5.1 Molde de la cuchara

Para el molde correspondiente se utilizará el mismo CAD de la cuchara con el que se realiza el estudio de análisis estático, y se aplican los procesos guiados por el software para obtener los moldes individuales mencionados.

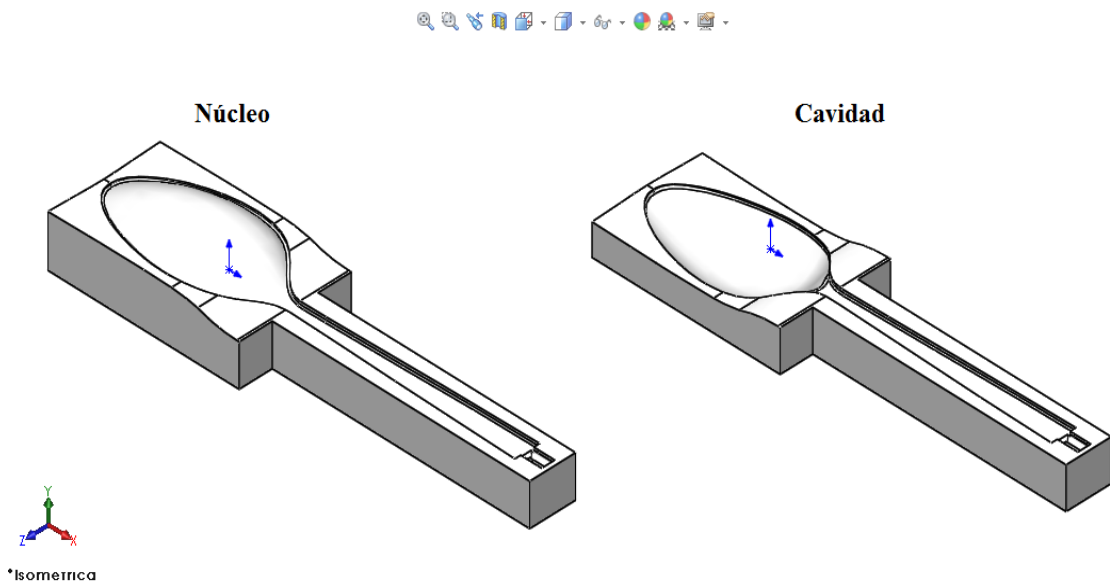


Figura 72. Moldes del núcleo y cavidad de la cuchara

5.2.5.2 Molde del acople de anillos

Para éste molde se utiliza el CAD del acople de anillos y se sigue la misma lógica utilizada en el apartado anterior.

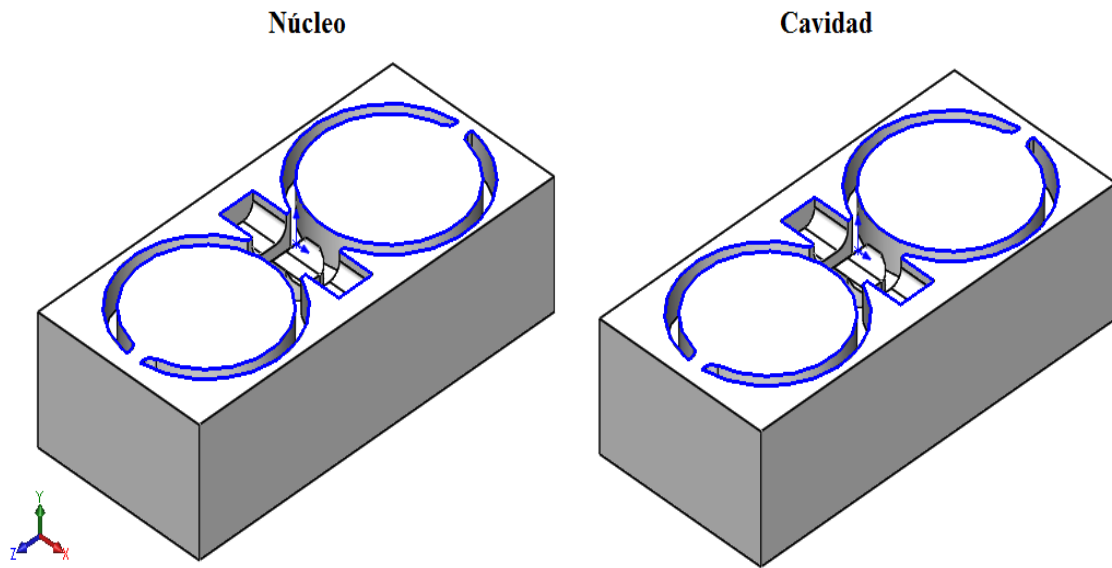


Figura 73. Moldes del núcleo y cavidad del acople de anillos

5.2.5.3 Porta núcleos y cavidades

Corresponde a la placa en la cual se montarán los núcleos y cavidades diseñados.

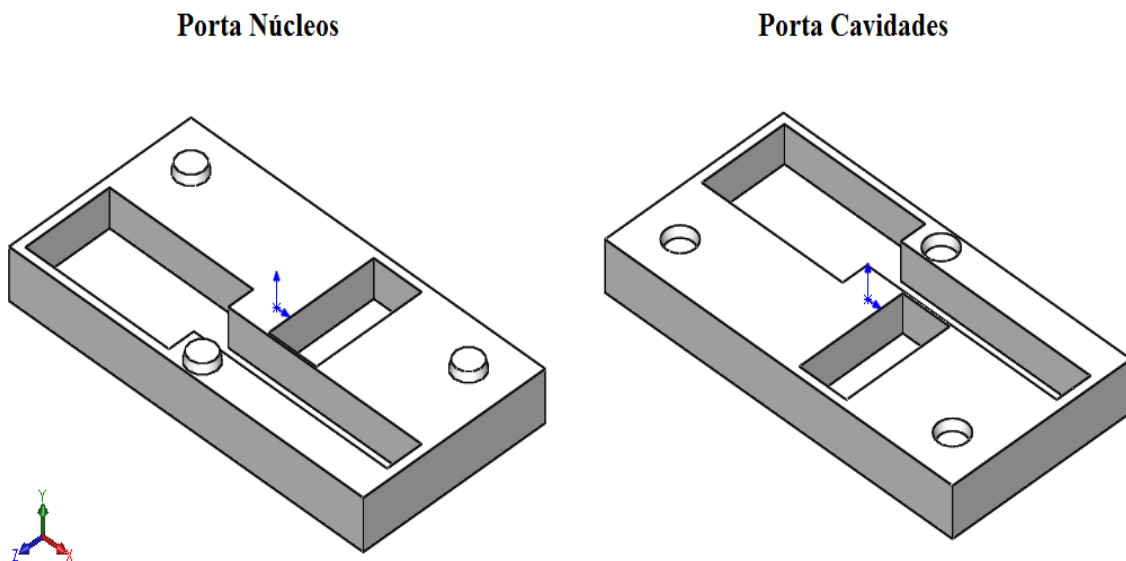


Figura 74. Porta núcleos y cavidades

5.2.5.4 Placas del molde

Finalmente tenemos las placas de los moldes donde se va a inyectar el plástico seleccionado y fabricar el producto final.

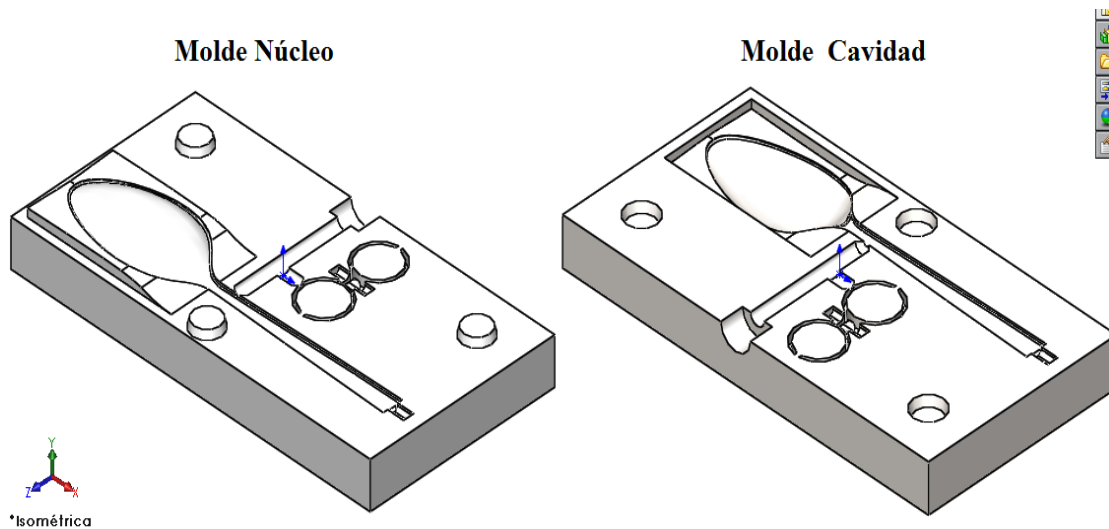


Figura 75. Placas del molde

5.2.6 Maquinado del molde de inyección

Para el proceso correspondiente se utiliza el software especializado en CAM. En éste proceso se seleccionan las herramientas que más se ajusten a las operaciones que se ejecutan y para éste propósito se basa en el fabricante de herramientas de corte Sandvic del cual se utiliza sus manuales y recomendaciones para los diferentes procesos de maquinado.

5.2.6.1 Selección de herramientas para el maquinado

Se toma como referencia el manual de Sandvic “Herramientas rotativas” para en primer lugar seleccionar el tipo de material de la pieza en bruto que se va a maquinar.

En la **Figura 76** se observa la categorización que el fabricante mencionado da a los diferentes tipos de materiales.

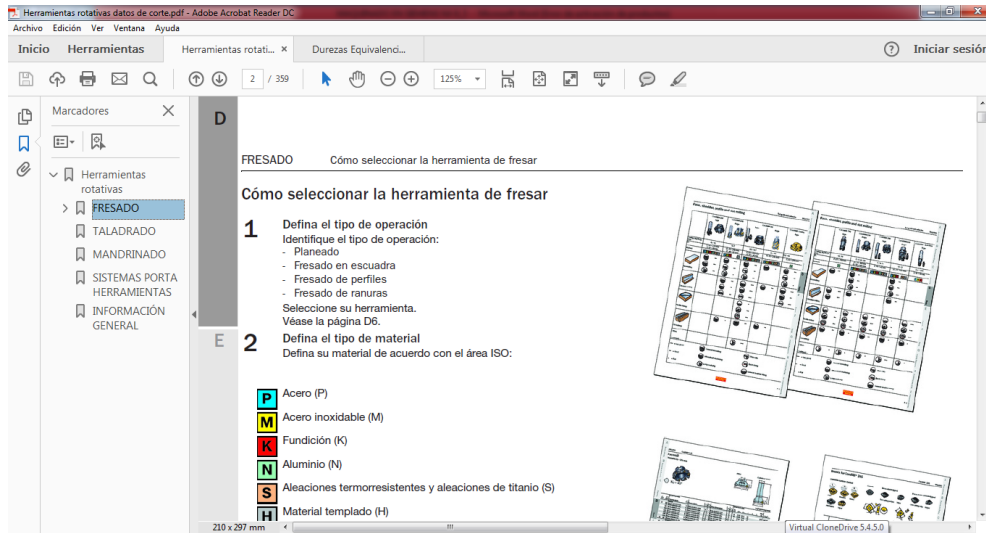


Figura 76. Selección de las herramientas de acuerdo al material al maquinarse

De esta clasificación se elige el material tipo “N” puesto que corresponde a los aluminios, correlacionando de esta manera, con nuestro material pre-seleccionado que es el Aluminio aleado grupo 700. La dureza del aluminio, dado por importador Ivan Bohman que se establece es de 33 HRC.

Luego convertimos la dureza HRC a dureza HB ya que en los manuales de “Sandvic” los datos de corte se corresponden de acuerdo a esta última dureza.

EQUIVALENCIAS ENTRE DUREZAS BRINELL, ROCKWELL, VICKERS Y SHORE Y LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

Brinell Diámetro Huella	Brinell Dureza HB	Rockwell Dureza Ha	Rockwell Dureza HRb	Rockwell Dureza HRC	Vickers Dureza HV	Shore	Resistencia a la tracción Kg/mm ²
2.35	682	64.0	-	65	885	91.0	232.9
2.40	652	83.0	-	63	820	87.2	221.5
2.45	627	81.5	-	61	765	84.8	213.5
2.5	600	80.5	-	59	633	76.5	188.7
2.55	578	79.5	-	59	717	81.5	204.0
2.60	555	79.0	120	57	675	78.5	195.1
2.65	534	78.0	119	54	598	73.5	181.3
2.70	514	77.0	119	52	567	71.0	174.9
2.75	495	76.5	117	51	540	68.5	168.0
2.80	477	75.5	117	49	515	66.7	162.2
2.85	461	74.4	116	48	494	65.0	157.0
2.90	444	73.5	115	46	472	63.0	150.6
2.95	429	73.0	115	45	454	61.0	145.6
3.00	415	72.5	114	44	437	59.0	140.0
3.05	401	71.5	113	42	420	57.2	136.0
3.10	388	71.0	112	41	404	65.8	132.0
3.15	375	70.5	112	40	389	54.0	127.5
3.20	363	70.0	110	39	375	52.2	123.4
3.25	352	69.5	110	38	363	50.5	120.0
3.30	341	68.5	109	36	350	49.2	115.9
3.35	331	68.0	109	35	339	48.0	112.4
3.40	321	67.5	108	34	327	46.7	109.1
3.45	311	67.0	108	33	316	45.2	105.6
3.50	302	66.5	107	32	305	44.5	102.7
3.55	293	66.0	106	31	296	43.2	99.6
3.60	285	65.5	105	30	287	42.0	96.9
3.65	277	65.0	104	29	279	41.0	94.2
3.70	269	64.5	104	28	270	40.0	91.5
3.75	262	64.0	103	27	263	39.2	89.1
3.80	255	63.0	102	25	256	38.5	86.7
3.85	248	62.5	102	24	248	37.5	84.3

Figura 77. Tabla de conversiones de dureza

Para una dureza de 33 HRc, según la tabla de la **Figura 77**, corresponde a una dureza transformada de 311 HB, que aproximando para regirnos a las recomendaciones de Sandvic da como resultado final 300 HB. Continuando con el Manual de Herramientas rotativas de Sandvic se seleccionan las velocidades de avance y paso por diente recomendados.

D

FRESADO Datos de corte

CoroMill® Plura Datos de corte

Recomendaciones de velocidad

CoroMill® Plura

GC1620
GC1630
H10F

ISO	MC	CMC	HB	HRC	$a_p \times a_e > D_c$		$a_p \times a_e > D_c$		$a_e \leq 0.05 \times D_c$		$a_e \leq 0.05 \times D_c \text{ o } D_{c2}$ $a_p \leq 0.05 \times D_c \text{ o } D_{c2}$	
					v_e m/min	v_e pies/min	v_e m/min	v_e pies/min	v_e m/min	v_e pies/min	v_e m/min	v_e pies/min
P	P1.1.Z.AN	01.1	125		155	510	200	660	375	1230	690	2260
	P1.2.Z.AN	01.2	150		135	440	185	610	340	1120	630	2070
	P1.3.Z.AN	01.4	200		120	390	140	460	255	840	470	1540
	P2.5.Z.HT	02.2	250		100	330	130	430	245	800	450	1480
	P2.5.Z.HT	02.2	300		90	300	120	390	220	720	410	1350
P3.0.Z.HT	03.22	400		75	250	95	310	180	590	335	1100	
	03.22	450		65	210	85	280	160	520	300	980	
M	P5.0.Z.AN	05.11	200		60	200	90	300	165	540	300	980
	M1.0.Z.AQ	05.21	200		60	200	75	250	145	480	270	890
	M3.1.Z.AQ	05.51	230		45	150	55	180	110	360	200	660
K		07.1	150		135	440	180	590	330	1080	610	2000

210 x 297 mm

Figura 78. Velocidades de corte recomendadas según dureza del material en bruto

Para una dureza de 300 HB se recomienda una velocidad de 90 m/min.

Recomendaciones de avance

CoroMill® Plura

GC1620
GC1630
H10F

Métrica	Dc o Dc2		f_z		f_z		f_z		f_z	
	mm	pulgadas	mm/diente	pulg./diente	mm/diente	pulg./diente	mm/diente	pulg./diente	mm/diente	pulg./diente
$n = \frac{1000 \times v_c}{\pi \times D_c}$ (rpm) $v_f = n \times f_z \times z_n$ (mm/min) $D_e = 2 \times \sqrt{a_p \times (D_{c2} - a_p)}$ (mm)	0.5	.020	Guía Plura							
	1	.039	0.002	.0001	0.002	.0001	0.013	.0005	0.023	.0009
	2	.079	0.004	.0002	0.003	.0001	0.032	.0013	0.056	.0022
	3	.118	0.006	.0002	0.007	.0003	0.039	.0015	0.07	.0028
	3.175	.125 (1/8")	0.006	.0003	0.008	.0003	0.040	.0016	0.072	.0028
Pulgadas $n = \frac{v_c \times 12}{\pi \times D_e}$ (rpm) $v_f = n \times f_z \times z_n$ (inch/min) $D_e = 2 \times \sqrt{a_p \times (D_{c2} - a_p)}$ (inch)	4	.157	0.008	.0003	0.014	.0006	0.045	.0018	0.08	.0031
	4.76	.188 (3/16")	0.010	.0004	0.019	.0008	0.046	.0018	0.078	.0031
	5	.197	0.011	.0004	0.021	.0008	0.046	.0018	0.078	.0031
	6	.236	0.014	.0006	0.03	.0012	0.055	.0022	0.099	.0039
	6.35	.250 (1/4")	0.015	.0006	0.031	.0012	0.056	.0022	0.102	.0040
Nota: En la fórmula de n los parámetros v_c y D_c se pueden sustituir por v_e y D_{c2} .	8	.315	0.020	.0008	0.033	.0013	0.063	.0025	0.114	.0045
	9.525	.375 (3/8")	0.025	.0010	0.050	.0020	0.069	.0027	0.124	.0049
	10	.394	0.027	.0011	0.055	.0022	0.071	.0028	0.127	.0050
	12	.472	0.036	.0014	0.071	.0028	0.077	.0030	0.139	.0055
	12.7	.500 (1/2")	0.039	.0015	0.074	.0029	0.079	.0031	0.143	.0056
Nota: En la fórmula de n los parámetros v_c y D_c se pueden sustituir por v_e y D_{c2} .	15.875	.625 (5/8")	0.054	.0021	0.089	.0035	0.089	.0035	0.160	.0063
	16	.630	0.055	.0022	0.09	.0035	0.089	.0035	0.161	.0063
	19.05	.750 (3/4")	0.073	.0029	0.105	.0041	0.097	.0038	0.175	.0069
	20	.787	0.078	.0031	0.11	.0043	0.1	.0039	0.18	.0071

210 x 297 mm

Figura 79. Paso por diente recomendados

Luego de establecer los datos principales como la velocidad de corte y el paso por diente, calculamos las revoluciones del husillo de la CNC y las velocidades de avance.

En los siguientes datos calculados se especifica:

$V_c = \text{Velocidad de corte}$

$D_c = \text{Diámetro de la herramienta}$

$f_z = \text{Paso por diente}$

$Z_n = \text{Número de dientes}$

Datos Fresado Herramienta Ø20mm

$V_c = 90 \text{ m/min}$

$D_c = 20 \text{ mm}$

$f_z = 0.078$

$Z_n = 4$

Cálculos herramienta 20mm para fresar la cara superior del molde

$$n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D_c} = \frac{90 * 1000}{\pi * 20} = \frac{90000}{20 \cdot \pi} = 1432.4 \approx 1432 \text{ rpm}$$

$$V_f = n * f_z * Z_n = 1432.4 * 0.078 * 4 = 446.9 \approx 447 \text{ mm/min}$$

Datos Taladrado Herramienta Ø5mm

$V_c = 90 \text{ m/min}$

$D_c = 5 \text{ mm}$

$f_z = 0.011$

$Z_n = 4$

Cálculos herramienta 5 mm para taladrar las guías hembra

$$n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D_c} = \frac{90 * 1000}{\pi * 5} = \frac{90000}{5 \cdot \pi} = 5729.6 \approx 5730 \text{ rpm}$$

$$V_f = n * f_z * Z_n = 5729.6 * 0.011 * 4 = 252.1 \approx 252 \text{ mm/min}$$

Datos Fresado Herramienta Ø2mm

$V_c = 90 \text{ m/min}$

$$D_c = 2 \text{ mm}$$

$$f_z = 0.004$$

$$Z_n = 4$$

Cálculos herramienta 2 mm para fresar las cavidades: cuchara, runners y sprue

$$n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D_c} = \frac{90 * 1000}{\pi * 2} = \frac{90000}{2 * \pi} = 14323.9 \approx 14324 \text{ rpm}$$

$$V_f = n * f_z * Z_n = 14323.9 * 0.004 * 4 = 229.2 \approx 229 \text{ mm/min}$$

Datos Fresado Herramienta Ø1mm

$$V_c = 90 \text{ m/min}$$

$$D_c = 1 \text{ mm}$$

$$f_z = 0.002$$

$$Z_n = 4$$

Cálculos herramienta 1 mm para fresar: cavidades y acople de anillos

$$n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D_c} = \frac{90 * 1000}{\pi * 1} = \frac{90000}{\pi} = 28647.8 \approx 28648 \text{ rpm}$$

$$V_f = n * f_z * Z_n = 28647.8 * 0.002 * 4 = 229.2 \approx 229 \text{ mm/min}$$

Datos Fresado Herramienta Esférica Ø2mm

$$V_c = 90 \text{ m/min}$$

$$D_c = 2 \text{ mm}$$

$$f_z = 0.023$$

$$Z_n = 4$$

Cálculos herramienta 2 mm esférica para acabado final

$$n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D_c} = \frac{90 * 1000}{\pi * 2} = \frac{90000}{2 * \pi} = 14323.9 \approx 14324 \text{ rpm}$$

$$V_f = n * f_z * Z_n = 14323.9 * 0.023 * 4 = 1317.8 \approx 1318 \text{ mm/min}$$

Estos datos calculados son ingresados en el software CAM para el maquinado.

5.2.7 Simulación del maquinado

En primera instancia se ingresan los valores calculados de la velocidad de corte, revoluciones del husillo de la CNC y el paso por diente en el software, para cada diámetro de herramienta según corresponda.

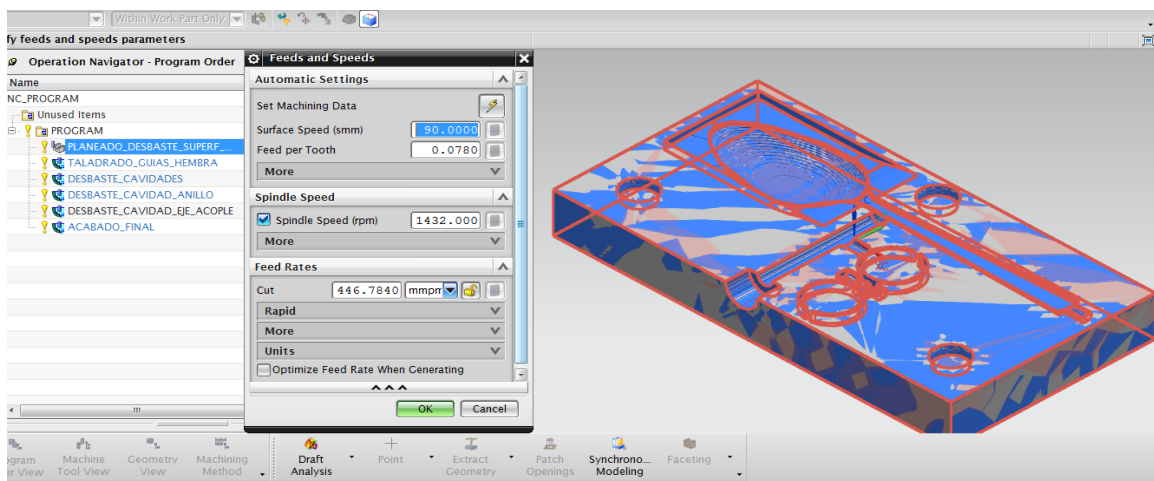


Figura 80. Ingreso de datos de corte al software

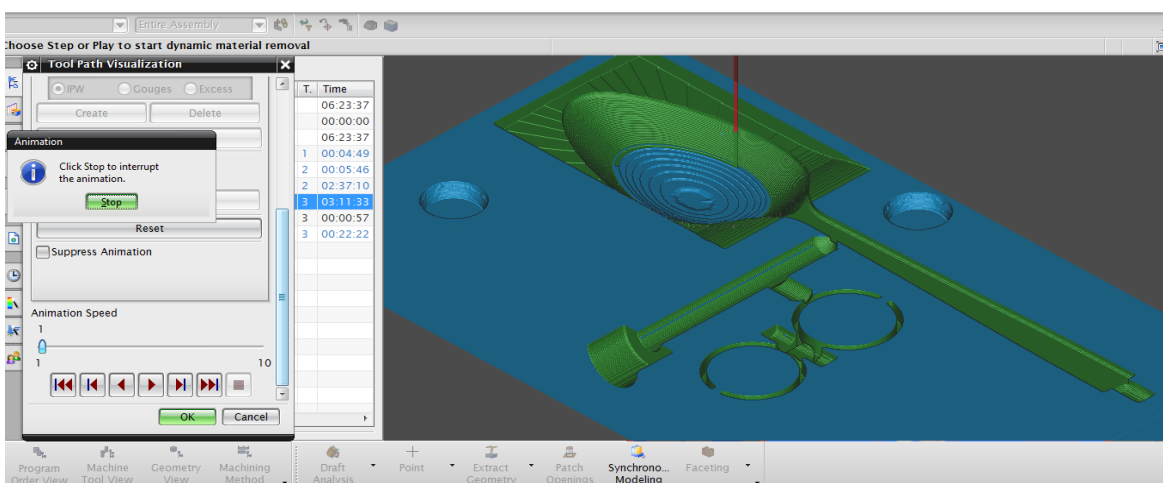


Figura 81. Simulación del proceso de maquinado

Para el proceso de maquinado del molde de núcleos se sigue el mismo procedimiento que para el molde de cavidades, de tal forma que las 2 partes se puedan unir efectivamente para proceder con la inyección del plástico dentro de éstos y conformar el producto final.

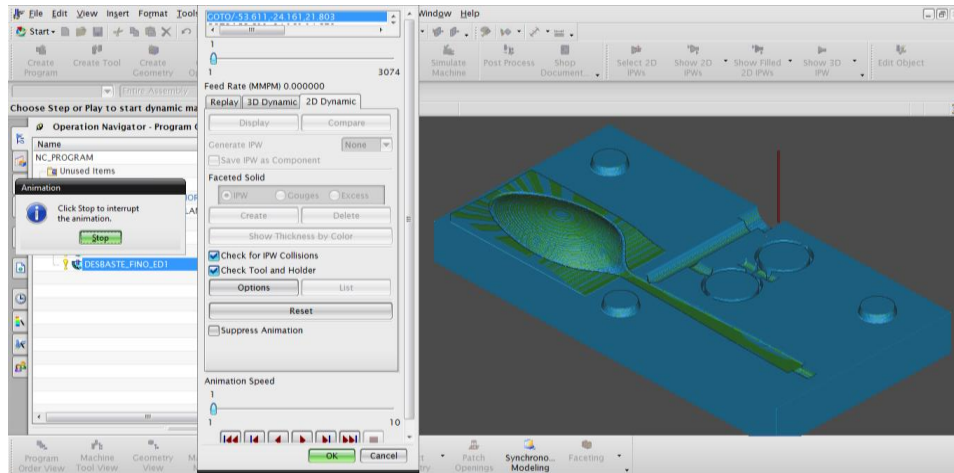


Figura 82. Simulación del proceso de maquinado

5.3 Manufactura del molde

Para manufacturar el molde se utiliza el Centro de Mecanizado FADAL 4020, **Tabla 28**, el mismo que presenta las siguientes especificaciones:

Tabla 28
Especificaciones FADAL 4020

TRM Specifications	TRM Standard	TRM Metric
Table Size	35" x 12"	889mm x 304.8mm
Floor to Table	34.5"	876.3mm
T-Slots (No. x Width x Span)	3 x .562" x 4.375"	3 x 14.3mm x 111mm
Cutting Feed Rate	.01-.200" ipm	25-5080 mm/min
Rapid Feed Rate (X/Y/Z)	200 ipm	5080 mm/min
Max. Weight on Table	500 lbs	226.8 kg
Axis Drive Motor (X/Y/Z)	6C, 2,000 lbs*	
Ball Screw Size	32mm	
Longitudinal (X Axis)	30"	762mm
Cross (Y Axis)	14"	355.6mm
Vertical (Z Axis)	14"	355.6mm
Spindle Nose to Table	4"-18"	101.6mm-457.2mm
Spindle Center to Column Ways	19"	482.6mm
Main Motor HP	5 HP*	
Opt. HT Motor - Automatic 2 Speed Vector	N/A	
Torque	28 ft.-lbs*	38Nm
Accuracy, Axis Positioning	± .0004***	.0102mm
Accuracy, Axis Repeatability	± .0002***	.0050mm
Glass Scales (X/Y/Z)	N/A	
Spindle Speed	4,000 rpm	
Spindle Orientation	N/A	
Spindle Taper	No. 40	
Max. Tool Diameter	4.5"	114.3mm
Max. Tool Length	10"	254mm
Max. Tool Weight	15 lbs.	6.8kg
Machine Width and Depth	88" W x 50" D	2235mm x 1270mm
Machine Maximum Height	92"	2336.8mm
Machine Weight	3,500 lbs.	1587kg
Air Pressure Reqs. (Mementary)	80-120 psi, 15 scfm	
Power Reqs. (3-phase)	22 amps, 220 VAC	
Single Phase (Optional)	45 amps, 220 VAC	

Fuente: (SSI MADE, 2018)

En la **Figura 83**, se muestra el Centro de Mecanizado utilizado en la manufactura:



Figura 83. Centro de Mecanizado FADAL 4020
Fuente: (SSI MADE, 2018)

Utilizando los parámetros calculados en el software CAM, se obtiene el molde manufacturado, mostrados a continuación, los mismos que fueron mecanizados en aluminio y dado un acabado por pulido para eliminar las marcas dejadas por la herramienta de corte con la finalidad de obtener un producto de excelente calidad. Cabe recalcar que se mecanizaron los anillos para acoples en el mismo molde de las cucharas debido a que se buscó optimizar el espacio disponible.



Figura 84. Molde - cavidad mecanizado



Figura 85. Molde – núcleo mecanizado



Figura 86. Molde – cavidad con dimensiones

5.4 Inyección de PLA

Para la inyección del PLA y lograr formar las cucharas, se utiliza la máquina MATEU SOLE española año 90, que observa en la **Figura 87**.



Figura 87. Inyectora MATEU SOLE modelo 90
Fuente: (Mateu Solé, 2018)

Las características de la inyectora ya fueron especificadas en apartados anteriores, al igual que los parámetros de inyección, obteniéndose los resultados, que se muestran en las **Figura 88** y **Figura 89**.



Figura 88. Desmoldeo de la cuchara



Figura 89. Cuchara obtenida por inyección de PLA

CAPÍTULO VI

PRUEBAS Y RESULTADOS

6.1 Pruebas de calibración de la inyectora

Se realizaron los ensayos de calibración en la máquina inyectora por medio de pruebas físicas de operación para obtener los tiempos promedios en las etapas del ciclo de inyección de plástico.

En la **Tabla 29** se observan los datos obtenidos de las pruebas mencionadas.

Tabla 29

Resultados obtenidos de pruebas de inyección

No.	Etapas	Ensayo 1 [s]	Ensayo 2 [s]	Ensayo 3 [s]	Ensayo 4 [s]	Ensayo 5 [s]	Promedio [s]
1	Pre calentamiento del husillo	1350	1350	1350	1350	1350	1350
2	Cierre del émbolo	1,25	1,25	1,50	1,50	1,75	1,45
4	Inyección	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,20
5	Retorno del émbolo	1,25	1,25	1,25	1,25	1,50	1,30
6	Enfriamiento	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	40,00
7	Apertura del cilindro	2,50	2,70	2,90	3,10	3,30	2,90
8	Extracción de la pieza	1,75	1,75	1,75	2,00	2,00	1,85

6.2 Ensayos de inyección de PLA

En este apartado se realizan las pruebas físicas de operación de la máquina inyectora variando o ajustando ciertos parámetros del proceso de inyección como la temperatura del husillo, presión de cierre y tiempo de inyección.

En la **Tabla 30** se registra los cambios mencionados:

Tabla 30

Variación de parámetros de inyección

No.	Temperatura del husillo [°C]	Presión de cierre [Ton]	Tiempo de inyección [s]	Observaciones
1	170	1,3	2	No se alcanza un completo llenado en la cabeza de la cuchara, además se producen marcas de hundimiento en el eje de acople, ondulaciones en el mango y excesiva rebaba
2	180	1,3	2	Sigue sin alcanzar un llenado completo de las cavidades, así como marcas de hundimiento en el eje de acople, excesiva rebaba aunque las ondulaciones en el mango disminuyeron
3	190	1,4	2,1	Se alcanza a llenar por completo las cavidades pero sigue habiendo ondulaciones en el mango, marcas de hundimiento en el eje de acople y excesiva rebaba
4	195	1,5	2,2	Llenado completo de las cavidades, marcas de hundimiento en el eje de acople, excesiva rebaba pero las ondulaciones en el mango han disminuido notablemente
5	200	1,6	2,3	Llenado completo de las cavidades, poca rebaba, pocas ondulaciones en el mango, y apenas se visualiza marcas de hundimiento en el eje de acople
6	205	1,7	2,4	Llenado completo de las cavidades, una pequeña visualización del hundimiento en el eje de acople, y las rebabas han disminuido considerablemente



Figura 90. Prueba #1



Figura 91. Prueba #2



Figura 92. Prueba #3

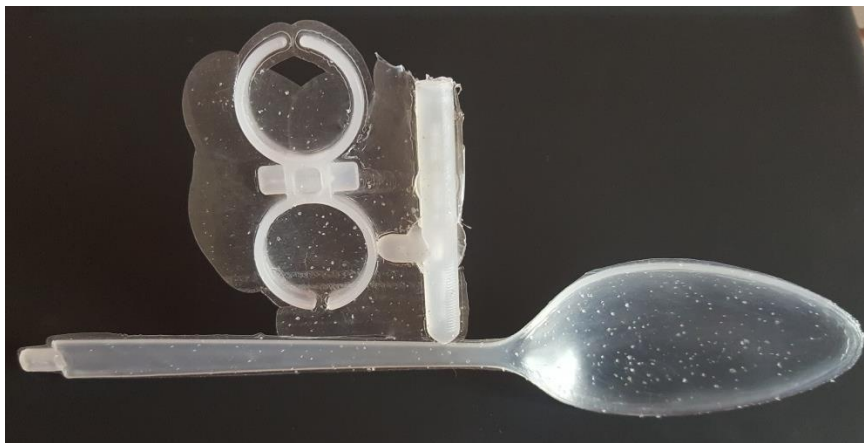


Figura 93. Prueba #4

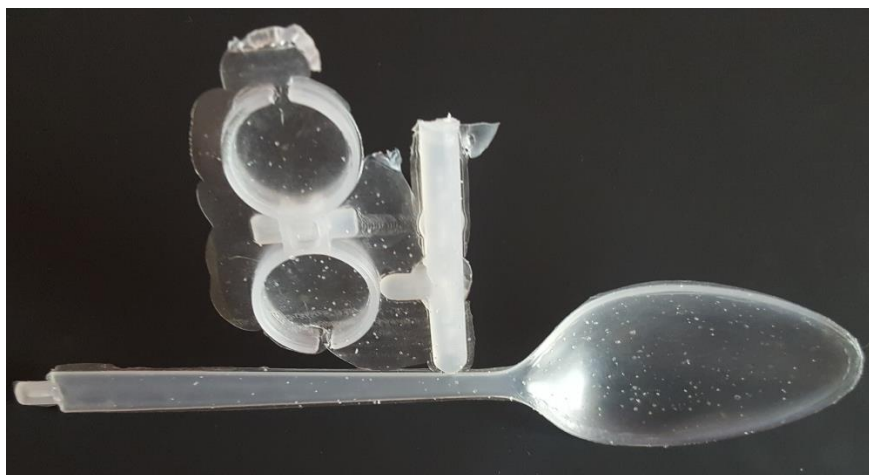


Figura 94. Prueba #5



Figura 95. Prueba #6

6.3 Análisis de resultados

Se ha logrado obtener un tipo de cuchara con acoples de anillos para personas con artritis en las manos, la misma que fue elaborada con PLA y utilizando moldeo por inyección. En contraposición a los proyectos antecesores, los únicos manufacturados hasta la fecha son mediante impresión 3D o con adaptaciones de partes metálicas, lo que hace del presente proyecto novedoso, sobre todo por la utilización de un polímero biodegradable.

Mediante análisis por FEM, se determina las siguientes propiedades mecánicas de la cuchara para una carga de 0,38 N:

Tabla 31

Resultados de propiedades mecánicas de la cuchara

Propiedad Mecánica	Valor
Esfuerzo permisible (Teoría Von Mises)	6,950 MPa
Desplazamiento máximo	1,080 mm
Deformación unitaria	0,002841%
Factor de seguridad	2,8
Masa optimizada	1,00964 gr

De acuerdo a los valores descritos en la **Tabla 31**, la cuchara no tiende a fracturarse debido a que el esfuerzo permisible Von Mises de 6,950 MPa es mucho menor al límite de fluencia del PLA que es 60 MPa. El desplazamiento máximo de la cuchara es 1,080 mm desde su punto de equilibrio horizontal, generando 0,002841 de deformación unitaria.

Con la utilización del paquete computacional de optimización topológica, se obtiene una reducción de 1,00964 gramos de masa de su diseño original, que equivale al 11,37%.

En los ensayos de inyección se puede evidenciar que los parámetros arrojados por la simulación en el software son aplicables, pues éstos se utilizan como punto de partida para la fabricación del molde en cuanto a la temperatura del husillo, presión de cierre del molde y tiempo de inyección para verificar si el producto mejora o disminuye su calidad de acabado final.

De los resultados obtenidos en la **Tabla 29** y **Tabla 30**, los valores óptimos para el moldeo por inyección de PLA corresponden a precalentamiento del husillo a 1350 segundos; tiempo de inyección 2,40 segundos; enfriamiento a 40 segundos; temperatura del husillo 205°C y presión de cierre 1,7 toneladas. Con una temperatura de 10°C por debajo de la recomendada por el fabricante del polímero PLA usado, ya se pudo llenar las cavidades del molde sin problema alguno.

La temperatura de fusión del material (205°C), conjuntamente con el tiempo de llenado (2,40 segundos) juegan un papel importante a la hora de inyectar el plástico, pues el mayor

inconveniente se presenta en el eje donde se instala el acople para los dedos (previsto por la simulación por software), el cual es solventado estableciendo los parámetros arrojados por el programa de apoyo mencionado. Un punto importante que se puede señalar es que las rebabas disminuyen mientras se aplique más fuerza de cierre al molde lo que representa un desperdicio reducido o material desechado.

Utilizando el software de biomecánica se obtienen datos numéricos referentes al desplazamiento bidimensional de la mano que manipula los alimentos, con esto se consigue comparar las ventajas de la utilización de una cuchara tradicional con respecto a la cuchara modificada y moldeada en PLA. Los datos se presentan en la **Tabla 32**.

Tabla 32

Datos de desplazamiento según Tracker

TIEMPO	DESPLAZAMIENTO CUCHARA TRADICIONAL		DESPLAZAMIENTO CUCHARA PLA MODIFICADA	
	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
t (seg)				
0,97	108,68	713,38	122,61	640,93
1,00	111,47	730,10	119,83	668,80
1,03	108,68	741,25	114,25	699,45
1,07	108,68	746,82	114,25	724,53
1,10	97,53	760,75	108,68	749,61
1,13	103,11	766,33	108,68	766,33
1,17	105,89	771,90	105,89	783,05
1,20	105,89	777,47	103,11	799,77
1,23	103,11	780,26	105,89	810,91
1,27	100,32	783,05	105,89	819,27
1,30	103,11	785,83	105,89	822,06
1,33	100,32	794,19	105,89	827,63
1,37	100,32	791,41	105,89	833,21
1,40	100,32	788,62	105,89	835,99
PROMEDIO	104,10	766,53	109,48	770,11

De la tabla anterior se deduce, el tiempo que tarda la persona en llevarse los alimentos a la boca es de 1,40 segundos, en ambos experimentos; logrando tener mejor desplazamiento con la cuchara que tiene los acoples, 109,48 mm en el eje x e 770,11 mm en el eje y, esto debido a que el prototipo mejora el agarre y portabilidad.

Lo que se evidencia en las *Figura 96* y *Figura 97*, es el comportamiento de la mano de la persona con dos utensilios diferentes, lo que confirma que con el prototipo fabricado mejora notablemente el desplazamiento bidimensional.

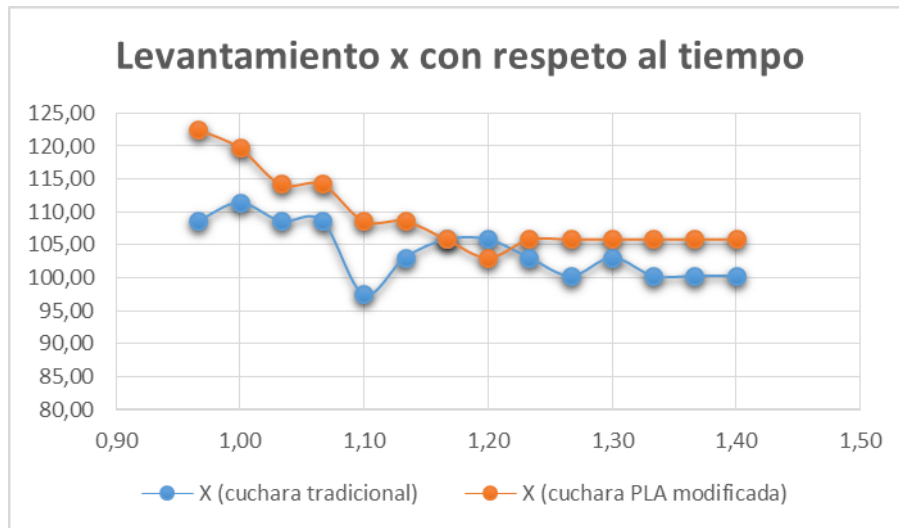


Figura 96. Gráfica de levantamiento x – t

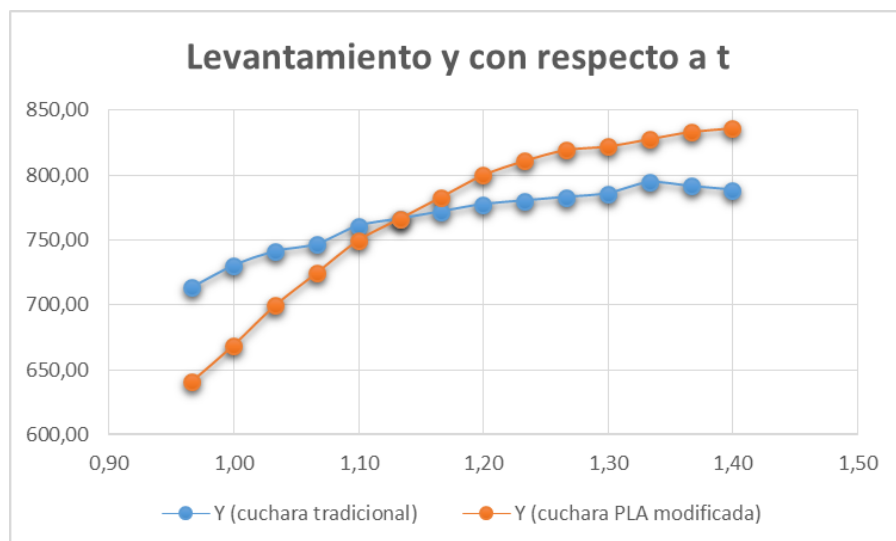


Figura 97. Gráfica de levantamiento y - t

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- Se obtuvo un tipo de cuchara funcional mediante moldeo por inyección, debido a que se consideró las necesidades de las personas con artritis, especialmente que no fomente deformaciones, y estos datos sirvieron para obtener un diseño optimizado, aproximadamente 11.37%, siendo única en su tipo ya que existen estos utensilios pero solo impresos en 3d.
- Al realizar las simulaciones dinámicas del proceso de inyección, variando esencialmente los parámetros de temperatura, tiempo y ubicación de los puntos de inyección, se pudo diseñar la forma más idónea del molde para mejorar la fabricación de la cuchara.
- En función al índice de desempeño (rigidez) y costo, la utilización del PLA como polímero principal para la inyección por moldeo permite obtener un producto amigable con el ambiente, pues al ser biodegradable, tiene una vida máxima de 2 años antes de degradarse completamente.
- Los parámetros de inyección utilizados en la máquina MATEU SOLE tienen bastante semejanza con los obtenidos en el software y calculados mediante ecuaciones, por lo que, el análisis computacional sirve como punto de partida.

7.2 Recomendaciones

- Ingresar los parámetros de inyección del plástico conforme a los datos proporcionados por el fabricante, puesto que esto ayudará a simular y corregir fallos del proceso de inyección, previo a la fabricación del molde.

- Analizar las simulaciones de carga estática a las que estará sometida la pieza con respecto a datos experimentales extraídos de forma previa.
- Considerar la optimización topológica como una herramienta fundamental en el diseño, debido a que permite obtener productos con la cantidad justa de material.
- Los dispositivos mostrados en el proyecto tiene un alcance mayor a las personas con AR, pues, pueden ser aplicados como ayuda geriátrica para la tercera edad.
- En el caso del molde de inyección, puede utilizarse acero en sustitución del aluminio para lotes de producción comercial.

7.3 Bibliografía

- Baeza, R. (2015). Diseño y fabricación de un molde de inyección para envases de uso alimentario. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Balaji, A. B., Pakalapati, H., Khalid, M., Walvekar, R., & Siddiqui, H. (2018). Natural and synthetic biocompatible and biodegradable polymers. *Elsevier Ltd. All rights reserved*, 30.
- Beltrán, M., & Marcilla, A. (S/A). *Tecnología de los polímeros*.
- Bryce, D. M. (1996). *Plastic injection molding: manufacturing process fundamentals*. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers.
- Caballero. (S/A).
- Calvo, A. (2013). Análisis y Simulación Numérica del Proceso de Biodegradación por Hidrólisis de Biopolímeros en aplicaciones Biomédicas. *Universidad de Sevilla*.
- Cleveland Clinic. (2 de Febrero de 2018). *The Cleveland Clinic*. Obtenido de The Cleveland Clinic: <http://www.clevelandclinic.org/health/shic/html/s7082.asp>
- CREATEC 3D. (02 de Marzo de 2018). *CREATEC 3D*. Obtenido de CREATEC 3D: <https://createc3d.com/utensilios-impresos-en-3d-para-ayudar-a-personas-con-artritis/>
- Cubillos, N., & Medina, O. (2010). Estudio piloto de las medidas antropométricas de la mano y fuerzas de presión, aplicables al diseño de fuerzas manuales. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile.
- DISCUBRE. (18 de agosto de 2018). *DISCUBRE*. Obtenido de DISCUBRE: <https://www.discubre.es/es/blog/2017/03/06/cubiertos-adaptados-enfermedades-neuromusculares/>
- Duhamel, H. (03 de Agosto de 2016). *COLIBRÍ 3D*. Obtenido de COLIBRÍ 3D: <http://www.colibri3d.mx/es/blog/ventajas-del-filamento-pla-para-impresi%C3%B3n-3d>
- Enríquez, A., & Lincango, G. (2015). Diseño y construcción de una máquina para inyección de plástico, con capacidad de fabricación de hasta 15kg de peso para el Laboratorio de Procesos de Manufactura del DECEM. *Diseño y construcción de una máquina para inyección de plástico, con capacidad de fabricación de hasta 15kg de peso para el Laboratorio de Procesos de Manufactura del DECEM*. Sangolquí, Pichincha, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- FADAL. (2018). FADAL MAINTENANCE FADAL. Estados Unidos.
- FOOD SAFETY INNOVATION. (Agosto de 2012). *EL USO DE UTENSILIOS Y MATERIALES DE PLÁSTICO EN LA INDUSTRIA ALIMENTICIA*. Obtenido de EL USO DE UTENSILIOS Y MATERIALES DE PLÁSTICO EN LA INDUSTRIA ALIMENTICIA:

<http://www.ideafoodsafetyinnovation.com/newsletters/2012/08/el-uso-de-utensilios-y-materiales-de-plastico-en-la-industria-alimenticia/>

- Godavitarne, C., Robertson, A., Peters, J., & Rogers, B. (2017). Biodegradable materials. *PRINCIPLES OF ORTHOPAEDICS*, 1-5.
- Granta Design. (2013). CES EduPack. *Material's selection*. Cambridge, Reino Unido: Granta Desing.
- Guerrero, H., J., D., S., G., P., P., N., R., V., S., & C., V. (2011). *NUEVOS MATERIALES: Aplicaciones Industriales*. Quito: impreffp.
- Hinzpeter, D. (2014). Artrosis en la mano. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 738-749.
- Inforeciclaje. (01 de Marzo de 2018). <http://www.inforeciclaje.com>. Obtenido de <http://www.inforeciclaje.com>: <http://www.inforeciclaje.com/reciclaje-plastico.php>
- Internacional de Creative Commons. (5 de Febrero de 2018). *Les CIÈNCIES en BLOC de Reconeixement*. Obtenido de Les CIÈNCIES en BLOC de Reconeixement: <http://blocs.xtec.cat/cienciasesperimentals/2015/10/15/els-materials-de-cuina-mes-toxics/>
- IVÁN BOHMAN. (22 de Mayo de 2008). *IVÁN BOHMAN C.A*. Obtenido de IVÁN BOHMAN C.A.: www.ivanbohman.com.ec/wp-content/uploads/2016/01/catalogo-general-IBCA.pdf
- JICA. (10 de Abril de 2018). *Japan Internacional Cooperation Agency Library*. Obtenido de open_jicareport.jica.go.jp/pdf/12181988_03.pdf
- Leyva, M. N. (2012). *Tecnología del Plástico*. Obtenido de Tecnología del Plástico : <http://www.plastico.com/temas/Ante-todo,-los-bioplasticos-son-plasticos+3089028>
- M. Pilar Lisbona, J. M. (2007). Resonancia magnética de la mano en la artritis reumatoide. Revisión de la metodología y la utilidad en el diagnóstico, el seguimiento y el pronóstico. *Resonancia magnética de la mano en la artritis reumatoide. Revisión de la metodología y la utilidad en el diagnóstico, el seguimiento y el pronóstico*. Barcelona, Barcelona, España: Hospitales del Mar y de la Esperanza. Institut Municipal d'Assistència Sanitària (IMAS). Universidad Autónoma de Barcelona.
- M3D. (17 de Noviembre de 2015). Fundamentos de la impresión 3D. *Fundamentos de la impresión 3D*. Bogotá, Colombia: Fundación Materialización 3D.
- Mateu Solé. (2 de Agosto de 2018). *Mateu Solé*. Obtenido de <http://mateusole.servidordeproves.net/>
- Mercola, J. (14 de Abril de 2019). *MERCOLA*. Obtenido de <https://articulos.mercola.com/sitios/articulos/archivo/2015/04/08/uso-de-plasticos.aspx>
- Mondelo, P. (1994). *Ergonomía I. Fundamentos*. Barcelona: Mutua Universal.

- Montull Morer, S., Salvat Salvat, I., Inglés Novell, M., & Miralles Rull, I. (2004). La mano reumatológica: exploración y tratamiento. *Universidad Rovira y Virgili (Tarragona)*.
- Nature Works. (25 de Mayo de 2018). *Ingeo Biopolymer*. Obtenido de Ingeo Biopolymer: https://www.natureworkslc.com/~/.media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_3001D_injection-molding_pdf.pdf
- Pheasant, S. (2003). *Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work*. London: Taylor & Francis.
- PLASTICRAFT. (25 de MAYO de 2018). SALVIA. Obtenido de SALVIA: www.salvia.com.ar/salvia_letter102.pdf
- Platt, D. (2006). Biodegradable Polymers Market Report. *Reino Unido: Smithers Rapra*.
- PROSPECTOR. (25 de Mayo de 2018). *PROSPECTOR*. Obtenido de PROSPECTOR: <https://plastics.ulprospector.com/es/generics/34/c/t/acido-polilactico-pla-properties-processing>
- Reed, & Gilding. (1981).
- Rockville , P. (2017). *U.S. National Library of Medicine*. Bethesda, EEUU.
- Rojas, A., & Osswald, T. (2015). Determination of Polymers Thermal Degradation. *Revista Ingeniería*, 1-12.
- SolidWorks. (2016).
- SSI MADE. (26 de MAYO de 2018). *SSI MADE*. Obtenido de SSI MADE: www.ssi-made.com/wp-content/.../06/FADAL-Specifications
- stratasys. (16 de Febrero de 2018). *stratasys*. Obtenido de stratasys: <http://www.stratasys.com/mx/impresoras-3d/technologies>
- TECNOVA. (2018). Parámetros de inyección . Bogotá, Colombia.
- Ulrich, K., & Eppinger, S. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. México: McGraw Hill.
- Ultimaker. (16 de Mayo de 2017). *Ficha de datos técnicos PLA*. Obtenido de <https://ultimaker.com/download/67583/TDS%20PLA%20v3.011-spa-ES.pdf>
- UniOvi. (07 de Febrero de 2018). *Universidad de Oviedo*. Obtenido de www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion11.MOLDEO.POR.INYECCION.pdf
- Universidad Autónoma de Occidente. (17 de Agosto de 2014). *Propuesta para mejorar el la funcionalidad de la mano de una persona que sufre de artritis*. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente. Obtenido de

<https://biomechanicaldesign.wordpress.com/2014/08/17/propuesta-para-mejorar-el-la-funcionalidad-de-la-mano-de-una-persona-que-sufre-de-artritis-5/>

Universidad Autónoma de Occidente. (17 de Agosto de 2014). *biomechanicaldesign*. Obtenido de biomechanicaldesign: <https://biomechanicaldesign.wordpress.com/2014/08/17/propuesta-para-mejorar-el-la-funcionalidad-de-la-mano-de-una-persona-que-sufre-de-artritis-5/>

Valencia, Universidad de. (2016). Aplicaciones del PLA. En E. d. Industriales, *Aplicaciones del PLA*. Valencia, España.

Van de Velde, K. (2002). *Polymer Testing*.

Yunis, A. (2005). Anthropometric characteristics of the hand based on laterality and sex among Jordanian. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 747-754.