

ANÁLISIS FUNCIONAL DEL MECANISMO TIPO RÓTULA

JUAN PABLO ZAPATA CARMONA

DAVID GUTIÉRREZ GARCÍA

ASESORES:

MG. DAVID TORREBLANCA DÍAZ

PHD. ANDRÉS VALENCIA ESCOBAR

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ARQUITECTURA Y DISEÑO

DISEÑO INDUSTRIAL

INVESTIGACIÓN EN MORFOLOGÍA EXPERIMENTAL

MEDELLÍN

2017

Juan Pablo Zapata Carmona y David Gutiérrez García

“Declaramos que esta tesis (o trabajo de grado) no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad” Art 82 Régimen Discente de Formación Avanzada.

Firma



Juan Zapata Carmona



David Gutiérrez

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se ha llevado a cabo con entereza, responsabilidad y mucha dedicación gracias no solo a nuestro deseo de realizarlo de la mejor manera posible, sino también a varias personas que han aportado material, asistencial y racionalmente. Horizontalmente agradecemos a nuestros asesores David Torreblanca y Andrés Valencia por la constante e incondicional asistencia que nos otorgan en cada una de las sesiones. También es pertinente agradecer a Andrea Valenza que nos abrió las puertas para desarrollar el proyecto en su empresa Siltech y permitirnos hacer uso de sus máquinas de impresión 3D y, también, de brindarnos asesorías en cuestiones productivas y de desarrollo de los prototipos.

CONTENIDO

1. PLANTEAMIENTO
 - 1.1. TEMA GENERAL DEL PROYECTO
 - 1.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TEMA DEL PROYECTO
 - 1.3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN IDENTIFICADO
 - 1.4. ELEMENTOS DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN
2. JUSTIFICACIÓN
 - 2.1. VALIDEZ DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN EN EL CONTEXTO CIENTÍFICO DEL DISEÑO INDUSTRIAL.
 - 2.2. OPORTUNIDADES QUE REPRESENTA EL PROYECTO PARA EL DESARROLLO DE NUEVOS PRODUCTOS.
3. OBJETIVOS
 - 3.1. OBJETIVO GENERAL
 - 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS
4. MARCO DE REFERENCIA
 - 4.1. ANTECEDENTES
 - 4.2. ESTADO DEL ARTE
 - 4.3. CONCEPTUALIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL PROBLEMA – MARCO TEÓRICO
5. METODOLOGÍA
 - 5.1. TRABAJO DE CAMPO
 - 5.1.1. Actividades para la obtención de la información
 - 5.1.2. Técnicas utilizadas para la obtención y recolección de información
 - 5.2. MUESTRA
 - 5.2.1. Individuos, objetos y/o situaciones estudiados
 - 5.2.2. Descripción de los objetos de estudio
 - 5.2.3. Justificación de la muestra seleccionada
 - 5.3. REGISTRO
 - 5.3.1. Instrumentos de registro de información
 - 5.3.2. Manejo de los instrumentos
 - 5.4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- 6.1. RESULTADOS
- 6.2. DISCUSIÓN
- 7. CONCLUSIONES
 - 7.1. HALLAZGOS MÁS IMPORTANTES DE LA INVESTIGACIÓN
 - 7.2. DEFINICIÓN DE OPORTUNIDADES DE DISEÑO A PARTIR DE LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS PLANTEADOS
- 8. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE DATOS
- 9. ANEXOS
 - 9.1. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN Y REGISTRO DE INFORMACIÓN.
 - 9.2. INSTRUMENTOS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN
 - 9.3. FOTOGRAFÍAS Y VIDEOS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mallado interno circular. recuperado de: Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi- rígido impresos en 3d con cinco mallados internos diferentes. Vinicio Molina J.

Figura 2: Mallado interno rectangular. recuperado de: Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi- rígido impresos en 3d con cinco mallados internos diferentes. Vinicio Molina J.

Figura 3: Mallado interno poligonal. recuperado de: Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi- rígido impresos en 3d con cinco mallados internos diferentes. Vinicio Molina J.

Figura 4: Mallado interno diagonal. recuperado de: Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi- rígido impresos en 3d con cinco mallados internos diferentes. Vinicio Molina J.

Figura 5 . Vestido impreso en 3d. Ejemplo de mecanismos integrales hechos con tecnologías 3d. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=wdRswasftfI>

Figura 6. Mecanismos dinámicos impresos en FDM. Rescatada de: <http://www.selfassemblylab.net/4DPrinting.php>

Figura 7. Mecanismos dinámicos impresos en FDM. Rescatada de: <http://www.selfassemblylab.net/4DPrinting.php>

Figura 8. Mecanismos dinámicos impresos en FDM. Rescatada de: <http://www.selfassemblylab.net/4DPrinting.php>

Figura 9. Movimiento en un eje Recuperado de : http://coast.pink/articulacion-mecanica_3725736.html

Figura 10 .Articulación Esférica o rótula recuperado de: http://coast.pink/articulacion-mecanica_3725736.html

Figura 11 .Articulación bisagra recuperado de: http://coast.pink/articulacion-mecanica_3725736.html

Figura 12. Proceso de impresión con FDM. Rescatado de:
<http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>

Figura 13: Máquina Zortrax M200, elegida para impresión de la muestra. Recuperado de://store.zortrax.com/M200

Figura 14: Resolución del mallado de la impresora en la máxima configuración (400 micrones)

Figura 15: Tipos de configuración de mallado. Cuadriculada y triangular

Figura 16: Esquema con las partes del mecanismo tipo rótula.

Figura 17: Pistilo de la rótula.

Figura 18: Cobertura del acople.

Figura 19: Sólido del acople.

Figura 20: Fragmento de la matriz de objetivos y actividades, primer objetivo específico.

Figura 21: Matriz de variación de las rótulas de 25 mm de diámetro del sólido de acople

Figura 22: Matriz de variación de las rótulas de 21 mm de diámetro del sólido de acople

Figura 23: Matriz de variación de las rótulas de 17 mm de diámetro del sólido de acople

Figura 24: Análisis de elementos finitos, rótula 25 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 70% en la cobertura del acople.

Figura 25: Análisis de elementos finitos, rótula 25 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 66% en la cobertura del acople.

Figura 26: Análisis de elementos finitos, rótula 25 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 60% en la cobertura del acople.

Figura 27: Análisis de elementos finitos, rótula 21 mm de diámetro en el sólido de acople,

con un 70% en la cobertura del acople.

Figura 28: Análisis de elementos finitos, rótula 21 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 66% en la cobertura del acople.

Figura 29: Análisis de elementos finitos, rótula 21 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 60% en la cobertura del acople.

Figura 30: Análisis de elementos finitos, rótula 17 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 70% en la cobertura del acople.

Figura 31: Análisis de elementos finitos, rótula 17 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 66% en la cobertura del acople.

Figura 32: Análisis de elementos finitos, rótula 17 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 60% en la cobertura del acople.

Figura 33: Fragmento de la matriz de objetivos y actividades, segundo objetivo específico.

Figura 34: Fragmento de la matriz de objetivos y actividades, tercer objetivo específico.

Figura 35: Rótula de 30 mm de diámetro en el sólido de acople y 15 mm de diámetro de pistilo.

Figura 36: Prueba preliminar, fallo en el vértice (concentrador de esfuerzos)

Figura 37: Prueba preliminar, colapso de la pieza debido a la fuerza ejercida por la mordaza

Figura 38: Fragmento de la matriz de objetivos y actividades, cuarto objetivo específico

Figura 39: Análisis de ángulos de libertad de las rótulas de 25 mm de diámetro

Figura 40: Análisis de ángulos de libertad de las rótulas de 21 mm de diámetro

Figura 41: Análisis de ángulos de libertad de las rótulas de 17 mm de diámetro

Figura 42: Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 25 mm con 70% de cobertura.

Figura 43: Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 25 mm con 66 % de cobertura.

Figura 44: Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 25 mm con 66 % de cobertura.

Figura 45: Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 21 mm con 70 % de cobertura.

Figura 46: Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 21 mm con 66 % de cobertura.

Figura 47: Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 21 mm con 60 % de cobertura.

Figura 48: Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 17 mm con 70 % de cobertura.

Figura 49: Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 17 mm con 66 % de cobertura.

Figura 50: Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 17 mm con 60 % de cobertura.

Figura 51: Fragmento de la matriz de objetivos y actividades, objetivo final.

Figura 52: Fragmento de la matriz comparativa

Figura 53: Muestras de las rótulas con diámetro del sólido de 25 mm

Figura 54: Muestras de las rótulas con diámetro del sólido de 21 mm

Figura 55: Muestras de las rótulas con diámetro del sólido de 17 mm

Figura 56: Fragmento de la matriz indicativa de desfase.

Figura 57: Matriz de registro de ángulos de libertad.

Figura 58: Fragmento de matriz de registro de análisis de elementos finitos

Figura 59: Fragmento de matriz de registro de resultados de la prueba de tracción

Figura 60: Fragmento de matriz comparativa

Figura 61: Ángulo de libertad analizado en el programa Rhinoceros, rótula de 25 mm con 70% de cobertura.

Figura 62: Fragmento de la matriz de ángulos de libertad con información consignada, rótula de 25 mm coberturas de 70%, 66% y 60%

Figura 63: Análisis de elementos finitos, rótula 25 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 70% en la cobertura del acople.

Figura 64: Fragmento de la matriz de análisis de elementos finitos con información consignada, rótula de 25 mm coberturas de 70%, 66% y 60%

Figura 65: Fragmento de la matriz de resultados de la prueba de tracción con información consignada, rótula de 25 mm coberturas de 70%, 66% y 60%

Figura 66: Fragmento de la matriz comparativa, rótula de 25 mm coberturas de 70%, 66% y 60%

Figura 67: Rótula (Encerrada en el cuadro verde) que guarda una mejor relación fuerza resistencia- ángulo de libertad

GLOSARIO

Pistilo: Parte del mecanismo de rótula que soporta el sólido y la cobertura de acople.

Cobertura de acople: Parte “hembra” de la rótula la cual recibe y se ensambla con el sólido de acople.

Sólido de acople: Parte “macho” del mecanismo de la rótula que encaja en la cobertura de acople.

Concentrador de esfuerzos: Vértices donde los esfuerzos son concentrados y posiblemente induzcan a la falla del mecanismo.

Rótula: Sistema dinámico de ensamblaje que permite su propia rotación en los 3 ejes

Software CAD (*Computer Aided Design*): Un software CAD (Diseño asistido por computador) es el que permite realizar modelación 3D por medio de un computador con el fin de hacer análisis de diseño, no solo formales sino también estructurales, mecánicos, etc.

Tecnología de Fabricación Digital (TFD): Las tecnologías de fabricación digital son aquellas que permiten realizar modelos, productos o prototipos reales por medio de maquinaria que toma la información de fabricación de un archivo digital.

Tecnología de Fabricación Digital aditiva: Son las tecnologías de fabricación digital que permiten la fabricación de productos, modelos o prototipos reales por medio de la deposición del material usado en cada caso, conformándolo poco a poco y normalmente por capas.

Tecnologías de fabricación digital sustractivas: Son las tecnologías de fabricación digital que permiten la fabricación de productos, modelos o prototipos reales por medio de la sustracción de material de un bloque de madera, polímero, cerámica, entre otros.

FDM: Por sus siglas en inglés, *Fused Deposition Modeling*, es una tecnología de fabricación digital aditiva que genera prototipos y modelos a partir de la deposición de un filamento fundido.

Mallado: Se trata de la configuración estructural interna de un elemento impreso con tecnologías de impresión 3d, será profundizado en el punto 4.1

Anisotropía: Se refiere a la variación de resultados en el análisis de las cualidades de un elemento que es examinado en diversas direcciones.

Isotropía: Es la característica de algunos materiales cuyas propiedades físicas no dependen de la dirección en que son examinadas

Mecanismos integrales: Son los mecanismos que desde su fabricación son completamente funcionales, tienen la posibilidad de ensamblarse en el mismo proceso de fabricación (No es necesario un post-ensamblaje), permiten el movimiento y cumplen la función para la cual fueron pensados.

RESUMEN

En la presente monografía se dará a conocer un proyecto de investigación de morfología experimental, que gira en torno a la fabricación de mecanismos tipo rótula, aprovechando las tecnologías de fabricación digital, las cuales aparece específicamente la tecnología de fabricación aditiva FDM (*Fused Deposition Modeling*). Éste proyecto surge a partir de la posibilidad que existe hoy en día de potencializar el uso de las tecnologías de fabricación digital, específicamente aditiva, que poco a poco van obteniendo aceptación en el mercado. Las oportunidades de diseño que se generan a partir de estas tecnologías son incontables, y el diseñador industrial debe ponerlas siempre a su favor para poder evolucionar y estar a la vanguardia de las necesidades, posibilidades y exigencias del mercado.

Es así pues que nuestro proyecto se plantea la tarea de aprovechar el recurso de las tecnologías de fabricación digital y analizar un mecanismo, en este caso tipo rótula, para potencializar su uso. Esto por medio de varias fases, que van desde el diseño de los prototipos, la fabricación, el análisis, pruebas de eficiencia y recopilación de resultados.

En nuestro proyecto fue importante referenciarlos con proyectos que ya habían investigado acerca de la fabricación digital, las desventajas y ventajas, las posibilidades que ofrecen estas tecnologías y los factores a tener en cuenta para producir los prototipos sobre los cuales se realizó la etapa experimental; el objetivo de esta etapa era comprobar o refutar las hipótesis iniciales que surgieron a partir del objetivo de la investigación. En nuestro proyecto se planteó el siguiente objetivo: escoger la relación de tamaño y escala que optimiza el funcionamiento del mecanismo tipo rótula.

Anterior a la etapa experimental y basados en la información recopilada en el marco teórico, se definieron las escalas con las cuales se trabajó, el tipo de mallado interno de las piezas, la dirección en la cual se aplicó la carga en el proceso experimental (teniendo en cuenta el concepto de anisotropía) y el material con el cual se fabricaron los prototipos.

La etapa de experimentación se puede resumir en:

- Modelación de los prototipos: La cual se realizó en el programa de modelación 3D *Rhinoceros*, que nos permitió modificar las partes de la rótula de manera independiente.
- Análisis de elementos finitos: esta etapa nos permitió analizar el comportamiento, previo a la producción, de los prototipos al aplicar una carga.
- Análisis de ángulo de libertad: esta etapa nos permitió analizar el ángulo de movimiento que el prototipo permite según la variación de la escala y el porcentaje de cobertura..
- Producción
- Prueba de tracción: en esta etapa se analizó con una prueba de tracción uniaxial, la cantidad de fuerza requerida para desencajar el mecanismo tipo rótula, dicha prueba fue realizada en la máquina universal de ensayos mecánicos, bajo la norma ASTM D-638

A partir de las pruebas realizadas, se refutaron y comprobaron las hipótesis que aparecieron en el proceso: como la variación de la cobertura afectaría el ángulo de movimiento y la resistencia al desencaje, a partir de la cual se pudo constatar la relación que maximiza el desempeño del mecanismo según la aplicación que se le vaya a dar. Se debe de tener en cuenta la manera como la variación de tamaño de las partes de la rótula afecta su funcionamiento ya sea en términos de resistencia y grados de libertad. Por esta razón surgen las siguientes hipótesis que iban a ser comprobadas durante el proceso investigativo:

- A mayor cobertura del acople, mayor resistencia tendrá la unión, pero permitirá un menor ángulo de libertad
- A mayor el radio del pistilo, el sistema resistirá mayores esfuerzos, pero el ángulo de movimiento será restringido
- A mayor escala de las medidas de la rótula, sin importar el tamaño de la cobertura del acople, hay un mayor esfuerzo generado debido al aumento del área de contacto entre las piezas que componen la rótula.

A futuro se planea utilizar el mecanismo en el desarrollo de sistemas lúdicos-

didácticos modulares, aprovechando la infinidad de oportunidades y ventajas que las tecnologías de fabricación digital nos ofrecen.

PALABRAS CLAVE: Rótula, diseño industrial, fabricación digital, fabricación digital aditiva, FDM, mecanismos integrales

INTRODUCCIÓN

En este proyecto de investigación desarrollado en el curso de Morfología Experimental, cuyos estudios se centran en los procesos de generación y transformación de la forma y la materia; se busca establecer una relación de tamaño entre las partes de un mecanismo tipo rótula que maximiza el ángulo de libertad y la resistencia del mismo.

Existen variedad de tipos de mecanismos, los hay unidireccionales, de rotación, angulares, entre otros. Nuestro proyecto se basó en el análisis de un mecanismo tipo rótula, que permite, además de un ensamble por presión, movimientos angulares en los 2 ejes además de la posibilidad de rotar sobre el mismo eje; estos mecanismos fueron impresos con FDM, tecnología cuyas características, como la posibilidad de producir de manera rápida (sin necesidad de moldes), fueron un atractivo para centrarnos en este tipos de tecnología.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

Con esta investigación se quiere determinar la relación entre las dimensiones de las partes, que maximiza el desempeño funcional de un mecanismo tipo rótula fabricado con FDM

1.1 TEMA GENERAL DEL PROYECTO

El tema general del proyecto abarca los distintos saberes técnicos que surgen de la pregunta de investigación acerca de la relación entre tamaño y material que maximiza el desempeño funcional de un mecanismo tipo rótula fabricado con tecnologías de impresión 3D (FDM)

Para esto será necesario dominar temas relacionados con las tecnologías de fabricación aditivas, sus ventajas y desventajas y cómo fabricar con estas tecnologías, mecanismos complejos de manera integral, es decir mecanismos que permitan el movimiento sin necesidad de ensamblajes.

1.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Este proyecto, con enfoque práctico y experimental, busca incursionar en el campo de las tecnologías de fabricación digital. Por ser un proyecto experimental que sigue el método científico está estructurado de una manera determinada con pasos definidos a seguir.

Como primer paso, se definieron las variables (Escala, Tamaño de las partes del sistema, material y tipo de mallado) sobre las cuales se registrará la investigación en torno al desarrollo de un mecanismo tipo rótula con tecnologías de fabricación aditiva, particularmente FDM . Nuestro proyecto se centró en la variación de la escala del sistema tipo rótula y la variación del tamaño de las partes del sistema (Cobertura del acople, diámetro del sólido del acople y diámetro del pistilo) las cuales fueron definidas luego de haber estudiado las posibilidades del sistema, inserto en las dinámicas del mercado desde distintos sectores productivos o de servicio, como el de la salud, la robótica y mecatrónica o Lúdico.

Por otra parte, el material, fue en un principio para nuestra investigación una de las variables, ya que aspirábamos fabricar los prototipos en dos materiales distintos, ABS y PLA, pero por cuestiones de tiempo, se define fabricar los prototipos en ABS.

Al igual que el material, creímos pertinente experimentar con distintos mallados internos en la fabricación de los prototipos, pero tuvo que ser acotado y los prototipos fueron impresos con el tipo de mallado que presentaba las mejores características en cuanto a resistencia.

Después de recopilar la información y conocer los elementos delimitadores se procedió a crear un plan que permita dar respuesta a los objetivos planteados para la investigación, con este plan se definirán las herramientas, el personal y el tiempo necesario para probar el enunciado de la investigación y por último concluir.

Para analizar el mecanismo tipo rótula, se definieron las escalas con variaciones en las distintas partes que conforman la rótula (pistilo, sólido de ensamble, cobertura de acople) las cuales permitirán analizar la relación que potencia el funcionamiento de la rótula en cuanto a grados de libertad y resistencia.

1.3 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN IDENTIFICADO

El problema identificado que da origen a nuestro proyecto es la complejidad para fabricar algunos mecanismos de alta complejidad y pre-ensamblados como el integral de tipo rotular con las técnicas de fabricación que actualmente predominan en la industria, ligado a la

complejidad geométrica de los moldes, de los elementos con mecanismos o compuestos y la dificultad para realizar los ensambles.

Esta investigación tiene como objetivo principal, analizar y potenciar el desempeño funcional del mecanismo tipo rótula fabricado a través de la tecnología FDM, para posteriormente en otro proceso investigativo futuro analizar la viabilidad productiva y económica de mecanismos integrales a partir de las tecnologías de fabricación digital.

1.4 ELEMENTOS DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

- Tamaño o escala de las rótulas
- Material en cual será fabricado
- Estructura interna (mallado)
- Tipo de tecnología de fabricación digital aditiva
- Tipo de mecanismo: Rotular

2. JUSTIFICACIÓN:

Con el crecimiento acelerado de la industria y la necesidad de producir eficientemente (costo y precio) piezas con una complejidad mayor para distintos sectores de la industria, las técnicas productivas se van transformando rápidamente respondiendo a estas necesidades y generando nuevas oportunidades.

Una de las tecnologías que en los últimos años ha tenido un gran reconocimiento por sus ventajas a la hora de producir son las tecnologías de fabricación digital, entre las cuales se destacan las tecnologías de fabricación aditiva, o popularmente conocidas como impresión 3d, tecnologías que cuentan con la gran ventaja de poder producir de manera rápida y barata, en comparación con otros procesos productivos tradicionalmente utilizados, tales como: inyección, soplado, extrusión, entre otros, prototipos de formas complejas sin necesidad de moldes, es decir, con formas de cualquier tipo, como angulares, no angulares, orgánicas (formas con predominio de geometrías curvas continuas) entre otras que tienen medidas micrométricas y con ensamblajes incorporados en el mismo proceso de impresión.

En nuestro proyecto se trabajará específicamente con Deposición de Hilo Fundido o FDM por sus siglas en inglés, *Fused Deposition Modeling*, una tecnología de fabricación digital aditiva que permite generar prototipos de piezas complejas, mecanismos integrales tipo rótula impresos sin necesidad de ensamblaje, totalmente funcionales y con movimiento; sin requerir moldes costosos y la gran ventaja de poder evaluar anterior a la producción, las piezas con software análisis de elementos finitos (pruebas mecánicas de tracción, flexión, torsión) también simular procesos (impresión 3D) y simulación cinemática(movimientos) por medio de las tecnologías CAE (Computer Aided Engineer)

2.1 VALIDEZ DEL PROYECTO EN EL CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN EN DISEÑO INDUSTRIAL

Es pertinente la realización de nuestro proyecto en el contexto de investigación del diseño industrial, específicamente en el área de morfología experimental, por la ventaja que presentan las tecnologías de fabricación digital en el ámbito de la producción de prototipos, mecanismos y sistemas funcionales estas tecnologías son una herramienta clave a la hora de generar ideas nuevas que requieran geometrías complejas y una gran oportunidad para la optimización de los costos y tiempos de producción. El diseño industrial debe estar fundamentado en la idea de que la innovación (en este caso en el uso de tecnologías de fabricación digital aplicadas al desarrollo de mecanismos integrales) es la base para el desarrollo tecnológico e instrumental.

También nos parece pertinente experimentar con estas nuevas tecnologías, ya que como se mencionaba anteriormente, la posibilidad de generar prototipos de rápida producción en comparación con otros tipos, el bajo costo y el control que se puede tener sobre las piezas (digitalmente), que responden a la inmediatez con la que la industria exige nuevos descubrimientos.

2.2 OPORTUNIDADES QUE REPRESENTA PARA EL DESARROLLO DE NUEVOS PRODUCTOS O ESTRATEGIAS

Con este proyecto de investigación se espera encontrar cual es la configuración óptima que potencia el desempeño del mecanismo integral tipo rótula fabricado a partir de FDM, cuya aplicación puede ser en distintos y diversos ámbitos como: el desarrollo de mobiliario, la robótica, la producción de órtesis y la industria de juguetes en la cual queremos incursionar para desarrollar juguetes que no necesiten ensamblaje en su producción, pero que de igual manera permiten el movimiento y potencien las capacidades motoras y creativas.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL:

Escoger la relación entre tamaño y escala que permita un máximo desempeño en el funcionamiento de mecanismos tipo rotulas fabricados en ABS con la tecnología de fabricación digital FDM (Deposición de hilo fundido)

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Definir la escala de tamaños del mecanismo tipo rótula con el cuales se van a trabajar
- Seleccionar los materiales que serán utilizados la tecnología de FDM
- Fabricar los prototipos a partir de FDM
- Evaluar el desempeño de los prototipos fabricados
- Escoger la relación que maximiza el desempeño funcional del mecanismo de rótula.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1 ANTECEDENTES

En el ámbito de la fabricación digital aditiva y el análisis mecánico de materiales aplicados a estas tecnología, se encontraron dos tesis que aportaron gran cantidad de información al proyecto sobre las tecnologías de fabricación aditiva o también denominadas de impresión 3d, específicamente FDM, dentro de las cuales los aspectos más relevantes desde las conclusiones fueron las ventajas y desventajas de esta tecnología para producir piezas.

La primera tesis en la que el proyecto se apoyó fue la investigación de las capacidades de la manufactura con la tecnología de FDM, Adolfo Ortega ingeniero mecánico de la UNAM, expone las capacidades, limitaciones y posibilidades de utilizar esta tecnología a partir de pruebas con distintas piezas generadas con modelación en 3d, donde analiza distintos factores como acabados, resistencia y calidad en relación con los materiales utilizados en esta tecnología.

La segunda tesis en la que la investigación se apoyó fue hecha por Jaime Vinicio Molina, ingeniero mecánico de la universidad nacional de quito en el año 2016, su tesis contiene información fundamental acerca del mallado interno de los objetos hechos con tecnologías de fabricación digital aditiva, estas tecnologías tienen la desventaja de generar piezas anisotrópicas, es decir que las respuestas a esfuerzos mecánicos ejercida en distintas direcciones no es homogénea. (Rudolf, 1986, p. 209).

Jaime Vinicio en su tesis expone un comparativo entre los distintos mallados de impresión con pruebas de tracción, flexión y torsión, concluyendo a partir de estas pruebas

que configuración tiene una mayor resistencia a dichos esfuerzos.



Figura 1: Mallado interno circular. recuperado de: Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi- rígido impresos en 3d con cinco mallados internos diferentes. Vinicio Molina J.

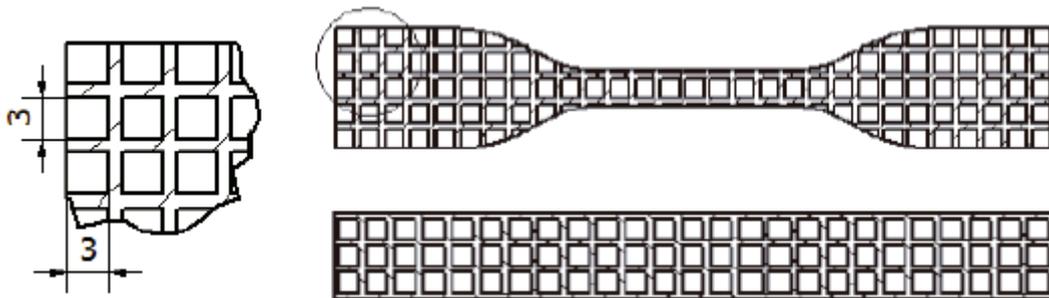


Figura 2: Mallado interno rectangular. recuperado de: Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi- rígido impresos en 3d con cinco mallados internos diferentes. Vinicio Molina J.

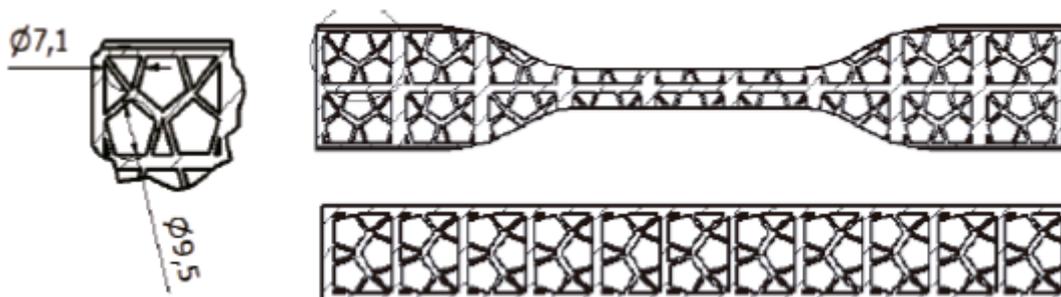


Figura 3: Mallado interno poligonal. recuperado de: Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi- rígido impresos en 3d con cinco mallados internos diferentes. Vinicio Molina J.

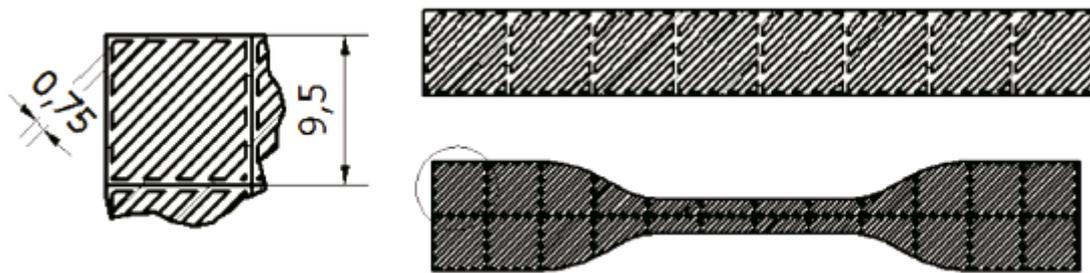


Figura 4: Mallado interno diagonal. recuperado de: *Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi- rígido impresos en 3d con cinco mallados internos diferentes. Vinicio Molina J.*

4.2 ESTADO DEL ARTE

Encontramos algunos ejemplos de mecanismos integrales fabricados con tecnologías de impresión 3d y aunque no se encontraron específicamente rótulas integrales estos mecanismos pueden servir de guía para el proyecto.



Figura 5. Vestido impreso en 3d. Ejemplo de mecanismos integrales hechos con tecnologías 3d. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=wdRswasftfI>

Este vestido fabricado por Nervous System, está construido con tecnologías de fabricación digital aditiva, a partir de figuras geométricas unidas por bisagras integrales que permiten que la estructura se comporte como un tejido con movimiento fluido.

Actualmente en el MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) existe un laboratorio de investigación, compuesto por un grupo multidisciplinario que está desarrollando tecnologías auto ensamblables a partir de la impresión y modelación 3D, para aplicarlos a distintos campos como la biología, la ciencia de los materiales, la robótica, la manufactura, el

transporte, la infraestructura e incluso la ciencia espacial. Los mecanismos que han logrado desarrollar cuentan con la particularidad que permiten el movimiento autónomo de la pieza, en la cual se genera una predisposición del material, con dobleces y cortes, para reaccionar a distintos estímulos dinámicos.



Figura 6. Mecanismos dinámicos impresos en FDM. Rescatada de:
<http://www.selfassemblylab.net/4DPrinting.php>



Figura 7. Mecanismos dinámicos impresos en FDM. Rescatada de:
<http://www.selfassemblylab.net/4DPrinting.php>

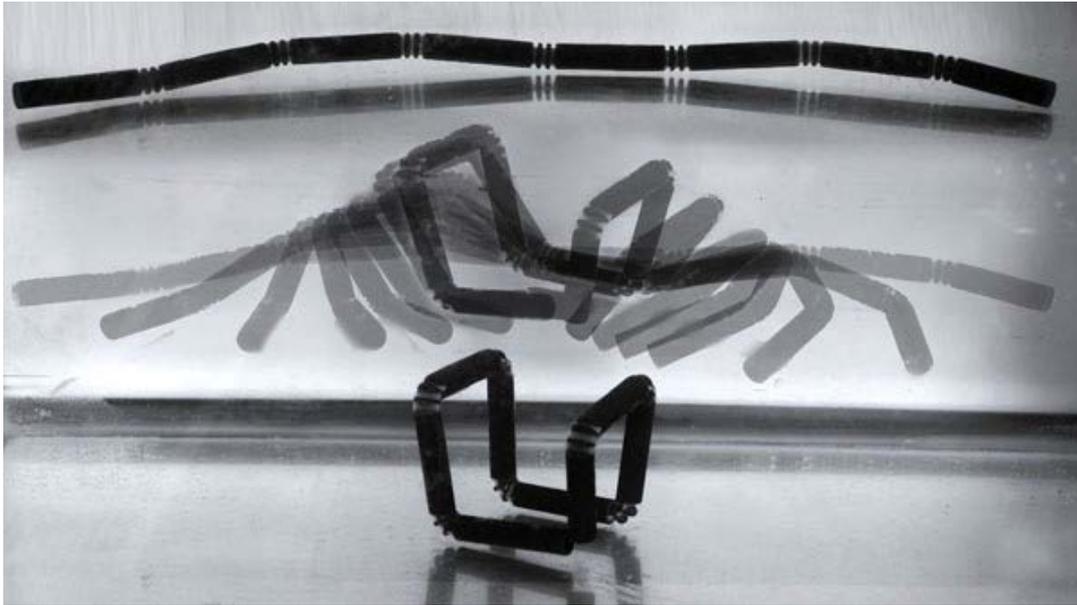


Figura 8. Mecanismos dinámicos impresos en FDM. Rescatada de:
<http://www.selfassemblylab.net/4DPrinting.php>

4.3 MARCO TEÓRICO:

Para el proyecto fue pertinente investigar sobre los elementos del problema anteriormente mencionados, a continuación, se hizo una compilación de toda la información categorizada de los dos elementos principales: el mecanismo integral de rótula y las tecnologías de fabricación digital; desde lo macro (como las tecnologías de fabricación digital) hasta lo micro, en lo que se enfocará el proyecto (la tecnología de fabricación digital FDM)

4.3.1 Articulaciones mecánicas (Macro)

“La articulación mecánica es un mecanismo por el que diferentes objetos se conectan entre sí, con objeto de compartir la fuerza o el movimiento que generarán. Las articulaciones mecánicas generalmente están diseñadas para transformar una fuerza de entrada y darle, mediante el movimiento, una nueva fuerza de salida que es el que se desea conseguir”. Recuperado de: <http://mongrat.com/la-articulacion-mecanica/>

4.3.1.1 Tipos de articulación mecánica

La articulación mecánica es un mecanismo conformado por dos o más palancas juntas, estas pueden estar diseñadas para cambiar la dirección de un fuerza, para compartir o

desviar movimiento o para unir dos funciones, son capaces también de realizar distintos movimientos a diferentes velocidades en diversas direcciones sobre un plano, estas pueden ser clasificadas de acuerdo a sus funciones principales, según Fernández (2014):

- *Generación Función: Para conseguir que las partes conectadas entre sí realicen la función que deseamos*
- *Generación de trayectoria: Para conseguir que ambas partes conectadas realicen la trayectoria deseada*
- *Movimiento Generación: para conseguir que las partes conectadas realicen determinado movimiento.*

4.3.1.1.1 Articulación cilíndrica

Puede realizarse mediante un pasador cilíndrico o bulón, elimina tres grados de libertad traslacionales y dos grados de libertad de orientación, haciendo que los dos sólidos compartan un eje de giro común.

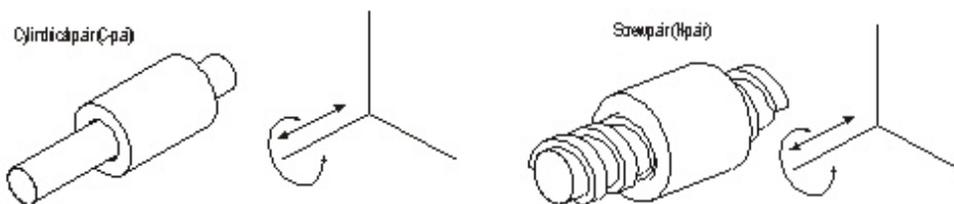


Figura 9: Movimiento en un eje. Recueperado de: http://coast.pink/articulacion-mecanica_3725736.html

4.3.1.1.2 Articulación esférica

Una articulación esférica o rótula esférica en tres dimensiones, obliga a que un sólido se mueva, estando acoplado con otro, compartiendo un punto de común, pero sin restringir de ninguna manera la posibilidad de orientación de un sólido respecto al otro. Fernández (2014)

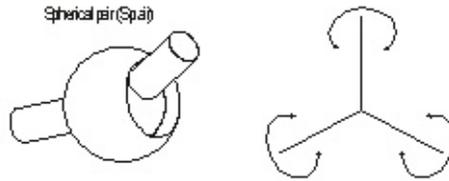


Figura 10 .Articulación Esférica o rótula recuperado de: http://coast.pink/articulacion-mecanica_3725736.html

4.3.1.1.3. Rótula fija:

Según Fernandez (2014) una rótula fija es un tipo de articulación que ancla un sólido al suelo fijo o "bancada", eliminando completamente todos los grados de libertad traslacionales pero sin restringir la orientación respecto al suelo o bancada.

4.3.1.1.4 Bisagra:

Conformada por dos piezas unidas por un pasador el cual permite únicamente el movimiento rotacional en un eje.

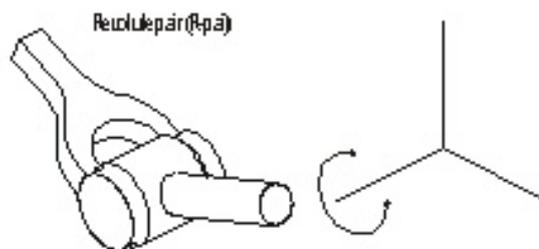


Figura 11 .Articulación bisagra recuperado de: http://coast.pink/articulacion-mecanica_3725736.html

4.3.1.2 Tipos de movimiento

Los distintos mecanismos pueden aportar a determinado sistema dependiendo del mecanismo utilizado o del tipo de movimiento requerido, dentro del cual caben cuatro posibilidades:

- Que los objetos o fuerzas se mueven en direcciones opuestas; esto se puede hacer a través del enlace de entrada como una palanca. Si el pivote fijo es equidistante de los pivotes en movimiento, el movimiento de salida de enlace será igual al movimiento de enlace de entrada, pero va a actuar en la dirección opuesta. (Fernández, 2014)

- Puede hacer que los objetos o fuerzas se muevan en la misma dirección; el enlace de salida se mueve en la misma dirección que el enlace de entrada. Técnicamente clasificado como una articulación de cuatro barras, se puede girar a través de 360 ° sin cambiar su función. (Fernández, 2014)

- Puede hacer que los objetos o fuerzas se mueven en la misma dirección, pero a una distancia determinada de diferencia. Los pantógrafos que obtienen energía para los trenes eléctricos de cables aéreos se basan en este tipo de articulación mecánica. (Fernández, 2014)

- Se puede cambiar la dirección de los objetos o de fuerza por 90 °. Utilizado por ejemplo en los frenos de bicicleta, al fijar dos palancas acodadas dobladas a 90 ° en direcciones opuestas entre sí para formar las pinzas. Al apretar las dos palancas del manillar vinculados a los extremos de entrada de cada manivela, los extremos de salida se moverán juntos. (Fernández, 2014)

Ahora teniendo como base la información acerca de los tipos de mecanismos, sus capacidades y rangos de movimiento nuestro proyecto se centrará.

Un mecanismo integral se define como el tipo de mecanismo que es fabricado sin la necesidad de ensamblaje, nuestro proyecto se centrará en fabricar un mecanismo de rótula integral a partir de las tecnologías de fabricación digital, para analizar la relación entre tamaño y material que maximiza su desempeño.

A continuación la compilación de la información sobre las tecnologías de fabricación digital, sus ventajas y desventajas y el porqué de nuestra elección con respecto a la tecnología FDM.

4.3.2. Tecnologías de fabricación digital

Según la definición de la empresa Siemens Fabricación digital es el uso de un sistema integrado, basado en ordenador, compuesto de la simulación, visualización en tres dimensiones (3D), análisis y herramientas diversas de colaboración para crear definiciones de producto y procesos de fabricación simultáneamente. La fabricación digital ha evolucionado a partir de iniciativas de fabricación como el diseño para la fabricación (DFM), fabricación

integrada por ordenador (CIM), fabricación flexible y otros que ponen de relieve la necesidad de una mayor colaboración del producto y diseño de procesos. La fabricación digital puede ayudar a las empresas a mejorar su productividad de fabricación tanto en la planificación de fabricación como en los procesos de producción.

El uso de la fabricación digital, puede crear modelos de la fábrica más rápido y garantizar que se operan al amparo del diseño óptimo, el flujo de materiales y el rendimiento antes de la producción. La fabricación digital puede utilizarse para apoyar Six-Sigma, proporcionando un entorno gráfico para analizar la variación dimensional.

La fabricación digital le permite ejecutar los procesos de producción con acceso en tiempo real a los datos del ciclo de vida, INDUSTRIA TECNOLÓGICA SIEMENS (2016)

4.3.2.1. Tipos de fabricación

4.3.2.1.1. Fabricación digital aditiva.

Fabricación Aditiva de la sigla en inglés *Additive Manufacturing* (AM), como se conoce internacionalmente, consiste en la sucesiva superposición de capas micrométricas de material que se adhieren hasta conseguir el objeto deseado.

La consolidación del material en cada una de las capas se consigue de manera distinta según la tecnología. Esta modalidad de fabricación supone una nueva revolución industrial, íntimamente vinculada con el desarrollo de las TIC, y es la pieza angular de la fábrica de la era digital y del futuro industrial de los países desarrollados al permitir, entre otras ventajas, prescindir de herramientas y utillajes de fabricación, reproducir cualquier geometría que el ser humano pueda imaginar, ofrecer una respuesta inmediata a las cambiantes necesidades del mercado, y atender a la creciente demanda de diferenciación y personalización de los productos por parte de los consumidores.

Ventajas y características

- Con la Fabricación Aditiva, la personalización no encarece el proceso porque permite fabricar productos, sin penalizar el coste, independientemente de si se tiene que fabricar un determinado número de piezas iguales o todas distintas, lo que facilita

la personalización, que es una de las principales tendencias actuales en el desarrollo de productos de alto valor añadido y uno de los paradigmas que persigue la industria en los países desarrollados al considerarlo clave para su sostenibilidad.

- Fabricación competitiva de series cortas de productos. Dependiendo del número de piezas a fabricar se hace necesario estudiar a partir de qué cantidad de piezas es rentable fabricar tradicionalmente, por ejemplo a través de molde de inyección, o si por el contrario es más rentable producir las piezas por fabricación aditiva, donde se añade la ventaja de poder realizar modificaciones durante la vida del producto sin apenas coste adicional o parametrizar el producto y fabricarlo según necesidad, sin estar atado a un costoso molde (coste inicial, mantenimiento, almacenamiento,...).

4.3.3. Tipos de fabricación digital aditiva

Según la fábrica experta de impresión 3d en línea, Sculpteto existen diferentes tipos de fabricación digital.

4.3.3.1. Sinterizado láser selectivo (SLS)

Sinterizado Láser Selectivo es un método de Fabricación Aditiva que usa un proceso de fusión de polvo para fabricar en 3D los objetos. Las aplicaciones para este proceso de impresión 3D suelen ser diseños con partes móviles, prototipos, productos de consumo, modelos arquitectónicos, hardware, carcasas para electrónica, esculturas, ítems promocionales y mucho más.

4.3.3.2. Estereolitografía (SLA)

Estereolitografía (SLA) es un proceso de impresión 3D o Fabricación Aditiva en resina que utiliza una piletta de resina fotosensible que se cura por exposición a la luz. SLA es comúnmente utilizada para generar piezas artísticas muy detalladas, prototipos no funcionales, y puede ser usada también para crear moldes para Moldeo a la cera perdida.

4.3.3.3. Polyjet

Similar a Estereolitografía, el proceso de impresión 3D de alta calidad Polyjet utiliza luz UV para curar un fotopolímero. El proceso de impresión Polyjet es ideal para desarrollar prototipos completamente ensamblados y geometrías complejas y detalladas con materiales con distintas propiedades.

4.3.3.4. Sinterizado directo de metal láser (DMLS)

Las aplicaciones para este proceso de impresión 3D son comúnmente productos finales para la industria aeroespacial, defensa, medicina, creación de moldes, etc. DMLS ofrece varios beneficios sobre la fabricación tradicional, ya que no requiere de herramientas especiales. DMLS permite la producción tanto de prototipos como de productos finales.

4.3.4.4. Modelado por deposición fundida (FDM)

Deposición de hilo Fundido de la definición en inglés Fused Deposition Modeling (FDM) es probablemente el más popular de todos los procesos de impresión debido al gran número de impresiones en el mercado. Las aplicaciones para este proceso de impresión 3D son Objetos conceptuales, Modelos funcionales, Prototipos, Productos finales.

Proceso para su funcionamiento:

Las impresoras 3D que utilizan la tecnología FDM crean piezas capa por capa de abajo a arriba calentando y extrayendo el filamento termoplástico. El proceso es el siguiente:

1. Procesado previo: El software de preparación de bandeja lámina y coloca un archivo CAD 3D. A continuación, calcula la trayectoria para extruir el material termoplástico y cualquier material de soporte necesario.
2. Producción: La impresora 3D calienta el material termoplástico hasta que alcanza un estado semilíquido y lo deposita en gotas ultra finas a lo largo de la trayectoria de extrusión. En los casos en los que se precisa un soporte o apoyo, la impresora 3D deposita un material eliminable que hace las veces de andamiaje.

3. Post procesado: El usuario retira el material de soporte o lo disuelve en agua y detergente y, a continuación, la pieza ya se puede utilizar.

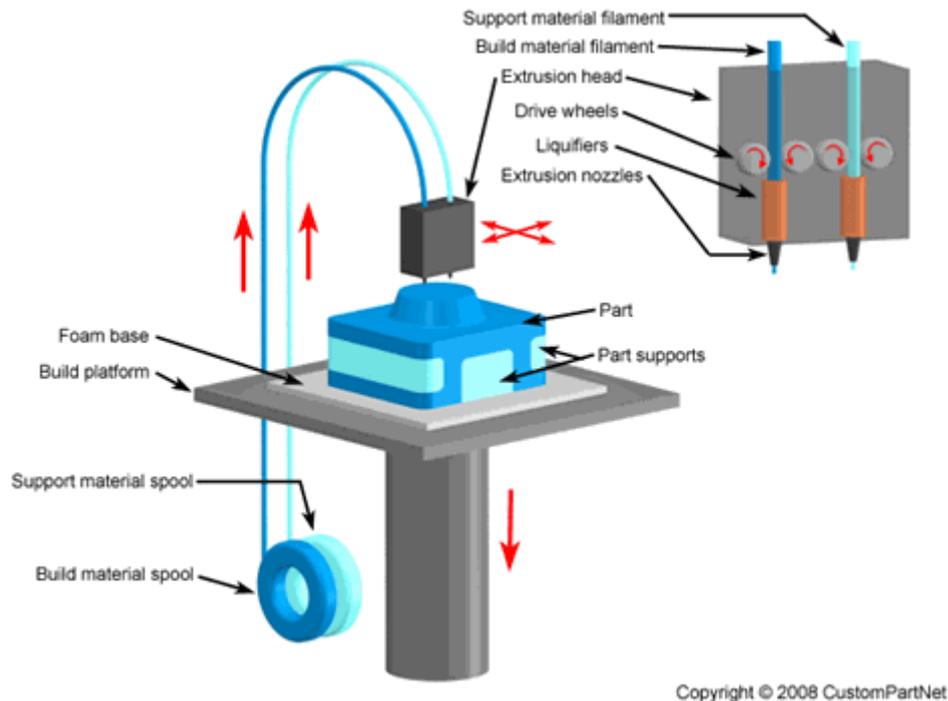


Figura 12. Proceso de impresión con FDM. Rescatado de: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>

4.3.5. Materiales

Es importante para nuestro proyecto tener en cuenta los materiales que utiliza este tipo de tecnología, ya que las variables dependen directamente de las propiedades del material seleccionado y los resultados de las pruebas se verán afectados por este.

Existen materiales naturales que se dividen en 3 grupos, los vegetales (que se obtienen de las plantas como el algodón y la madera), animales (que se obtienen de los animales como el cuero y la seda) y minerales (que se obtienen de minerales y rocas como el hierro y el mármol); y existen materiales artificiales que se valen de los naturales para ser producidos y son creados por el hombre, entre ellos están el papel, el vidrio, entre otros. Nuestra investigación está focalizada específicamente los materiales artificiales poliméricos con los cuales se hace la impresión 3D.

4.3.5.1. Polímeros

Los polímeros son macromoléculas que se forman gracias a la unión de enlaces covalentes de una o más unidades simples, las cuales son llamadas monómeras. Los polímeros se dividen en tres grandes grupos: Los termoplásticos que son aquellos que permiten ser deformados por medio de la aplicación de una fuente calórica alta. Los termoestables según Molina (2016) son aquellos polímeros que requieren formas de transformación lenta y metódica para lograr su conformación. Por último los elastómeros que químicamente se componen de dobles enlaces en la cadena principal y pueden llegar a deformarse hasta en un 400% de su forma original. Molina (2016)

4.3.5.2 Termoplásticos

Una de las características principales de los termoplásticos y quizá la más importante a la hora de entender porque son usados en la Impresión 3D es su capacidad de ser transformados en varias ocasiones, pueden realizar el proceso de fundido y solidificación en contadas ocasiones sin perder sus características mecánicas. Los polímeros termoplásticos más usados en en la impresión 3D es el PLA (Ácido Poliláctico) y el ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) debido a su bajo costo y buenas características mecánicas, pero existen otros también usados en este tipo de tecnología de fabricación digital tales como el Nylon, Polipropileno, Poliamidas, Alumide, resinas y plásticos compuestos.

4.3.5.3. Ácido poliláctico (PLA)

El ácido poli láctico o comúnmente llamado por siglas en inglés PLA es un polímero biodegradable debido a que es fabricado a partir de materias primas renovables como el almidón de maíz y la remolacha. En la impresión 3D es usado, además por su bajo costo por una característica que lo vuelve compacto y poco deformable luego de haberse impreso obteniendo así un producto con mayor fidelidad de forma. Éste material se funde entre los 200° y 250°C y puede soportar temperaturas muy bajas (hasta -20°C) y a su vez muy elevados (80°C). Esto lo hace un material muy versátil y eficiente para el uso cotidiano. (Sánchez , 2015)

4.3.5.4. Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

Este material es muy comúnmente usado en los electrodomésticos. Siendo de la familia de los Termoplásticos, el ABS, por sus siglas en inglés, también contienen en su composición química una base de elastómeros a base de poli butadieno, haciéndolo más flexible y resistente a los choques, y ahí está presente la principal diferencia con el PLA. (Sánchez, 2015)

4.3.5.4. Polipropileno (PP)

Éste termoplástico, además de ser usado comúnmente en el sector automotriz, textil, empaques y cantidad de productos cotidianos, también es muy usado en la impresión 3D. Su resistencia a la abrasión, capacidad de absorber choques y su rigidez y flexibilidad lo hacen una gran alternativa para este proceso de fabricación. Tiene un inconveniente que es su baja resistencia a las temperaturas y su sensibilidad a los rayos UV, esta situación ha llevado a que los fabricantes de impresoras e insumos 3D desarrollen derivados de tal material. Sánchez (2015)

4.3.6. Ventajas de la FDM

- Fabricación de piezas poliméricas sin moldes
- Fabricación de piezas de material polimérico totalmente funcionales
- Fabricación de piezas con un alto grado de precisión
- Fabricación de formas complejas imposibles de realizar con métodos tradicionales
- Fabricación de ensambles armado
- Piezas personalizadas según la necesidad de cada proyecto

Por último uno de los factores clave por los cuales se decide trabajar con esta tecnología es por la viabilidad desde lo económico, por ser un proyecto de tipo académico el presupuesto es corto y esta tecnología es la que con un precio bajo permite analizar de la mejor manera el enunciado del proyecto.

Dentro de la investigación se presentaron diversas oportunidades (en cuanto a materiales y máquinas) para fabricar los prototipos de los cuales se definió trabajar con los siguientes.

Máquina: El tipo de máquina utilizada para producir las rótulas afectará el resultado de las pruebas que se hagan sobre estas, en este caso se utilizará una máquina de FDM marca Zortrax referencia M200, la cual tiene una alta resolución, debido a la precisión en la deposición del filamento, de entre 90 micrones hasta 400 micrones aproximadamente (0.09 mm- 0.4mm)



Figura 13: Máquina Zortrax M200, elegida para impresión de la muestra. Recuperado de: <https://store.zortrax.com/M200>



Figura 14: Resolución de la impresora en la máxima configuración (400 micrones)

Mallado: Para maximizar la resistencia de la pieza se eligió el mallado más estrecho con una configuración rectangular, está información fue definida desde lo recopilado en el marco referencial.

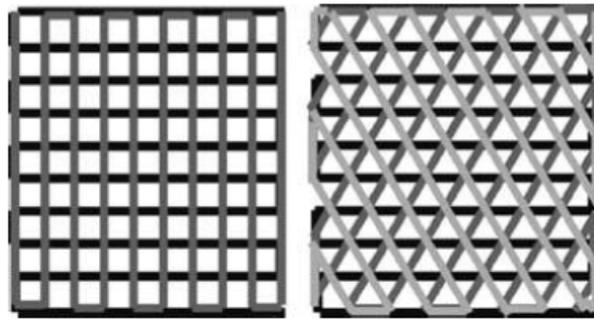


Figura 15: Tipos de configuración de mallado. Cuadriculada y triangular.

Mecanismo: El mecanismo en el cual se centrará nuestra investigación según los mecanismos anteriormente expuestos, es el de tipo rótula. Para entender su composición explicaremos a continuación las partes de este mecanismo.

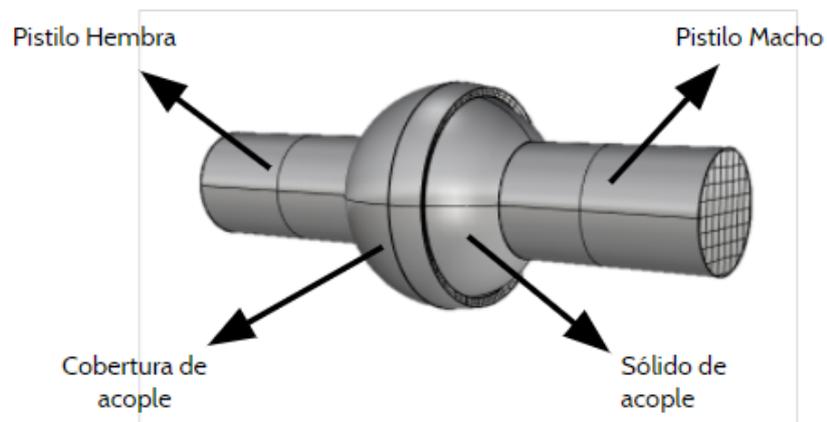


Figura 16: Esquema con las partes del mecanismo tipo rótula.

Pistilo: Parte de la rótula que une y da estructura a la cobertura del acople y al sólido del acople.

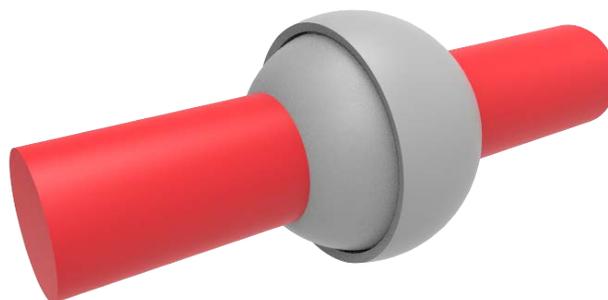


Figura 17: Pistilo de la rótula.

Cobertura del acople: Parte de la rótula que recibe al sólido del acople.

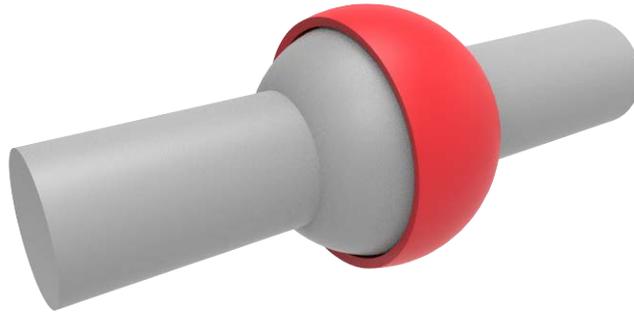


Figura 18: Cobertura del acople.

Sólido del acople: Parte de la rótula que se inserta en la cobertura de acople.

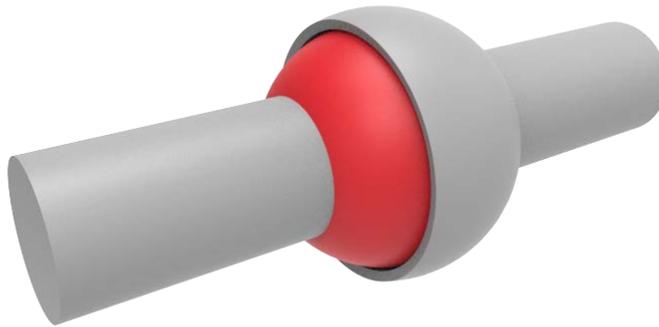


Figura 19: Sólido del acople.

5. METODOLOGÍA

5.1 TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo y la fase experimental estuvo guiada por una metodología que se definió a partir de los objetivos específicos, dentro de los cuales se consignaron las actividades respectivas que se realizarían en un periodo de tiempo de 16 semanas.

Ver anexo 1. Metodología

5.1.1 Actividades para la obtención de la información

Dentro de cada objetivo específico se definieron actividades determinadas con el fin de acotar los alcances de nuestro proyecto y obtener resultado a partir de la toma de decisiones, el proceso experimental se dividió en 4 fases según el objetivo. Ver anexo 1. Metodología

Anterior al proceso experimental, tuvimos un acercamiento conceptual a los campos de estudios de la investigación (los cuales fueron expuestos en el marco conceptual y referencial), los cuales nos permitieron definir parámetros técnicos como las dimensiones, escalas y materiales para fabricar los prototipos.

Ahora bien, en la primera fase del proceso experimental, con las escalas y los tamaños de las rótulas definidos, se realizó el análisis de elementos finitos y se fabricaron los primeros prototipos.

Objetivo Especifico	Actividades
Definir la escala de tamaños del mecanismo tipo rótula con el cuales se van a trabajar	1. Asesoramiento profesional sobre el tema de Investigación
	2. Definir varias escalas de tamaño adecuado para pruebas posteriores
	3. Modelar en 3D y analizar las muestras en las escalas de tamaño seleccionadas
	4. Realizar pruebas de tamaño para elegir la más adecuada según la facilidad para analizar el movimiento
	5. Definir la escala de tamaño del mecanismo con el cual se va a trabajar según resultados de las pruebas

Figura 20: Fragmento de la matriz de objetivos y actividades, primer objetivo específico.

En la siguiente matriz están consignadas las variables de tamaño de las rótulas, para las cuales se definió trabajar con tres escalas principales (25mm, 21mm y 17 mm). Esta medida de referencia, sobre la cual variarán las demás partes del mecanismo, como el desfase de la cobertura y el diámetro del pistilo, de manera proporcional, corresponde al diámetro del sólido del acople.

El desfase de la cobertura, representado en la matriz como 1/5, 1/6 y 1/7 equivale a una cobertura del 70%, 66% y 60% con respecto del sólido de acople. Estas fueron definidas a partir de la resistencia nula que proporciona el 50% de cobertura. Como era necesario que se generará una resistencia entonces se definió empezar con una cobertura del 60%, y la máxima del 70% debido a que si se ampliaba ese porcentaje de cobertura, el ángulo de libertad sería muy reducido y por ende no cumpliría con el requerimiento definido, desde el funcionamiento óptimo del mecanismo, de permitir un ángulo de libertad mayor. **Ver anexo 2. Matriz de porcentaje de cobertura**

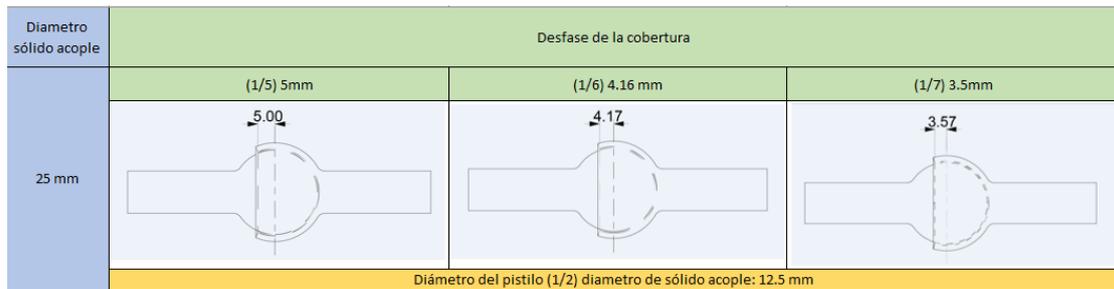


Figura 21: Matriz de variación de las rótulas de 25 mm de diámetro del sólido de acople

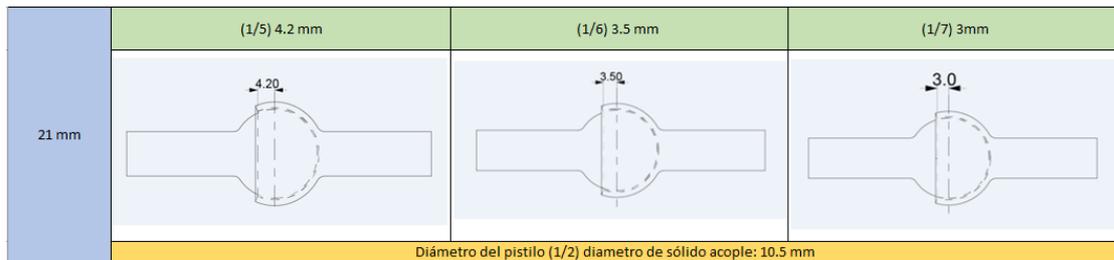


Figura 22: Matriz de variación de las rótulas de 21 mm de diámetro del sólido de acople

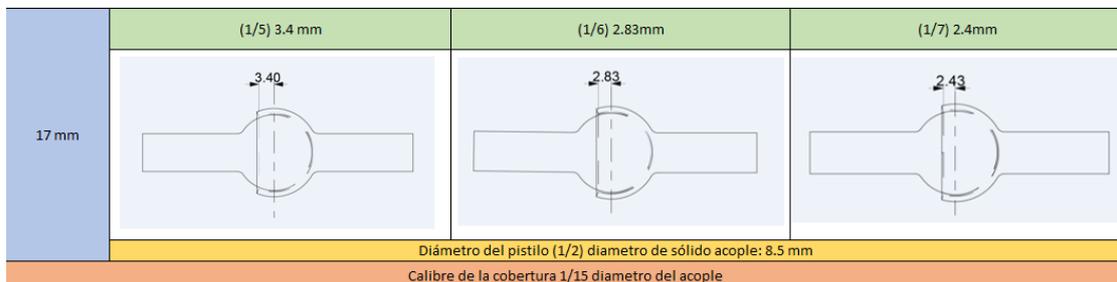


Figura 23: Matriz de variación de las rótulas de 17 mm de diámetro del sólido de acople

Una vez definidas las escalas y la proporción en la que sus partes variarían, se realizó un análisis de elementos finitos a cada uno de los prototipos, en el Plug- In de *Rinocheros, Scan & Solve*, el cual nos permitió tener un pronóstico de cómo se comportarían las piezas al aplicarles una carga

A continuación, el resultado de análisis de elementos finitos para las rótulas de 25 mm, 21mm y 17mm de diámetro en el sólido de acople:

Con esta escala, que es la mayor (en cuanto a tamaño) de las tres, encontramos cargas concentradas en la transición entre el pistilo- cobertura y pistilo- sólido de acople, las cuales fueron disminuyendo a medida que la cobertura disminuía; por lo

que el análisis de elementos finitos nos permitió constatar que a mayor la cobertura del acople, mayor será la carga concentrada. El significado de los colores en las siguientes gráficas determinan el punto donde podría a llegar a tener algún tipo de fractura o deficiencia mecánica en el sistema, siendo el rojo el color que muestra los puntos críticos a tener en cuenta y el azul, el color que muestra que en esa zona no llegaría a presentarse ningún inconveniente.

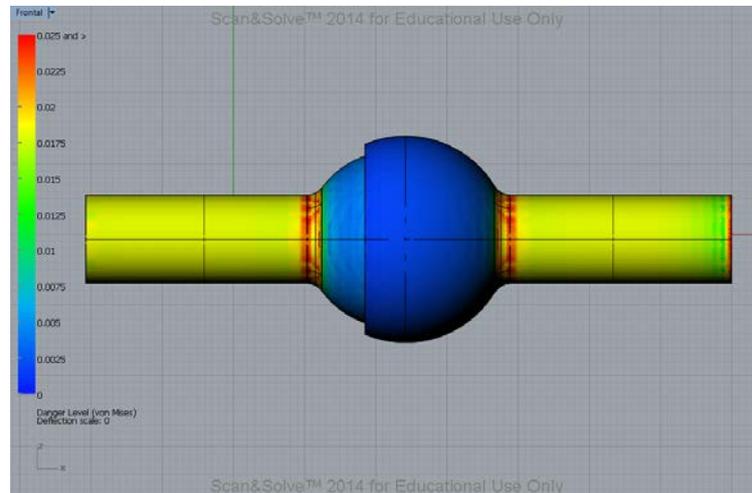


Figura 24: Análisis de elementos finitos, rótula 25 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 70% en la cobertura del acople.

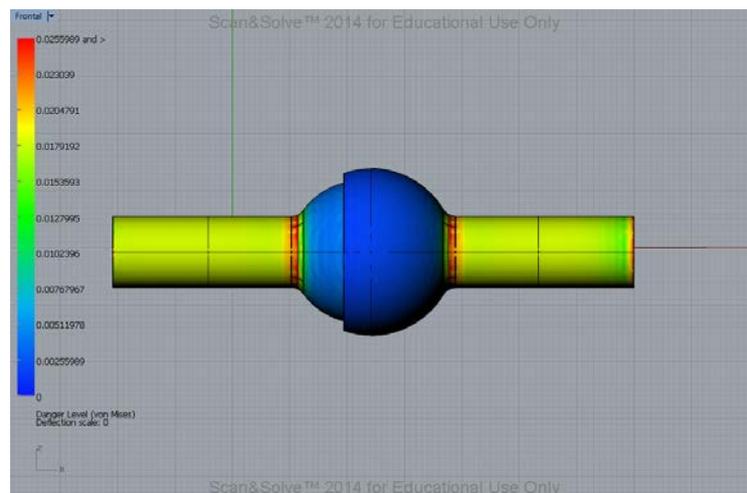


Figura 25: Análisis de elementos finitos, rótula 25 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 66% en la cobertura del acople.

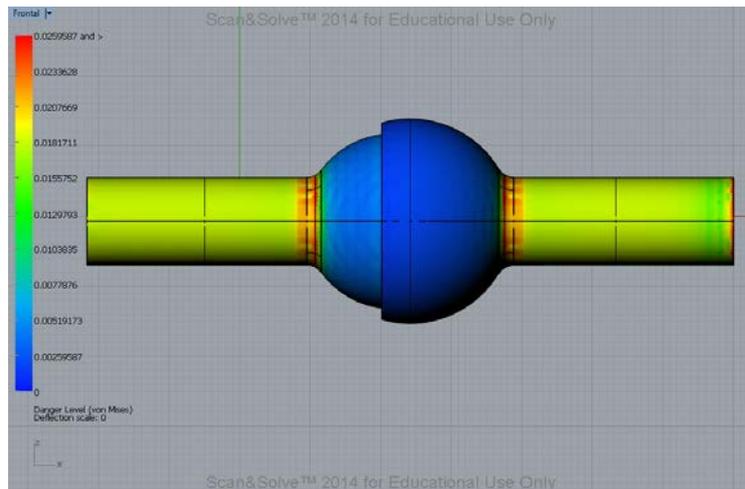


Figura 26: Análisis de elementos finitos, rótula 25 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 60% en la cobertura del acople.

En la escala intermedia (21mm diámetro del acople) se evidenció una carga mucho mejor repartida a lo largo del pistilo, no hubo una concentración de cargas (zonas rojas) tan marcada como en el análisis de las rótulas de 25mm y 17 mm.

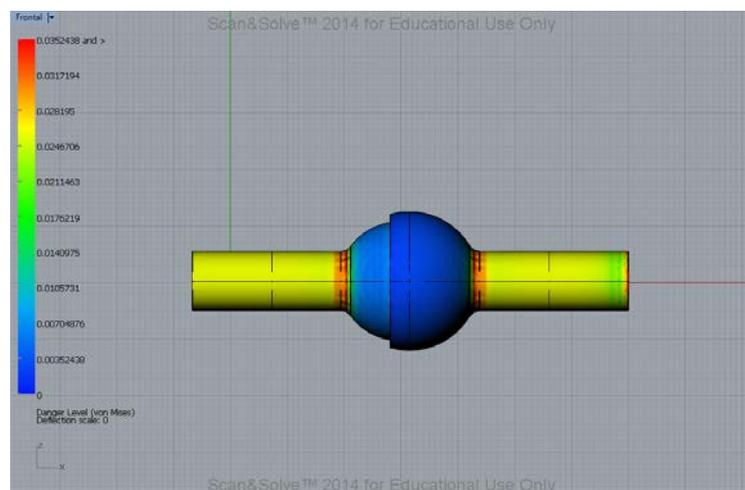


Figura 27: Análisis de elementos finitos, rótula 21 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 70% en la cobertura del acople.

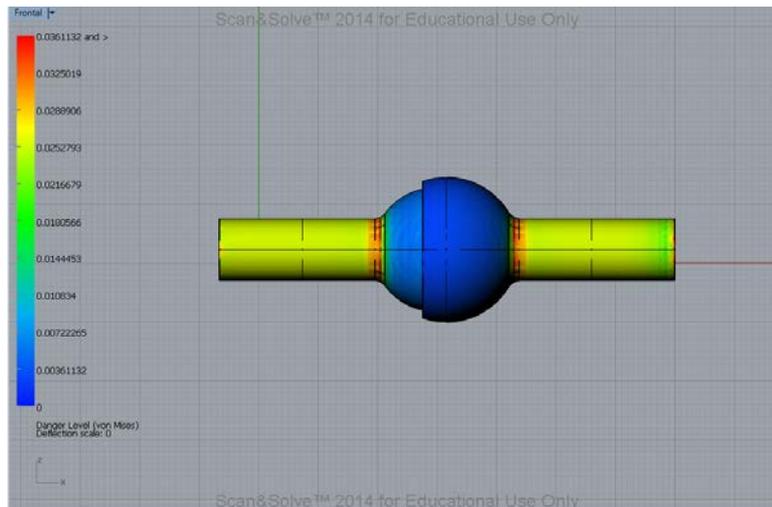


Figura 28: Análisis de elementos finitos, rótula 21 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 66% en la cobertura del acople.

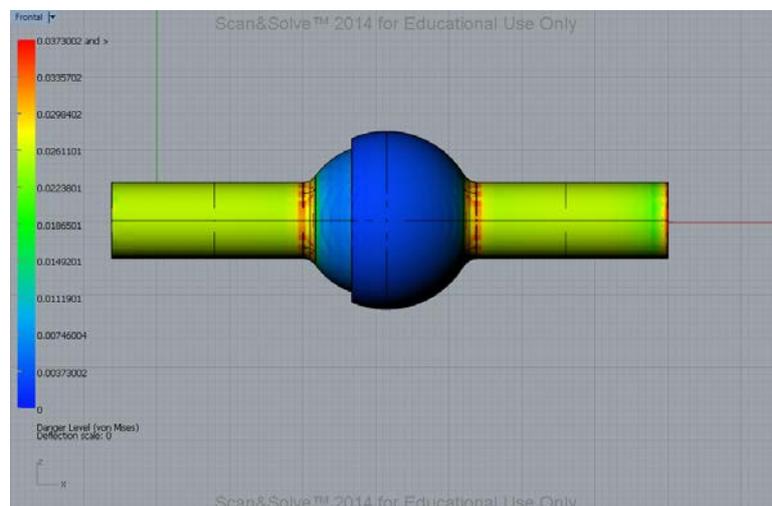


Figura 29: Análisis de elementos finitos, rótula 21 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 60% en la cobertura del acople.

Con las rótulas de 17 mm se evidenció una carga mucho mejor repartida a lo largo del pistilo, a excepción de la rótula con un 70% de la cobertura que tuvo una concentración de esfuerzos mayor.

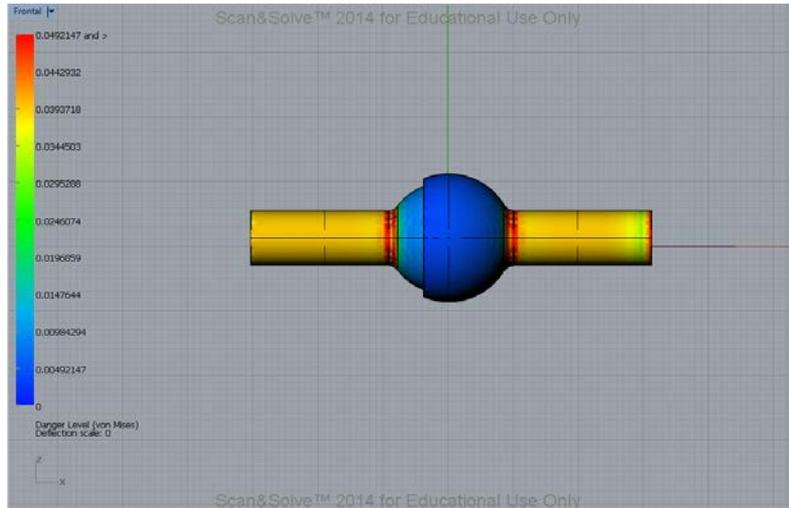


Figura 30: Análisis de elementos finitos, rótula 17 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 70% en la cobertura del acople.

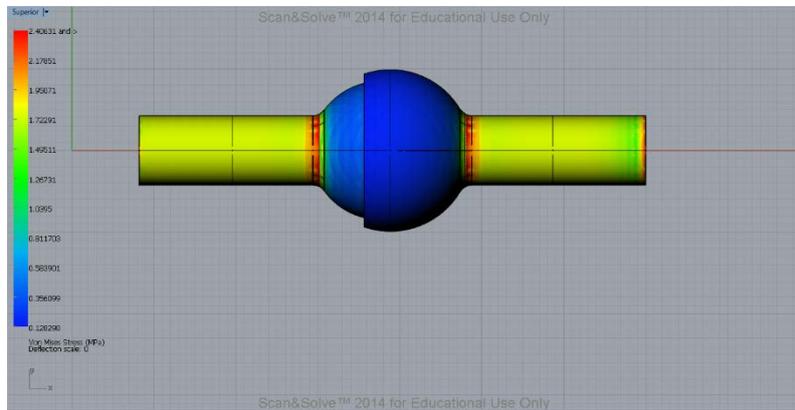


Figura 31: Análisis de elementos finitos, rótula 17 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 66% en la cobertura del acople.

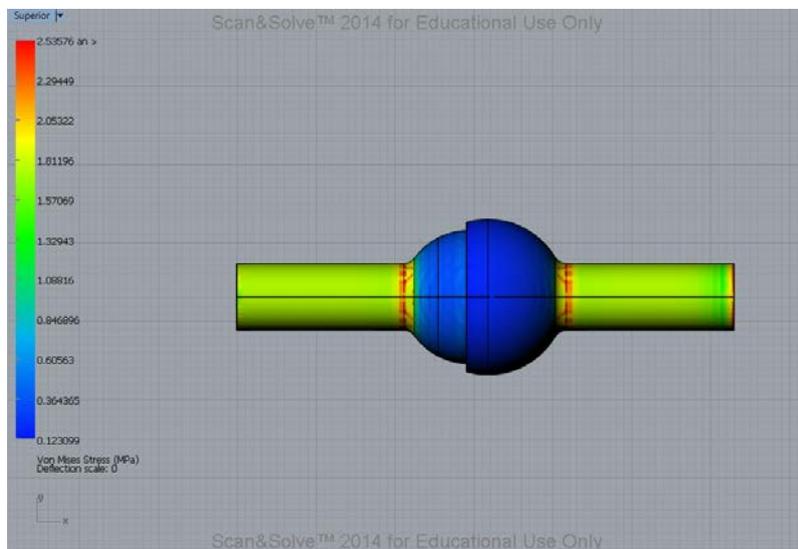


Figura 32: Análisis de elementos finitos, rótula 17 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 60% en la cobertura del acople.

Esta etapa, el análisis de elementos finitos, nos permitió tener un pronóstico del comportamiento de los mecanismos en la prueba de tracción con la máquina de tracción uniaxial de pruebas universales.

Algo muy importante de este análisis de elementos finitos es que el resultado encontrado aquí fue muy similar al obtenido en las pruebas reales, esto incrementa la importancia de este análisis ya que para un proceso productivo, esto podría llegar a ahorrar mucho dinero evitando encontrar fallos que no se tuvieron en cuenta en el proceso de diseño.

En la segunda fase se definió realizar los prototipos con el material ABS, que guarda una muy buena relación de costo y calidad y se definió la cantidad de prototipos que serían impresos para la prueba de tracción.

Seleccionar los materiales que serán utilizados la tecnología de FDM	1. Seleccionar 3 materiales a probar para revisar sus propiedades enfocadas a la investigación
	2. Analizar costos de cada probeta según el material
	3. Revisar viabilidad con respecto a la fabricación de la rótula en cada material
	4. Seleccionar 2 materiales que serán con los cuales se va a trabajar en la investigación

Figura 33: Fragmento de la matriz de objetivos y actividades, segundo objetivo específico.

Fabricar los prototipos a partir de FDM con los materiales seleccionados	1. Analizar costos y tiempos de fabricación con patrocinador o en su defecto seleccionar proveedor
	2. Analizar máquinas disponibles y definir con cual de ellas se va a trabajar.
	3. Definir número de probetas a fabricar por cada material
	4. Fabricar los prototipos con los materiales y la máquina seleccionada

Figura 34: Fragmento de la matriz de objetivos y actividades, tercer objetivo específico.

Anterior a la producción de los prototipos para las pruebas finales, se realizaron pruebas preliminares que nos permitieron modificar los prototipos para obtener un resultado preciso.

En un principio se había definido trabajar con una escala en la cual el diámetro del sólido del acople es de 30 mm y del pistilo 15 mm. Teniendo en cuenta que la prueba de tracción uniaxial en la máquina universal de ensayos, necesita dos puntos de agarre para la probeta (en este caso los pistilos); la medida de estos condicionó el tipo de mordaza con la cual se realizó la prueba. **Ver anexo 4. Fotografías rótulas**



Figura 35 : Rótula de 30 mm de diámetro en el sólido de acople y 15 mm de diámetro de pistilo.

Se realizó una prueba preliminar de la rótula de 30 mm de diámetro en el sólido de acople y 15 mm de diámetro de pistilo (la cual solo es compatible con la mordaza hidráulica de la máquina de ensayos universal Instron), Se calibró la mordaza con 20 psi y 15 psi de fuerza, los cuales fracturaron la pieza; Luego, se redujo la presión a 10 psi, pero al intentar la prueba la probeta se deslizó, por lo cual el resultado no fue válido.

Los resultados de las pruebas preliminares nos permitieron:

- Descartar la escala de 30 mm de diámetro al no tener manera de realizar la prueba de tracción.
- Modificar la transición (vértice) entre Pistilo- Cobertura; Pistilo- Sólido



Figura 36: Prueba preliminar, fallo en el vértice (concentrador de esfuerzos)

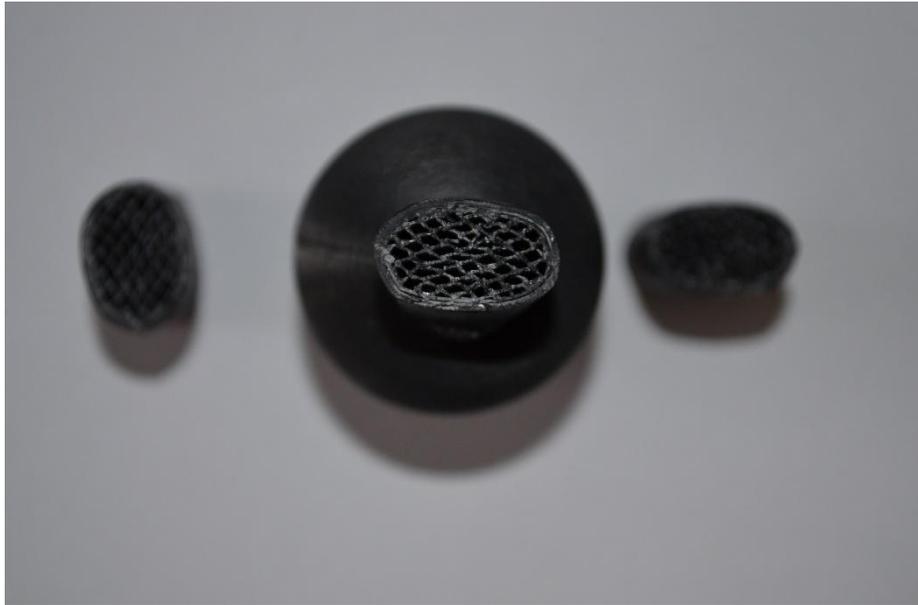


Figura 37: Prueba preliminar, colapso de la pieza debido a la fuerza ejercida por la mordaza

En la tercera fase se realizaron dos tipos de ensayos a la muestra seleccionada, se analizó en cada rótula el ángulo de libertad que permite para determinar hasta qué punto es viable o no para algún uso que se le vaya a dar (Entre mayor sea el ángulo mucho mejor) (Por medio del software *Rhinoceros*) y la resistencia al desencaje que será determinante para el óptimo funcionamiento del sistema, ya que una fácil separación de las dos partes del sistema podría hacer de él uno inservible, por medio de una prueba de tracción uniaxial realizada en una máquina de ensayos universal, bajo la norma ASTM D-638; cabe aclarar que a cada rótula se le realizó esta prueba dos veces.

Evaluar el desempeño de los prototipos fabricadas	1. Definir las pruebas a realizar
	2. Definir el lugar adecuado para realizar las pruebas
	3. Realizar las pruebas definidas
	4. Evaluar el desempeño de las probetas en cada prueba realizada
	5. Concluir sobre los resultados obtenidos

Figura 38: : Fragmento de la matriz de objetivos y actividades, cuarto objetivo específico.

Se analizaron en los prototipos a través del software de modelación, los ángulos de libertad que permiten las rótulas según la cobertura del acople. **Ver anexo**

5. Matriz de ángulos

Diámetro sólido	Desfase de la cobertura		
	(1/5) 5mm	(1/6) 4.16 mm	(1/7) 3.5mm
25 mm			
Diámetro del pistilo (1/2) diámetro de sólido acople: 12.5 mm			

Figura 39: Análisis de ángulos de libertad de las rótulas de 25 mm de diámetro

21 mm			
Diámetro del pistilo (1/2) diámetro de sólido acople: 10.5 mm			

Figura 40: Análisis de ángulos de libertad de las rótulas de 21 mm de diámetro

Diámetro sólido	Desfase de la cobertura		
	(1/5) 3.4 mm	(1/6) 2.83mm	(1/7) 2.4mm
17 mm			
Diámetro del pistilo (1/2) diámetro de sólido acople: 8.5 mm			

Figura 41: Análisis de ángulos de libertad de las rótulas de 17 mm de diámetro

A partir de este análisis, se pudo constatar que a mayor desfase de la cobertura del acople, menor será el ángulo de movimiento. En este caso la mayor cobertura, del 70%, permitió un ángulo de libertad de 37.2° ; la cobertura de 66% permitió un ángulo de 41.2° y la cobertura del 60% permitió un ángulo de libertad del 44° .

Nótese que al haber trabajado las rótulas con la misma proporción en cuanto al crecimiento y decrecimiento de sus partes con respecto al sólido de acople; los ángulos de libertad son iguales para las rótulas con distinta escala pero igual proporción de cobertura.

En la prueba de tracción uniaxial, realizada en la máquina Instron bajo la norma ASTM D-638 de elementos poliméricos, se realizó un total de 18 pruebas y se obtuvieron los siguientes resultados. **Ver anexo 6. Resultados pruebas tracción**

- **Rótula de 25 mm de diámetro sólido del acople:**

Con 1/5 (70%) de la cobertura del acople:

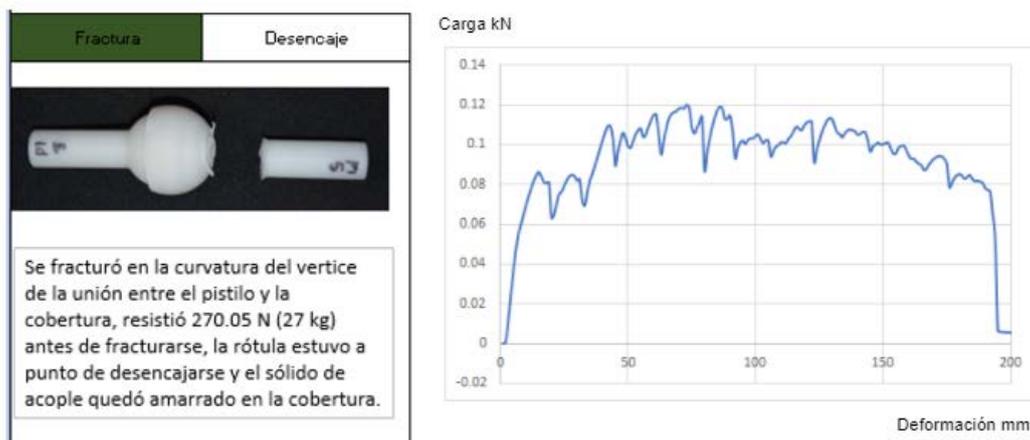


Figura 42 : Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 25 mm con 70% de cobertura.

Con 1/6 (66%) de la cobertura del acople:

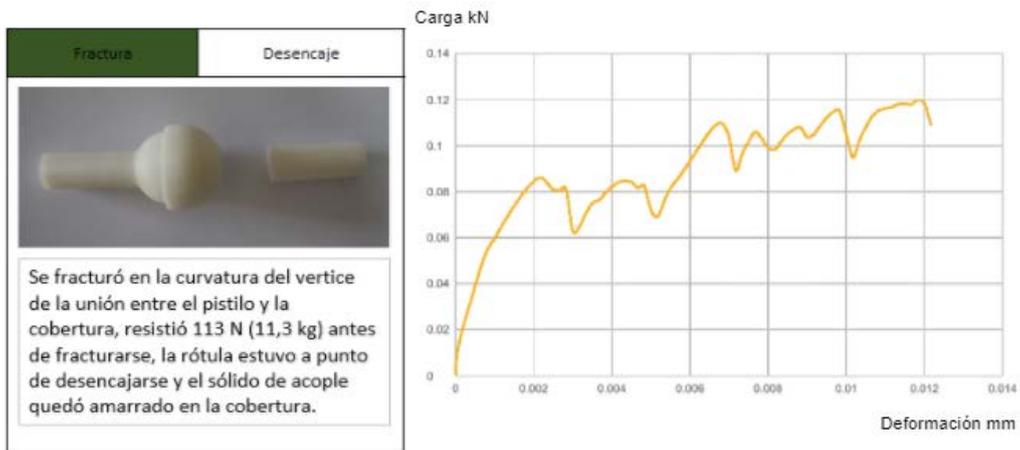


Figura 43 : Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 25 mm con 66 % de cobertura.

Con 1/7 (60%) de la cobertura del acople:

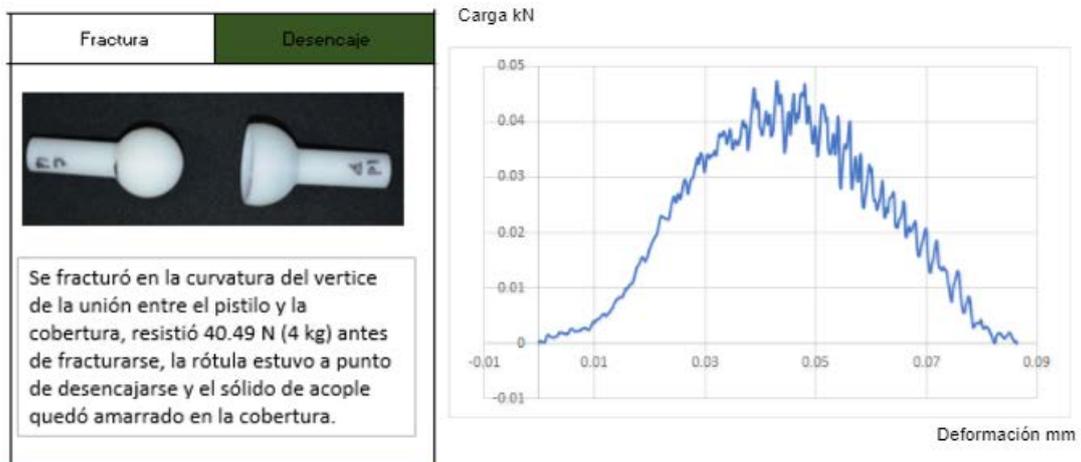


Figura 44 : Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 25 mm con 66 % de cobertura.

- **Rótula de 21 mm de diámetro sólido del acople:**

Con 1/5 (70%) de la cobertura del acople:

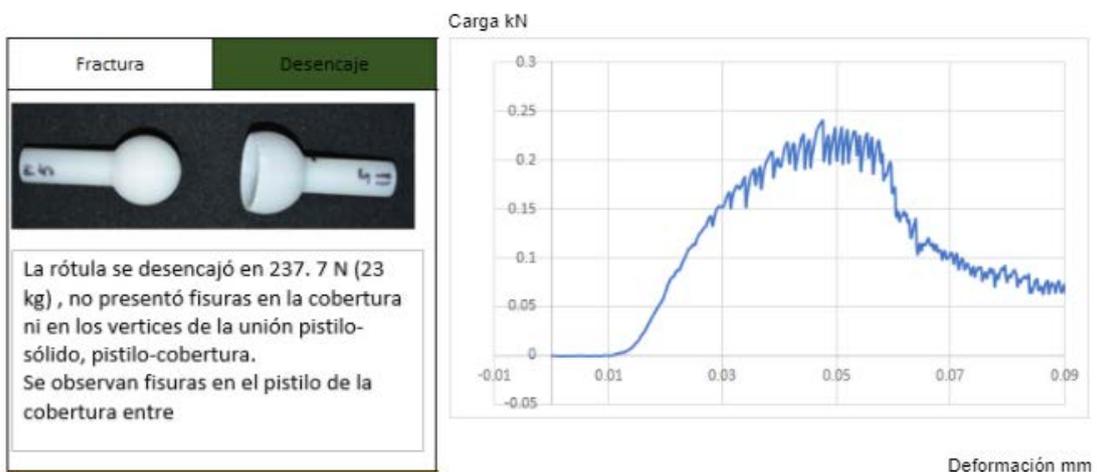


Figura 45 : Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 21 mm con 70 % de cobertura.

Con 1/6 (66%) de la cobertura del acople:

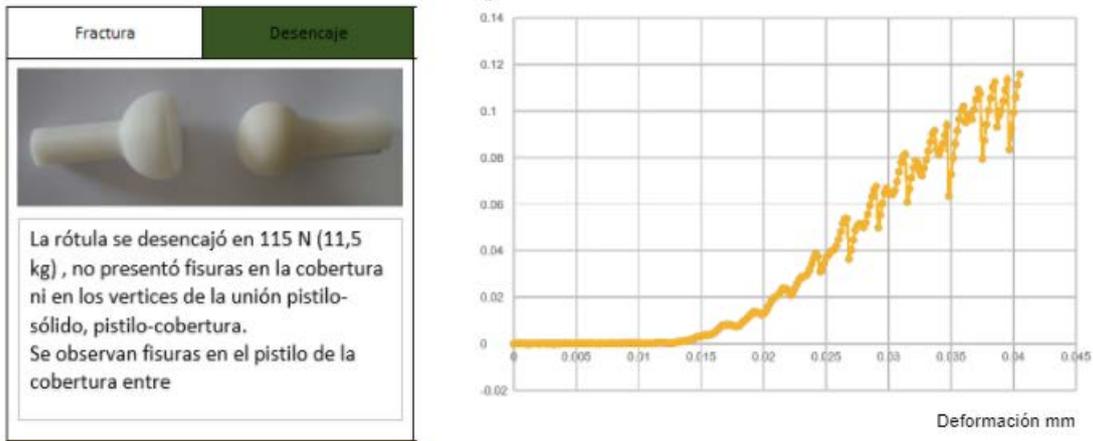


Figura 46: Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 21 mm con 66 % de cobertura.

Con 1/7 (60%) de la cobertura del acople:



Figura 47 : Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 21 mm con 60 % de cobertura.

- **Rótula de 17 mm de diámetro sólido del acople:**

Con 1/5 (70%) de la cobertura del acople:

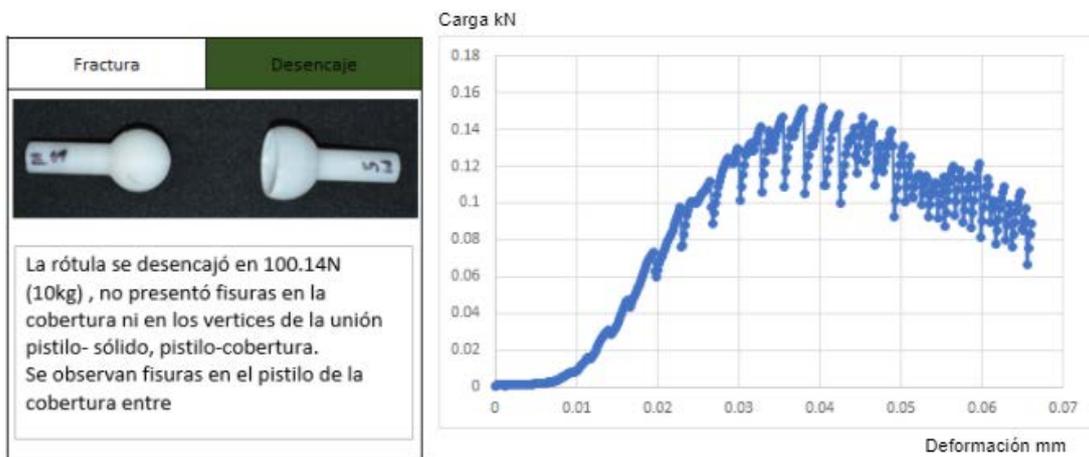


Figura 48: Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 17 mm con 70 % de cobertura.

Con 1/6 (66%) de la cobertura del acople:



Figura 49: Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 17 mm con 66 % de cobertura.

Con 1/7 (60%) de la cobertura del acople:

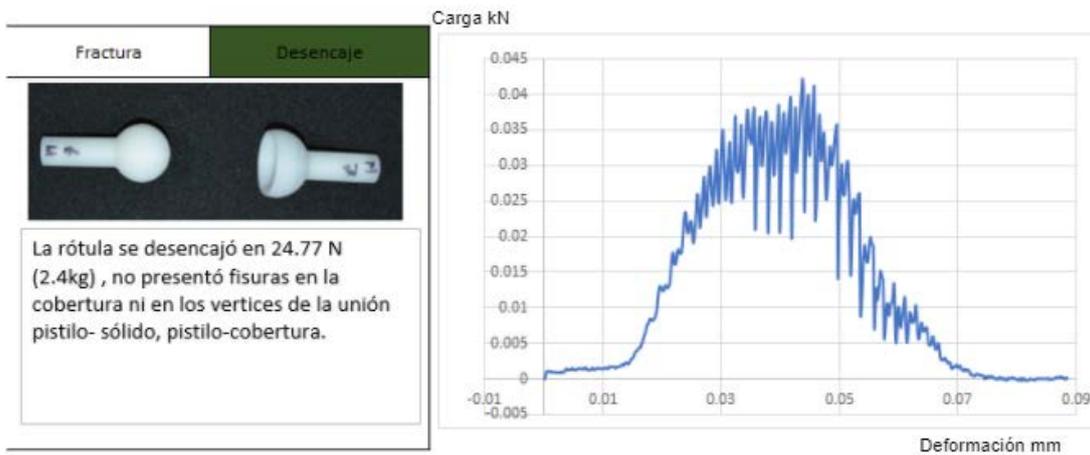


Figura 50 : Análisis y gráfica ensayo de tracción rótula 17 mm con 60 % de cobertura.

En la cuarta fase, después de haber consignado todos los datos obtenidos con la experimentación, se procedió a hacer una matriz en la cual pudimos concretar una relación entre el tamaño y la escala de la rótula y su eficiencia en cuanto a libertad de movimiento y resistencia al desencaje.

Escoger la relación que maximiza el desempeño funcional del mecanismo de rótula.	1. Definir los prototipos de más eficiencia
	2. Aplicación de prototipos en artefactos reales
	3. Evaluar el más eficaz funcionalmente
	4. Concluir aspectos que permiten su alta eficiencia

Figura 51: Fragmento de la matriz de objetivos y actividades, objetivo final.

En la siguiente matriz están consignado el promedio de fuerza que resiste cada rótula (el cual se obtuvo de las dos pruebas realizadas a cada prototipo) y el ángulo de libertad que estas permiten. **Ver anexo 7. Matriz comparativa**

	Fractura (P1) (P2)	Desencaje	Fractura (P1)	Desencaje (P2)	Fractura	Desencaje (P1) (P2)
25 mm						
	Resistió un promedio de 27 kg y permite un ángulo de 37.2º		Resistió un promedio de 11 kg y permite un ángulo de 41.2º		Resistió un promedio de 4 kg y permite un ángulo de 44º	

Figura 52: Fragmento de la matriz comparativa

5.1.2 Técnicas utilizadas para la obtención y recolección de información de tipo cuantitativa.

En el proyecto de investigación se utilizaron distintos métodos para obtener y registrar la información, como las matrices de doble entrada, gráficos de dispersión, fotografía, entre otros. En un principio se utilizaron bases de datos para referenciar y obtener información acerca la fabricación digital y sus alcances (información

evidenciada en el marco referencial y estado del arte), más adelante en la fase experimental el proyecto se apoya en las herramientas CAD/CAM para la modelación y previo análisis de los prototipos a fabricar con la impresora de deposición de hilo fundido; posterior a la fabricación de los prototipos se realizaron, en la maquina Instron de ensayos universales, pruebas de tracción uniaxial a las rótulas cuyos resultados fueron consignados en la matriz de registro de datos expuesta en el punto 5.3.1

5.2 MUESTRA

5.2.1 Individuos, objetos y/o situaciones estudiados

La muestra elegida sobre las cuales se hicieron las pruebas de análisis de ángulo de libertad y las pruebas de tracción está compuesta por 9 rótulas diferentes, para un total de 18: **Ver anexo 4. Fotografías rótulas**

- Rótulas 25 mm diámetro sólido de acople: 70% (2); 66% (2); 60% (2)



Figura 53: Muestras de las rótulas con diámetro del sólido de 25 mm

- Rótulas 21 mm diámetro sólido de acople: 70% (2); 66% (2); 60%

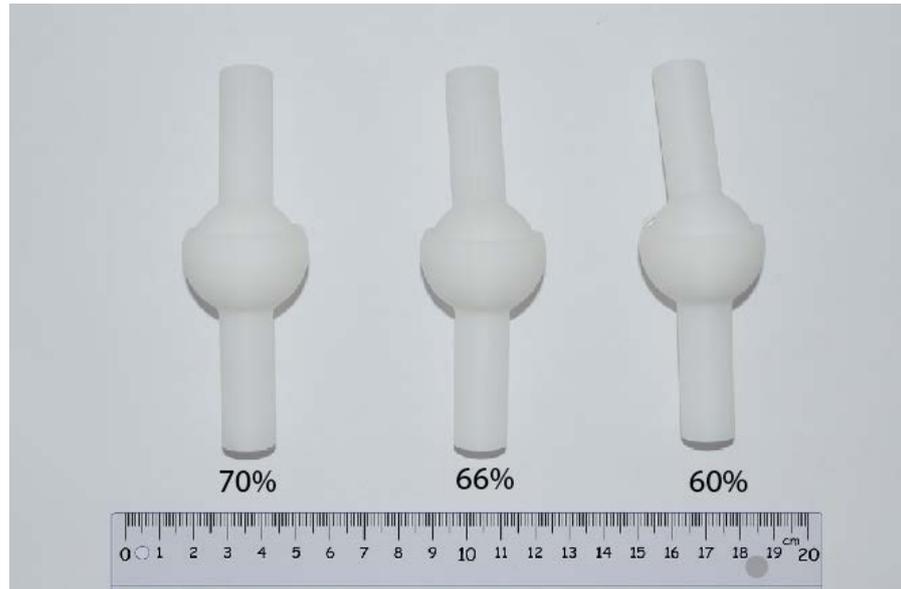
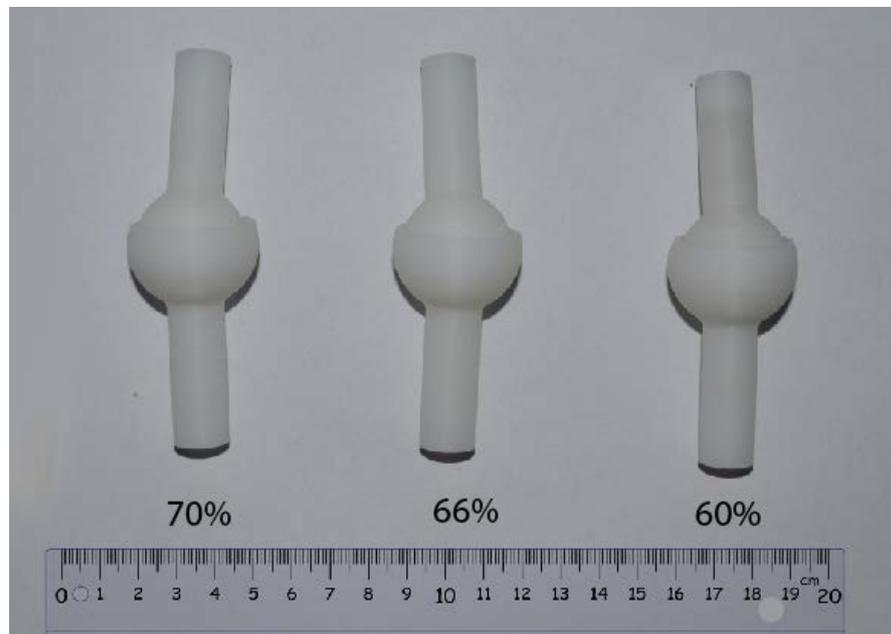


Figura 54: Muestras de las rótulas con diámetro del sólido de 21 mm

- Rótulas 17 mm diámetro sólido de acople: 70% (2); 66% (2); 60%



Figura

55: Muestras de las rótulas con diámetro del sólido de 17 mm

5.2.2 Descripción de los objetos de estudio

Las rótulas estudiadas están fabricadas en la máquina Zortrax M200 de FDM, se eligió para esta la configuración de mallado más estrecho y la resolución más alta de impresión.

Los prototipos están fabricados de ABS, compuestos por dos partes que conforman el mecanismo tipo rótula: el sólido de acople y la cobertura de acople las cuales no necesitaron unión manual, debido a la fabricación de estas como un mecanismo integral.

5.2.3 Justificación de la muestra seleccionada

Se seleccionó esta muestra para realizar las pruebas de tracción a partir de los análisis preliminares de los mecanismos impresos. (Ver proceso en el punto 5.1.1 de la metodología)

5.3 REGISTRO

5.3.1 Instrumentos de registro de información

Se realizaron para este proyecto de investigación 5 matrices donde se insertó la información de los resultados obtenidos en las fases de preliminares y post experimentales.

- Matriz de desfase o de cobertura: indica el desfase de la cobertura con respecto al centro del sólido de acople. **Anexo 2**

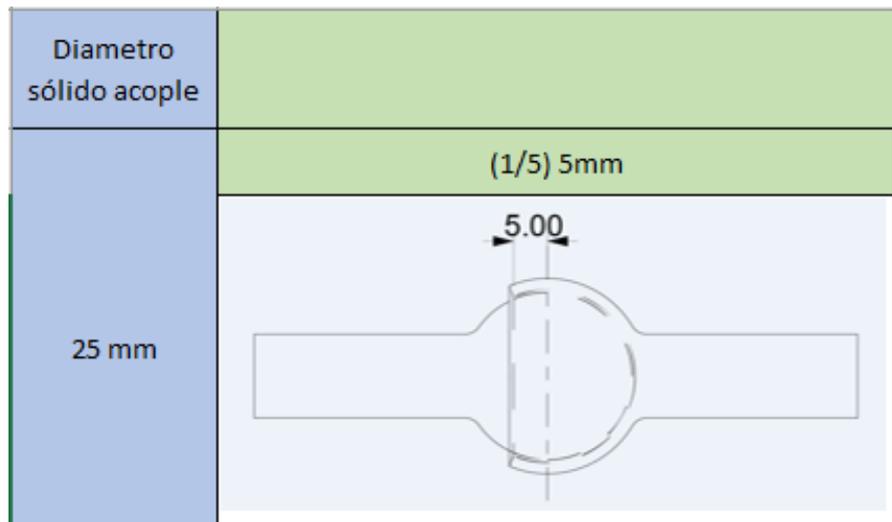


Figura 56 : Fragmento de la matriz indicativa de desfase.

- Matriz de ángulos de libertad: en esta se consignó la información obtenida al calcular el ángulo de libertad de cada una de las rótulas. **Anexo 5**

Matriz de registro de datos. Prueba 1 Ángulos de movimiento			
Diametro sólido	Desfase de la cobertura		
25 mm	(1/5) 5mm	(1/6) 4.16 mm	(1/7) 3.5mm
	Diámetro del pistilo (1/2) diametro de sólido acople: 12.5 mm		
21 mm	(1/5) 4.2 mm	(1/6) 3.5 mm	(1/7) 3mm
	Diámetro del pistilo (1/2) diametro de sólido acople: 10.5 mm		
17 mm	(1/5) 3.4 mm	(1/6) 2.83mm	(1/7) 2.4mm
	Diámetro del pistilo (1/2) diametro de sólido acople: 8.5 mm		
Calibre de la cobertura 1/15 diametro del acople			

Figura 57: Matriz de registro de ángulos de libertad.

- Matriz de análisis de elementos finitos: en esta se consignaron los resultados del análisis de elementos finitos realizado en *Scan & Solve* para *Rhinocheros*. **Anexo 3**

Matriz de registro de datos. Análisis de elementos finitos			
Diámetro sólido	Desfase de la cobertura		
	(1/5) 5mm	(1/6) 4.16 mm	(1/7) 3.5mm
25 mm			
	Diámetro del pistilo (1/2) diámetro de sólido acople: 12.5 mm		

Figura 58: Fragmento de matriz de registro de análisis de elementos finitos

- Matriz de resultados de prueba de tracción: en esta se consignaron los resultados de los ensayos de tracción realizados. **Anexo 6. Matriz de cargas**

Radio sólido acople	Aumento de la cobertura a partir del centro de la misma.					
	(1/5) 5mm		(1/6) 4.16 mm		(1/7) 3.5mm	
25 mm	Tipo de fallo (Fotografía y explicación, cuánto resistió)					
	Fractura	Desencaje	Fractura	Desencaje	Fractura	Desencaje
	Diámetro del pistilo (1/2) diámetro de sólido acople: 12.5 mm					

Figura 59: Fragmento de matriz de registro de resultados de la prueba de tracción

- Matriz de comparativa ángulos de libertad- prueba de tracción; a partir de la cual se determina la relación, en esta se consiga un promedio de la fuerza que resistieron ambas pruebas de tracción y el ángulo que permite la cobertura. **Anexo 7 Matriz comparativa**

25 mm	Fractura	Desencaje	Fractura	Desencaje
	Promedio y ángulo		Promedio y ángulo	

Figura 60: Fragmento de matriz comparativa

5.3.2 Manejo de los instrumentos

La información obtenida en las distintas fases fue consignada a medida que se avanzaba en la investigación; a continuación, se mostrará de manera breve como fue recopilada la información en las matrices.

- Matriz de ángulos de libertad: Análisis del ángulo de cada una de las rótulas en el software de modelación *Rhinocheros*, a medida que se obtiene el gráfico de cada rótula se ubica en el espacio correspondiente.

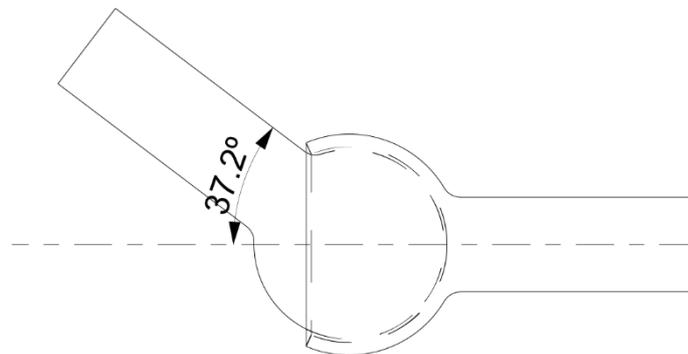


Figura 61: Ángulo de libertad analizado en el programa *Rhinocheros*, rótula de 25 mm con 70% de cobertura.

Una vez obtenido el gráfico se coloca en la matriz correspondiente en el espacio de la rótula respectiva.

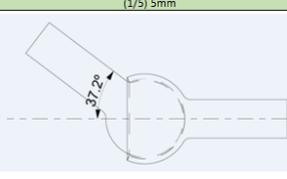
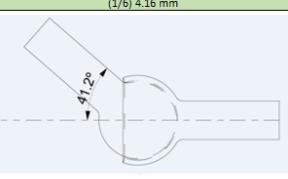
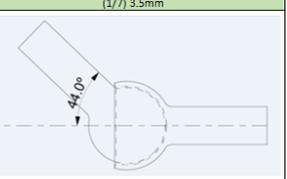
Diámetro sólido	Desfase de la cobertura		
	(1/5) 5mm	(1/6) 4.16 mm	(1/7) 3.5mm
25 mm			
Diámetro del pistilo (1/2) diámetro de sólido acople: 12.5 mm			

Figura 62: Fragmento de la matriz de ángulos de libertad con información consignada, rótula de 25 mm coberturas de 70%, 66% y 60%

- Matriz de análisis de elementos finitos: Se consignó el análisis realizado en Scan & Solve 2014 de las rótulas.

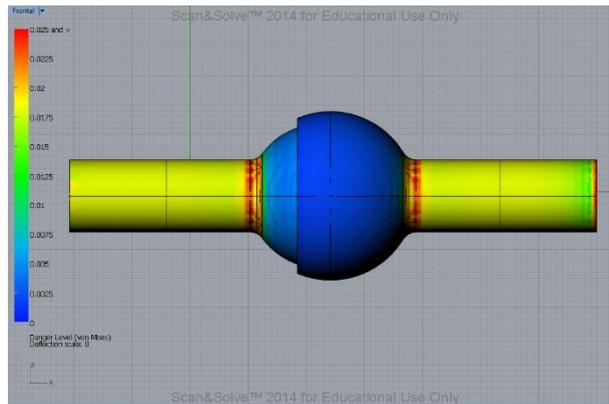


Figura 63: Análisis de elementos finitos, rótula 25 mm de diámetro en el sólido de acople, con un 70% en la cobertura del acople.

Una vez obtenido el análisis se consigna en la matriz en el espacio correspondiente.

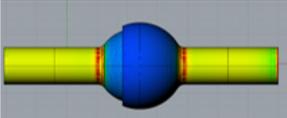
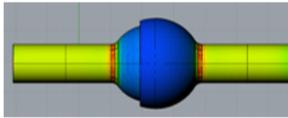
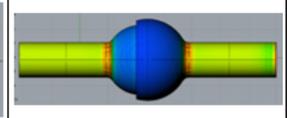
Diámetro sólido	Desfase de la cobertura		
	(1/5) 5mm	(1/6) 4.16 mm	(1/7) 3.5mm
25 mm			

Figura 64: Fragmento de la matriz de análisis de elementos finitos con información consignada, rótula de 25 mm coberturas de 70%, 66% y 60%

- Matriz de resultados de prueba de tracción: en esta se consignó la información de cada uno de los resultados de los ensayos realizados a las rótulas, a cada una se le puso una breve descripción de los hechos, el tipo de fallo que tuvo y la cantidad de energía que resistió.

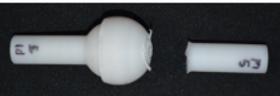
Diámetro sólido	(1/5) 5mm		(1/6) 4.16 mm		(1/7) 3.5mm	
	Tipo de fallo (Fotografía y explicación, cuánto resistió)					
	Fractura	Desencaje	Fractura	Desencaje	Fractura	Desencaje
25 mm						
	Se fracturó en la curvatura del vertice de la unión entre el pistilo y la cobertura, resistió 270.05 N (27 kg) antes de fracturarse, la rótula estuvo a punto de desencajarse y el sólido de acople quedó amarrado en la cobertura.		Se fracturó en la curvatura del vertice de la unión entre el pistilo y la cobertura, resistió 113 N (11,3 kg) antes de fracturarse, la rótula estuvo a punto de desencajarse y el sólido de acople quedó amarrado en la cobertura.		Se fracturó en la curvatura del vertice de la unión entre el pistilo y la cobertura, resistió 40.49 N (4 kg) antes de fracturarse, la rótula estuvo a punto de desencajarse y el sólido de acople quedó amarrado en la cobertura.	

Figura 65: Fragmento de la matriz de resultados de la prueba de tracción con información consignada, rótula de 25 mm coberturas de 70%, 66% y 60%

- Matriz comparativa: En esta se consignaron los resultados de ambas pruebas realizadas a las rótulas, análisis de ángulos y prueba de tracción, esta última puesta en un valor promediado de la prueba 1 y prueba 2 de tracción.



Figura 66: Fragmento de la matriz comparativa, rótula de 25 mm coberturas de 70%, 66% y 60%

5.4 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

La información obtenida en la fase experimental, fue consignada en las matrices expuestas anteriormente, con el objetivo de poder hacer la relación que determinará el mecanismo tipo rótula con mejor desempeño. En este caso los datos obtenidos son de tipo cuantitativos ya que la matriz donde se ordenan los datos obtenidos nos permite entender estos resultados numéricos en función de las características que debe tener el mecanismo para considerarse óptimo, en este caso el que resista mayor esfuerzo sin fracturarse o fisurarse y permita un mayor ángulo de libertad.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 RESULTADOS

- Los resultados obtenidos en el análisis de elementos finitos, son similares a los obtenidos en la prueba de tracción; las rótulas con mayor desfase presentaron, en el análisis, zonas de color rojo (que indican la concentración de esfuerzo) las cuales en la prueba de tracción se fracturaron justo en este punto.

La herramienta de análisis de elementos finitos fue presentada como una de las

ventajas de la fabricación digital, en este caso se valida la legitimidad de sus resultados, los cuales nos sirvieron como pronóstico sobre los resultados reales

Los hallazgos sobre la relación fueron consignados en la matriz comparativa consignada a continuación, a partir de la cual podemos deducir que:

- Se observa en la matriz que, aunque las rótulas de 25 mm con cobertura del 70% y 66%, son las que más fuerza resistieron, no se desencajaron y fueron propensas a fracturarse o fisurarse; al mismo tiempo son las rótulas que permitieron un menor grado de libertad.
- Las rótulas que guardaron una mejor relación en cuanto a la fuerza soportada y el ángulo permitido fueron las de 21 mm con el 66% de cobertura, las cuales no presentaron ninguna muestra de un posible fallo.

25 mm	Fractura (P1) (P2)	Desencaje	Fractura (P1)	Desencaje (P2)	Fractura	Desencaje (P1) (P2)
	Resistió un promedio de 27 kg y permite un ángulo de 37.2º		Resistió un promedio de 11 kg y permite un ángulo de 41.2º		Resistió un promedio de 4 kg y permite un ángulo de 44º	
21 mm	Fractura	Desencaje (P1-P2)	Fractura	Desencaje (P1-P2)	Fractura	Desencaje (P1-P2)
	Resistió un promedio de 23 kg y permite un ángulo de 37.2º		Resistió un promedio de 11 kg y permite un ángulo de 41.2º		Resistió un promedio de 4.8 kg y permite un ángulo de 44º	
17 mm	Fractura	Desencaje (P1-P2)	Fractura	Desencaje (P1-P2)	Fractura	Desencaje (P1-P2)
	Resistió un promedio de 10 kg y permite un ángulo de 37.2º		Resistió un promedio de 8.1 kg y permite un ángulo de 41.2º		Resistió un promedio de 2.4 kg y permite un ángulo de 44º	
P1= Prueba 1; P2= Prueba 2						

Figura 67: Rótula (Encerrada en el cuadro verde) que guarda una mejor relación fuerza resistencia- ángulo de libertad

6.2 DISCUSIÓN

La investigación ha generado unos resultados bastante útiles y consecuentes con lo planteado desde un comienzo. Y más que los resultados obtenidos, sin decir que son irrelevantes ni mucho menos, son las oportunidades que abren al futuro de la investigación. Permitir que el proyecto tenga un desarrollo es muy importante y permite que realmente todo esto tenga un sentido más allá del académico.

Desde el Diseño Industrial es importante abarcar aspectos conceptuales, técnicos y metodológicos, que se correlacionen con la profesión para poder dar pie a las bases teóricas que lo fundamentan. Por esta razón es importante tener en cuenta, entre tantas otras formas de producción la fabricación digital, la cual gracias a las ventajas que ofrece (costos, posibilidad de análisis preliminares, prototipos sin necesidad de moldes costosos, formas complejas por sus ángulos cerrados y no lineales, etc) en comparación con otras técnicas de producción, se ha venido insertando y aceptando en el mercado.

Precisamente esa aceptación del mercado se ha dado gracias al dinamismo que tienen la fabricación digital para entrar a ser contundente en sectores como el lúdico, robótico, salud, entre otros, donde estas tecnologías han sido utilizadas y aceptadas por el gran rendimiento obtenido.

Nuestro proyecto, basado en la aplicación de tecnologías de fabricación digital para la generación de mecanismos, está en la capacidad de permitir la inserción del sistema tipo rótula a sectores como los anteriormente mencionados de una manera aceptada. La rótula, por sí misma se puede resumir conceptualmente como un mecanismo dinámico. Después de esta investigación podemos concluir que éste este dinamismo es positivo en cuanto a que no solo es dinámica en su misma composición formal, sino también en la amplia posibilidad de ser dispuesta en mecanismos complejos, en partes de sistemas definidos, en elementos de tamaños variables, entre otros.

De esta manera entonces nuestro proyecto no se cierra en la etapa final del proceso investigativo sino que por el contrario, y siendo consecuente con la teoría investigativa, permite la continuación y abre brechas para posteriores trabajos de investigación. Amplía la visión de varios elementos tratados y genera bases para que no se quede anclada en una respuesta, sino que se extienda dentro del marco del tema investigativo.

7. CONCLUSIONES

7.1 HALLAZGOS MÁS IMPORTANTES DE LA INVESTIGACIÓN

Luego del análisis de los resultados podemos concluir que:

- La rótula que responde a la pregunta problematizadora es la que corresponde al diámetro de 21mm de sólido de acople con una cobertura del 66%, debido a la relación carga- ángulo de libertad.
- A mayor desfase de la cobertura del acople va a existir una mayor resistencia a la separación, pero permitirá un menor ángulo de movimiento
- A mayor escala de las medidas de la rótula, sin importar el tamaño de la cobertura del acople, hay un mayor esfuerzo generado debido al aumento del área de contacto entre las piezas que componen la rótula
- La deformación generada en la cobertura de acople al momento del desencaje de la rótula no supera el límite elástico del material, por lo que no se genera ninguna fisura ni deformación permanente en la pieza que afecte sus características.

7.2 DEFINICIÓN DE OPORTUNIDADES DE DISEÑO A PARTIR DE LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS PLANTEADOS.

A partir del proceso experimental, el cual nos permitió definir las características del mecanismo con el máximo desempeño (el que permite un mayor ángulo de movimiento y que en el desencaje no se fractura o fisura) este proyecto de investigación nos arrojó herramientas suficientes para desarrollar un producto ligado al ocio y a la lúdica.

8. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE DATOS

Molina, J. (2016). *Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi-rígido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes*. (Tesis inédita de Magister). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

Montaño, C; Llenera, J. (2016). *Construcción de un modelo de fundición mediante la utilización de tecnología de impresión 3D*. (Tesis Ing. Industrial). Escuela superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Ortega, A. (2014) *Investigación de las capacidades de la tecnología de manufactura aditiva FDM*. (Tesis maestría de ingeniería). Universidad nacional Autónoma de México. México D.F

Plataforma de apoyo a la docencia presencial. *Conceptos de Isotropía y Anisotropía*, Rescatado de: <https://www.u-cursos.cl/>

ASTM INTERNACIONAL. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. Recuperado de: Software de la máquina de tracción uniaxial INSTRON.

Sánchez, S (2015) *Descubriendo los plásticos de la impresión 3D*. Recuperado de: <http://www.3dnatives.com/es/plasticos-impresion-3d-22072015/>

Fernández, V. (2014) *La articulación mecánica*. Recuperado de: <http://mongrat.com/la-articulacion-mecanica/>

Articulación mecánica, Tipos de articulaciones, Rescatado de: http://coast.pink/articulacion-mecanica_3725736.html

MIT, *Laboratorio de autoensamblado*, rescatado de: <http://www.selfassemblylab.net/>

Fawaz Alabdullah (2016), *Fused deposition modeling* rescatado de: <https://www.ijser.org/researchpaper/Fused-Deposition-Modeling-FDM-Mechanism.pdf>

Hasso Plattner Institute, Alexandra Ion, Johannes Frohnhofen, Ludwig Wall, Robert Kovacs, Mirela Alistar, Jack Lindsay, Pedro Lopes, Hsiang-Ting Chen, and Patrick Baudisch (2016), *Metamaterial Mechanisms*, Rescatado de:

<http://www.3ders.org/articles/20160913-metamaterial-mechanisms-enables-a-3d-printer-to-mimic-machines-from-a-single-object.html>

Fabricación aditiva , clases , Rescatado de: <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/technologies/fdm-technology#sthash.DsCwxCG5.dpuf>

9. ANEXOS.

Los anexos que se mencionan a lo largo de la monografía se encuentran en la carpeta **Anexos**, del CD.