

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXTRUSOR DE ARCILLA PARA IMPRESIÓN 3D

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A CLAY EXTRUDER FOR 3D PRINTING.

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA EXTRUSORA DE ARGILA PARA IMPRESSÃO 3D

Fernando Jiménez Díaz
Nelson Iván Villamizar Cruz
Daniel Fernando Acosta Arcos
Daniel Humberto Maldonado Monroy ^a
Cristian Alfredo Gonzalez Molina

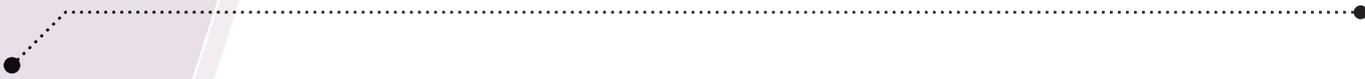
^a Ingeniería Mecánica, Grupo de Investigación y Desarrollo de Ingeniería en Nuevas Tecnologías (GIDINT), Universidad Santo Tomas, fernando.jimenez@usantoto.edu.co

^b Ingeniería Mecánica, Grupo de Investigación y Desarrollo de Ingeniería en Nuevas Tecnologías (GIDINT), Universidad Santo Tomas, nelson.villamizar@usantoto.edu.co

^c Ingeniería Mecánica, Grupo de Investigación y Desarrollo de Ingeniería en Nuevas Tecnologías (GIDINT) Universidad Santo Tomas, daniel.acostac@usantoto.edu.co

^d Ingeniería Mecánica, Grupo de Investigación y Desarrollo de Ingeniería en Nuevas Tecnologías (GIDINT) Universidad Santo Tomas, daniel.maldonado@usantoto.edu.co

^e Ingeniería Mecánica, Grupo de Investigación y Desarrollo de Ingeniería en Nuevas Tecnologías (GIDINT), Universidad Santo Tomas, cristian.gonzalez@usantoto.edu.co



Resumen— El objetivo de esta investigación fue diseñar y construir un extrusor de arcilla para impresión 3d, en respuesta y como alternativa a los altos costos que presentan los materiales convencionales (PLA, ABS). Con esto se ampliaría el campo de acción de la impresión 3d hacia otros sectores de la industria y la artesanía. El desarrollo de este artículo se dividió en tres fases: se plantearon alternativas de sistemas mecánicos, hasta llegar al modelo óptimo de extrusor que cumpla el objetivo propuesto. Con el modelo elegido se realizó un dimensionamiento en CAD (dibujo asistido por computadora) de la estructura y subsistemas. Después se realiza una simulación en CAE (Ingeniería asistida por computadora) a fin de encontrar los puntos críticos del proceso de extrusión y finalmente se realiza la construcción del prototipo.

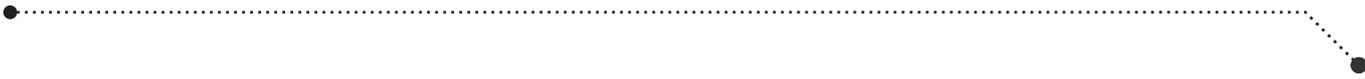
Se realizaron dos pruebas de funcionamiento una de control semiautomático (desplazamiento de boquilla manual y extrusión controlada) y otra completamente controlada con las cuales se comprobó el cumplimiento de las expectativas funcionales y económicas planteadas, llegando a extruir un volumen definido de material, sin embargo, resulta poco práctico para fabricación de piezas de gran volumen ya que no cuenta con alimentación continua de material.

Palabras clave— Impresión 3D, arcilla, extrusor, CAD, CAE, boquillas intercambiables

Abstract— The objective of this research was to design and build a clay extruder for 3d printing, in response and as an alternative to the high costs presented by conventional materials (PLA, ABS). With this, the field of action of 3d printing would expand to other sectors of industry and crafts. The development of this article was divided into three phases: alternatives of mechanical systems were proposed, until reaching the optimal extruder model that meets the proposed objective. With the chosen model, a CAD (Computer Aided Design) dimensioning of the structure and subsystems was carried out. Then a simulation is carried out in CAE (Computer Aided Engineering) in order to find the critics of the extrusion process and finally the construction of the prototype is carried out.

Two performance tests were carried out, one of semiautomatic control (manual nozzle displacement and controlled extrusion) and the other completely controlled with which the fulfillment of the functional and economic expectations was verified, reaching extrude a defined volume of material, however, it is impractical for the manufacture of large volume parts since it does not have a continuous material feed.

Keywords— 3d printing, clay, extruder, CAD, CAE, interchangeable nozzles



Resumo— O objetivo desta pesquisa foi projetar e construir uma extrusora de argila para impressão 3d, em resposta e como alternativa aos altos custos apresentados pelos materiais convencionais (PLA, ABS). Com isso, o campo de ação da impressão 3d se expandiria para outros setores da indústria e do artesanato. O desenvolvimento deste artigo foi dividido em três fases: foram propostas alternativas de sistemas mecânicos, até chegar ao modelo de extrusora ideal que atendesse ao objetivo proposto. Com o modelo escolhido, foi realizado um dimensionamento CAD (desenho auxiliado por computador) da estrutura e subsistemas. Em seguida, é realizada uma simulação no CAE (Engenharia auxiliada por computador) para encontrar os críticos do processo de extrusão e, por fim, é realizada a construção do protótipo.

Foram realizados dois testes de desempenho, um de controle semiautomático (deslocamento manual do bico e extrusão controlada) e outro completamente controlado com o qual se verificou o cumprimento das expectativas funcionais e econômicas, atingindo um volume definido de material extrudado, porém, é impraticável para a fabricação de peças de grande volume, pois não possui alimentação contínua de material.

Palavras chave— Impressão 3d, argila, extrusora, CAD, CAE, bicos intercambiáveis

I. INTRODUCCION

Cuando se habla de impresión 3D se hace referencia a un proceso, definido por (Anukiruthika, Moses, & Anandharamakrishnan, 2020) como la técnica de fabricación de piezas capa por capa; este concepto se complementa con la definición de extrusión en impresión 3D que es planteada como (Dick, Bhandari, & Prakash, 2019) "consiste en expulsar el material a través de la boquilla de forma controlada digitalmente".

La técnica de extrusión por medio de impresión 3D no es una tecnología nueva, pues, según (López, 2016) "el inicio de la impresión 3D se remonta a 1976; [...] Desde entonces, la tecnología ha evolucionado para pasar de la impresión con tinta a la impresión con materiales" a pesar de ello, en la actualidad no cualquier persona tiene acceso a la impresión 3D como servicio.

La impresión 3D (Atos, 2014) puede ser usada en cualquier parte del proceso productivo de una empresa, además es útil desde procesos de baja producción hasta producción a gran escala. En la industria representa por lo general una herramienta importante en la reducción de costos de producción, debido a la visualización e implementación de modelos tridimensionales en material termoplástico depositado por medio de extrusión. Dicha visualización facilita determinar el diseño óptimo para una pieza según su función antes de que este pase a línea de producción, permitiendo evaluar principalmente su resistencia y

dimensiones, dando la posibilidad de realizar las correcciones pertinentes de ser necesarias en un lapso de tiempo muy reducido. En algunos casos, es factible implementar piezas directamente generadas por impresión 3D, bien sea por que la complejidad de su geometría dificulta la implementación de un proceso de manufactura por arranque de viruta (cuando es necesario preservar la integridad de un elemento en específico, facilitando el mantenimiento de sistemas mecánicos), o por su baja responsabilidad en el funcionamiento del sistema que la requiera.

En cuanto a la utilidad de los modelos generados por medio de impresión 3D en arcilla, se puede presentar mayor resistencia en el material por medio de aditamentos como lo menciona (Yerovi, 2018) "morteros con resistencias a la compresión de 21.29 MPa con buena trabajabilidad sin escurrimientos excesivos y tiempos de inicio de fraguado inferiores a 1 hora una alta resistencia a la compresibilidad" por lo tanto será posible imprimir piezas útiles en la industria de tal modo que lleguen a reemplazar piezas mecánicas igualmente frágiles pero de condiciones difíciles de mecanizado tales como soportes, bancadas y en general elementos que soportan altas cargas estáticas.

Teniendo en cuenta estos factores es posible hacer énfasis en la industria de la fundición, ya que la arcilla como material cerámico presenta las características necesarias para la fabricación de moldes y preformas, que con la ayuda de la

impresión 3D pueden ser de geometrías variadas y complejas. Como lo indica (Chen et al., 2019) las propiedades que hacen que la arcilla como material cerámico sea muy versátil son: tienen alta resistencia mecánica, alto rendimiento térmico, buena estabilidad térmica y química.

La universidad Santo Tomás cuenta con dos impresoras 3D, estas funcionan con material termoplástico (PLA y/o ABS) y se encuentran disponibles para las prácticas relacionadas a los procesos de manufactura por lo cual serán de gran apoyo para el desarrollo del prototipo de extrusor.

Por este motivo, el artículo se sustenta en la posibilidad de reducir el costo de material de extrusión por medio de la obtención local e implementación de arcilla en el prototipado rápido. Contribuyendo de este modo al cuidado del medio ambiente y aprovechamiento de recursos naturales como alternativas viables para la impresión 3D. Es por este motivo que la presente investigación se dedica a implementar el uso de material cerámico obtenido en la ciudad de Tunja y sus alrededores para la extrusión de modelos tridimensionales de moldes y preformas para fundición.

A partir del enfoque planteado se desprenden dos grandes ejes de investigación: ¿Cómo extruir arcilla a bajo costo para impresión 3D? y ¿Qué propiedades debe tener la arcilla para poder ser empleada en impresión 3D? siendo el primero el tema principal para el desarrollo de este artículo y dejando

para una posterior investigación la caracterización de este material.

II. MATERIALES Y METODOS

Para el desarrollo de este artículo se realizó un levantamiento bibliográfico en torno al tema de impresión 3D y prototipado rápido que permite ver la aplicación de la impresión 3D en distintos ámbitos. En base a esta información fue posible dividir el desarrollo de la investigación en dos fases: Una fase de diseño donde se plantean diferentes alternativas de sistemas mecánicos, hasta llegar al modelo óptimo de extrusor que cumpla con el objetivo de extruir arcilla a bajo costo. Con el modelo elegido se realizó un dimensionamiento en CAD de estructura y subsistemas. Para finalizar esta etapa, se realiza una simulación en CAE a fin de encontrar los puntos críticos del proceso de extrusión. En la segunda fase se construye el prototipo seleccionado.

A) Diseño

La etapa de diseño se dividió en cuatro etapas fundamentales: alternativas de sistemas mecánicos y elección, modelado CAD, dimensionado y adaptación, simulación CAE de líneas de corriente:

1) Alternativas de sistemas mecánicos

Para la elección del sistema se realizó una breve evaluación de las posibles alternativas de transporte de arcilla, por lo cual se tuvieron en cuenta las ventajas y desventajas de cada alternativa, para poder limitar los sistemas se seleccionaron

tres diferentes sistemas de transmisión mecánica: Piñón-Cremallera, Tornillo de potencia y Tornillo Sinfín. Los dos primeros cuentan con un sistema de cilindro pistón y el último genera la presión necesaria debido a la reducción cónica que presenta a lo largo de su geometría. A fin de elegir el sistema más adecuado según los requerimientos de la investigación se tomaron en cuenta los siguientes criterios de selección: costo, complejidad de fabricación, eficiencia y adaptabilidad a la impresora que posee la universidad. En la Tabla 1 se presentan todas estas características asociadas a una calificación cualitativa.

Tabla 1. Alternativas de transporte de material.

SISTEMAS DE TRANSPORTE DE MATERIAL			
	PIÑÓN-CREMALLERA	TORNILLO DE POTENCIA	TORNILLO SINFIN
Costos	Alto	Bajo	Alto
Fabricación	Medi	Baj	Alt
Eficienci	Medi	Medi	Máxim
Adaptabilida	Complej	Medi	Sencill

Fuente: Autores

Después del análisis efectuado se determina que la mejor opción es el tornillo de potencia, debido a que este tiene las características más óptimas para el proyecto desarrollado. Se selecciona debido a que este tiene un bajo precio de fabricación, puesto que no es necesario hacer procesos de alta complejidad para su construcción, tiene una efectividad media debido a que como lo indica (Velilla Diaz, 2008) “[...] consiguen una mejor uniformidad en la velocidad y presión en toda la sección de salida, sin embargo, no otorga un flujo continuo” y finalmente no se tienen

grandes complicaciones al adaptarla a la impresora que se posee en la universidad.

2) Modelado y dimensionado

Se procede a realizar el modelo del sistema seleccionado (Tornillo de potencia) en el software de diseño Autodesk Inventor. A partir de este se inicia con un dimensionado general de la estructura de soporte, la cual daría los parámetros para el posicionamiento del cilindro y los demás subsistemas. En esta etapa se pudo determinar los materiales y la cantidad necesaria para la construcción del prototipo.



Figura 1. Ensamble extrusor.

Fuente: Autores

Como se puede ver en la figura 1. El prototipo cuenta con 4 soportes fijos los cuales dan rigidez a la estructura que consta de 3 tapas cuadradas que delimitan el subsistema de transmisión y de compresión. El prototipo cuenta con las medidas descritas en la Tabla 2.

Tabla 2. Ficha técnica del extrusor.

FICHA TÉCNICA PROTOTIPO	
Alto	428 mm
Ancho	146 mm
Peso	9.1 kg
Centro de gravedad	58,248 mm x 187,756 mm

Fuente: autores

En el subsistema de transmisión se implementó una transmisión por engranajes de diente recto con una relación de transmisión igual a 3 en el cual se usa un piñón de transmisión de potencia (situado en el motor paso a paso) con 20 dientes y un piñón conducido (situado sobre el tornillo que impulsa el pistón) con 60 dientes. Para este subsistema se utiliza un motor paso a paso Nema 23 con un par torsional de 300 N*cm (Stepperonline, s.f)

(Universidad de Cantabria, s.f). Un sistema de transmisión por piñones es muy eficiente al momento de hablar de constancia en la relación de transmisión. En este caso esta constancia de relación es esencial con el fin de tener una extrusión de material constante ya que, de no ser así, no se obtendrán resultados satisfactorios en la impresión 3D.

Mediante el subsistema de compresión se logra convertir el movimiento de rotación del motor en movimiento lineal como se ve en la figura 2. esto con la implementación de una barra roscada de $\frac{3}{8}$ " UNC con un pistón en su extremo y una tuerca situada y bloqueada en el centro del piñón conducido, el movimiento lineal obtenido generará un desplazamiento sobre el pistón y así mismo sobre el material cargado en el cilindro, con esto se logra la inyección a lo largo de la manguera y

el sistema de purgado e inyección hasta lograr generar hilos de material en la salida del sistema.

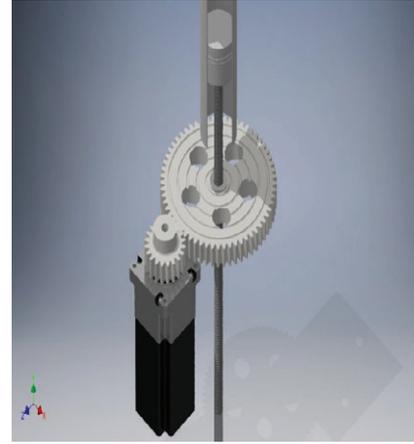


Figura 2. Ensamble de subsistemas.

Fuente: Autor

El sistema de purgado e inyección (Figura 3) se encuentra al final del recorrido que debe realizar el material desde el cilindro, donde se acumula eliminando los vacíos que se generan a lo largo del cilindro y la manguera mediante una abertura que permite el escape de aire, pero no del material. De este modo se garantiza un flujo continuo de arcilla a la salida. Este subsistema cuenta con un sistema de boquillas intercambiables.



Figura 3. Subsistema boquilla intercambiable.

Fuente: Autor

El sistema de purgado e inyección cuenta con boquillas intercambiables que a su vez presentan un sistema de sujeción por rosca, con lo que se vuelven sustituible de forma sencilla debido a que según (Xu et al., 2019) “el proceso actual de impresión 3D ha encontrado dificultades para fabricar componentes arquitectónicos con ornamentaciones y características detalladas en su superficie debido a la forma de modelado de deposición fundida (FDM) que genera filamentos de ancho fijo.” Gracias a que las boquillas son intercambiables estas pueden generar geometrías variadas, y complejas, así como diámetros distintos. Para este caso en específico se diseñó una boquilla con sección de salida circular de 4mm de diámetro debido al volumen limitado de almacenamiento del cilindro. Por otro lado, en el apartado electrónico y eléctrico se utilizarán motores paso a paso los cuales impulsarán el tornillo sin fin, se seleccionaron este tipo de motores ya que proporcionan un alto torque al momento de su funcionamiento.

Por último, se diseñó el soporte que permitiera la adaptación del extrusor de arcilla a la impresora 3D que cuenta la facultad de ingeniería mecánica de la universidad Santo Tomas seccional Tunja. El anclaje entre el extrusor y la impresora se realiza por un ensamble tipo cola de milano (Figura 4), con el fin de realizar un cambio fácil y rápido entre extrusor de PLA y la boquilla del extrusor de arcilla.

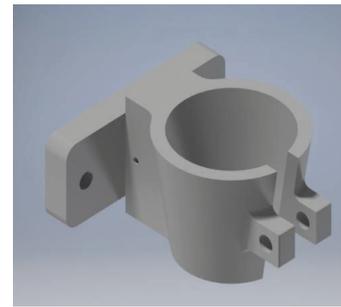


Figura 4. Soporte para extrusor de arcilla.
Fuente: Autores

3) Análisis de líneas de corriente

• Modelo Matemático

Para poder hacer el análisis de líneas de fluido se necesitó plantear el cálculo de presión que ejerce el pistón sobre la arcilla, para este modelo se plantea la siguiente ecuación:

$$p = \frac{32 * T * V_1 * a}{0.025m * \pi * D_p^2 * B * ds^2 * 1s} * n_E * n_T * n_M$$

donde “p” es la presión (Pa) que se ejerce sobre la arcilla, T es el torque en (N*m) ejercido por el motor paso a paso, “V₁” (m³) es el volumen depositado en 1 segundo por la boquilla, “a” son los hilos por pulgada que presenta la rosca que se utilizó, “D_p” (m) Diámetro del pistón, “B” (m/s) velocidad de depósito, “ds” (m) diámetro a la salida de la boquilla, “n_E” es la eficiencia que existe entre los engranajes, “n_T” es la eficiencia en el tornillo y “n_M” es la eficiencia del motor paso a paso. Para poder encontrar la eficiencia de los engranes se utiliza la tabla 3. Donde se toma un valor de 90% de eficiencia

Tabla 3. Eficiencia de transmisión de potenci

Transmisión	Eficienci	Causa Perdida Potenci
Ejes	98% - 100%	Fricción En Cojinetes, Elasticidad Torsional
Bandas en "V"	75% - 90%	Fricción, Deslizamiento Entre Banda Y Pol
Bandas Dentadas	92% - 98%	Fricción En Cojinetes
Cadenas de Rodillos	95% - 98%	Fricción, Vibración, Desgaste Por Impacto
Engranajes	85% - 90%	Fricción, Deslizamiento Vibración

Fuente. (Castaño Posada & Moreno Ramírez, 2004)

Para la eficiencia del tornillo se utilizó la información obtenida en (Blandón, 2010). Donde indica que para ángulos de hélice de 0.8° correspondientes a tornillos acmé el valor aproximado de eficiencia será del 80%, se asumen tornillos acmé para tener un acercamiento al modelo planteado

Para la eficiencia que tiene el motor paso a paso no se encuentra un valor exacto por lo tanto en base a (Staticboards, 2016)" los motores paso a paso derrochan bastante energía, comparados con los motores eléctricos convencionales. Por eso, consumen más amperios que los motores normales." Teniendo en cuenta esta afirmación se termina tomando la decisión de utilizar un valor de eficiencia del 40%.

En el cálculo de la presión ejercida por el pistón se tienen los siguientes valores $T=3$ (N*m), $V_1=4.39 \times 10^{-4}$ m³, $\alpha=16$ hilos por pulgada, $D_p=0.037$ (m), $B=0.035$ m/s, $ds=0.004$ m, $n_{engranes} = 0.9$ $n_{tornillo}=0.8$, $n_{motor} = 0.4$.

$$p = \frac{32 * 3 * 4,39 \times 10^{-4} * 16}{0,025m * \pi * 0,037^2 * 0,035 * 0,001^2 * 1s * 0,8 * 0,4} * 0,9$$

$$p = 3'225.275,868 \text{ Pa} \approx 31,83 \text{ atm}$$

• Simulación en software CAE

Para poder obtener los puntos críticos del diseño se realizó un análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) se realizó en el software de diseño CAD y CAE ANSYS 2019 R2, en este ejecutó una simulación para poder ver las líneas de corriente y poder obtener lo puntos críticos. Para esta simulación se tuvieron las siguientes consideraciones:

a. Debido a que no se tiene suficientes propiedades del material a

implementar debido a que este no es el objetivo de este artículo, se realizó una simulación muy cercana a la real teniendo como material de referencia la glicerina.

b. Ya que no se encuentra incluido el material en la biblioteca de ANSYS, Se genera un nuevo material al cual se asignan las siguientes propiedades: (Mott, 2006), viscosidad dinámica $\mu=0.96$ Pa*s, densidad $\rho = 1258$ kg/m³ y de (Cengel, 2014) el calor específico $C_p = 2.32$ kJ/kg*K

- c. Flujo Laminar
- d. Sistema Continuo

Para poder simplificar la simulación, se analizó el comportamiento del fluido en el interior del cilindro y su salida hacia la manguera.

En la simulación se tiene en cuenta el principio descrito por (Grover, 2007) “Para ángulos menores, el área superficial del troquel aumenta, así como también la fricción en la interfaz troquel-tocho. Mayor fricción significa mayor fuerza en el pisón”. En este caso siendo la arcilla el tocho que fluye dentro del cilindro y el troquel la tapa superior del sistema la cual tiene un ángulo muy cercano a los 90°. Se puede observar en la figura 6. como un ángulo alto de troquel aumenta la fuerza del pisón. Por lo cual se selección como zona crítica del sistema la salida del cilindro de carga.

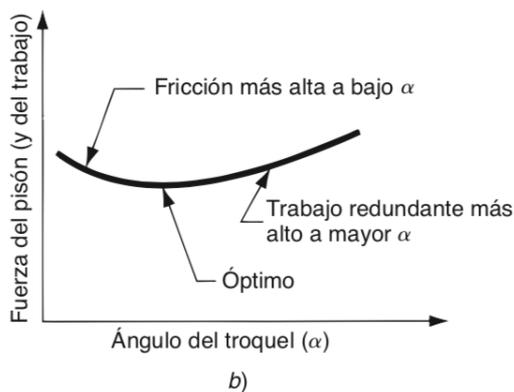


Figura 5. Efecto del ángulo del troquel sobre la fuerza del pisón.
Fuente: (Grover, 2007)

Como condiciones de frontera se utilizan las presiones a la entrada y salida del cilindro. La presión a la salida del cilindro

es atmosférica y a la entrada como se pudo observar en el modelo matemático se obtuvo una presión de 31.83 atm. Se debe agregar que se utilizó una malla con forma de tetraedros, además se utilizaron 2428 nodos y 10889 elementos para este análisis. Teniendo como resultado la Figura 6.

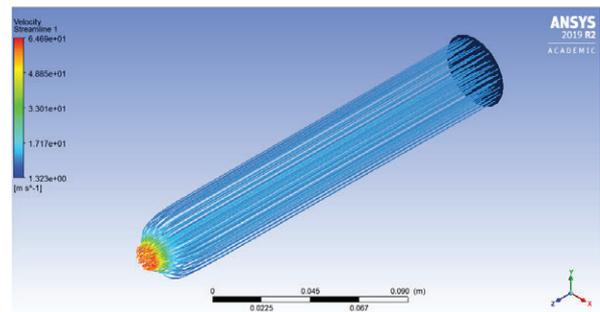


Figura 6. Resultados de velocidad, visualización en líneas de corriente
Fuente: Autor

Según las líneas de velocidad el punto más crítico en el cilindro es en la salida, debido a que esta tiene una reducción abrupta de más de 2 veces el tamaño del cilindro. Además, esta no tiene una reducción progresiva en la salida sino una en donde el ángulo de troquel es de aproximadamente 90°. En consecuencia, si se presenta algún tipo de taponamiento en alguna parte del sistema de extrusión la salida del cilindro será donde se generará la mayor presión en el sistema.

B) CONSTRUCCIÓN

La construcción del extrusor de arcilla se llevó a cabo a partir del diseño planteado teniendo en cuenta todos los sistemas necesarios para su funcionamiento. La estructura encargada de contener y sostener cada uno de los sistemas

implementados, se fabricó en ángulos de 1 in x ½ in de acero y lamina de 8 mm. Además, utiliza elementos de sujeción en acero tales como tuercas, tornillos y barras roscadas, obteniendo un montaje de gran similitud a un cilindro hidráulico de construcción por tirantes. La cual se puede observar en la figura 7.

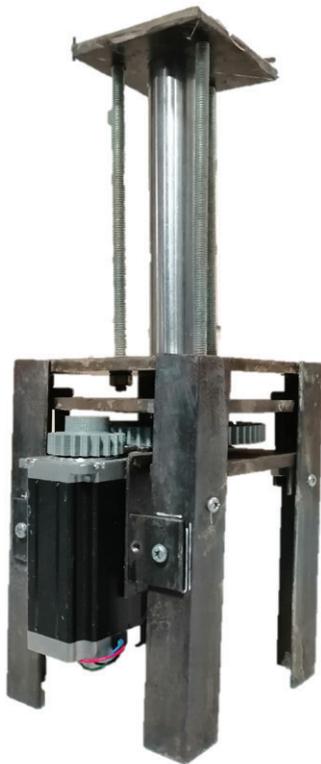


Figura 7. Estructura extrusora para impresión 3D.
Fuente: Autores

El sistema de adaptación, al igual que el de engranajes rectos fue construido por medio de impresión 3D con ABS como material depositado debido a la alta resistencia que este ofrece a cargas de tracción en comparación al PLA pues, según (Palacio Alamillo, 2017) "gracias a su extremada resistencia y su pequeña flexibilidad hace que sea el material perfecto para infinidad de aplicaciones industriales" y debido a que la impresión

resulta ser una alternativa rápida y sencilla al mecanizado de este tipo de elementos.

En cuanto al sistema de compresión se encuentran dos subsistemas complementarios, los cuales son: el sistema de cilindro-pistón y el sistema del conjunto de un tornillo y su respectiva tuerca para realizar la transmisión de potencia. En este se tiene un cilindro de acero inoxidable, (Lasso Eduardo, 2007) con el fin de disponer una alta resistencia a la corrosión, debido a que estará sometido a un ambiente altamente corrosivo. Otra de las ventajas del material seleccionado para el cilindro son sus acabados superficiales, ya que comercialmente se pueden encontrar tubos de acero inoxidable con una baja rugosidad internamente, con lo cual se reducirá la fricción dentro del sistema y se tendrán menores pérdidas de energía.

Dentro del cilindro se posiciona un pistón fabricado en aluminio, que se encarga de presionar el material que se quiera inyectar, esto mediante una fuerza ejercida por todo el sistema de transmisión. Es importante en este sistema la implementación de un sellado por medio de un o 'ring el cual garantiza que no se escape el material en dirección contraria, es decir, que se devuelva el material por una presión excesiva y falta de sellado.

Por otra parte, el sistema de purgado e inyección fue fabricado por medio de mecanizado por arranque de viruta en torno paralelo, en aluminio. Consta de dos partes, una cámara con cono externo e

interno y una tapa roscada que recibe el material desplazado por el pistón a través de una manguera plástica de ½" x 1m asegurada con abrazaderas metálicas a los elementos de sujeción roscada que la aseguran en sus extremos a la placa del pistón y a la boquilla.

Continuando la construcción en el orden del diseño, se decide usar un sistema de transmisión por piñones, el cual se puede observar en la Figura 8. A fin de transmitir la potencia entregada por el motor a un tornillo de potencia encargado de convertir el movimiento rotacional que se tiene en los piñones en movimiento lineal, con esto se logra generar una fuerza sobre el pistón y de la misma forma sobre el material contenido en el cilindro. En cuanto a la parte estructural se sitúan placas y ángulos (en acero) preparadas de forma específica para contener los extremos del cilindro y dar sostenimiento al resto de subsistemas de la máquina.

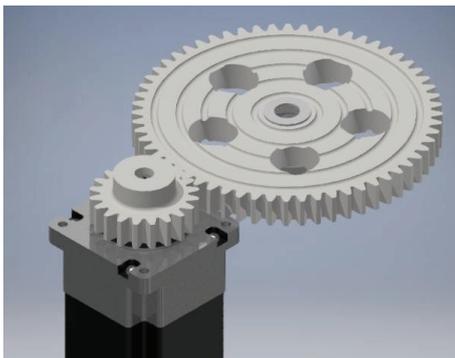


Figura 8. Subsistema de transmisión de engranajes
Fuente: Autores

Por último, se tiene un motor paso a paso (Nema 23), el funcionamiento es descrito por (Sun, Zhou, Yan, Huang, & Lin, 2018)" El

motor paso a paso está programado para generar el movimiento del revestimiento, controlar la posición del émbolo de la jeringa y empujar el material alimenticio fuera de la boquilla." pero en este caso en lugar de alimento será arcilla.

III. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para comprobar el funcionamiento del prototipo construido, inicialmente se preparó la arcilla empíricamente y sin tamizado de tal manera que llenara por completo el sistema, desde el cilindro, pasando por la manguera hasta llegar a la salida de la boquilla. Contando con los materiales necesarios el prototipo debió ser sometido a dos pruebas que garantizaran algunas características importantes que debe poseer el material a la hora de generar una figura tridimensional por extrusión en impresión 3D.

La primera prueba consistió en programar mediante un Arduino el motor paso a paso NEMA 23 con el fin de controlar el desplazamiento vertical del pistón, mientras se realizaba el movimiento del sistema de purgado e inyección de manera manual. Con esta prueba fue posible determinar la continuidad de flujo a la salida de la boquilla y comprobar el correcto funcionamiento del sistema de purgado, ya que es notoria la reducción de aire presente en la manguera en el momento de la extrusión. En la figura 9 es posible evidenciar la continuidad de material depositado.



Figura 9. Extrusión con motor Nema 23 y movimientos manuales.
Fuente: Autores

La siguiente prueba consistió en la automatización de los desplazamientos de la boquilla de extrusión, acoplando la extrusora a la impresora 3d con que cuenta la facultad de ingeniería mecánica de la universidad Santo Tomás. El ensamble entre el extrusor y la impresora se puede observar en la Figura 10.

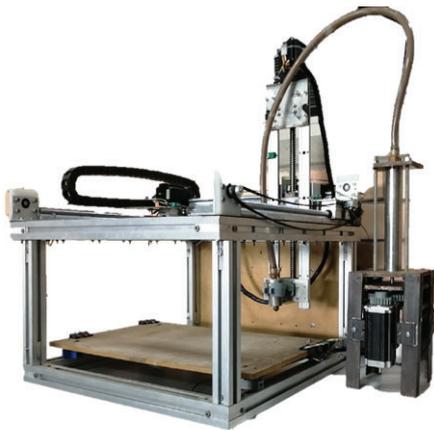


Figura 10. Ensamble impresor 3d - extrusora.
Fuente: Autores.

Además, fue necesario parametrizar las velocidades de extrusión y de movimiento

para generar geometrías muy bien definidas, garantizando la suficiente salida de material y eliminando el exceso del mismo. Se puede observar en la Figura 11, la continuidad del hilo, asimismo, genera figuras de baja resolución de manera uniforme.



Figura 11. Extrusión y movimientos con motor Nema 23
Fuente: Autores

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A lo largo del proceso de diseño de la extrusora, fue necesario tener en cuenta varios factores que podrían afectar a futuro la integridad de la estructura propuesta. Para comenzar, es necesario tener en cuenta que la arcilla como material de extrusión necesita de una cantidad de humedad (no definida en esta investigación) por lo cual se presenta un ambiente corrosivo dentro del cilindro, lo que limita el uso de materiales que presenten alto desgaste a la corrosión como el acero al carbono. Así pues, el contenedor principal de arcilla en el sistema (cilindro de compresión) debía ser

de un material resistente a la corrosión, en consecuencia, se eligió tubo de acero inoxidable.

Bajo estas especificaciones fue posible realizar la primera prueba, empujando la arcilla y moviendo la boquilla de manera manual, donde se determinó la necesidad de una alta transmisión de potencia debido a la gran presión que almacenaba el material en el cilindro, por este motivo se seleccionó una transmisión por engranajes con relación de 3 a 1 con el fin de aumentar el torque aportado por el motor, al mismo tiempo que se disminuye la velocidad de giro del tornillo.

Controlando la transmisión del sistema comenzó a garantizarse la salida continua de material por la boquilla, lo cual permitía generar figuras sin interrupciones. A partir de este avance faltaba únicamente la parametrización de velocidades tal como se menciona en la segunda prueba, allí además se configuraron las características necesarias: salida de material para tener en cuenta durante el proceso impresión, datos como la cantidad de material contenido dentro del cilindro y el diámetro de salida de la boquilla. Estos datos fueron de vital importancia a la hora de determinar la altura inicial de impresión y el espesor de cada capa, así como la cantidad de capas requeridas para la creación de un modelo tridimensional.

La arcilla como material de impresión es una buena alternativa para ampliar la gama de aplicaciones de la impresión 3D pues se ocupa de campos a los que las propiedades del PLA y ABS no

dan un buen rendimiento. (Manosalva Sánchez & Naranjo Merchán, 2007) Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado este material es de fácil obtención ya que en todo el territorio donde se desarrolla la investigación está presente, lo cual reduciría drásticamente los costos de obtención de la materia prima de la impresión 3D, haciendo que los estudiantes de la Universidad Santo Tomás - Tunja no tengan un acceso limitado a este recurso. De acuerdo a esto si es posible generar modelos de arcilla por medio de un prototipo sencillo y asequible.

Para su correcta aplicación en la impresión 3D la arcilla requiere de una preparación que garantice humedad suficiente para generar un flujo sencillo y constante a través del sistema y solidez suficiente para consolidar la figura tridimensional deseada y compactar la unión entre capas este tema se sugiere abordarlo en próximas investigaciones.

En el diseño de la extrusora no se tuvo en cuenta una forma de realizar una recarga rápida de material, lo cual limita la cantidad de material y por ende el tamaño de las piezas, restringido por la capacidad volumétrica que presenta el cilindro de la extrusora, ya que para cuando se realicen piezas de dimensiones mayores al volumen del cilindro se tendría que recargar varias veces hasta completar la operación la cual tomaría mucho tiempo debido al sistema de sujeción del cilindro, ya que es difícil de retirar para recargar.

A partir de las pruebas realizadas se pudo observar que es necesario obtener un flujo constante de material, para lo cual se aumenta el torque en la transmisión entre el motor y el tornillo por medio de la relación del engranaje de tal manera que se contrarreste la presión generada en el cilindro debido al desplazamiento del material. El sistema diseñado (tornillo de potencia) cumple los requisitos necesarios para un flujo continuo a la salida de la boquilla, lo que permite generar piezas homogéneas.

Las boquillas intercambiables del sistema de inyección varían sus diámetros en base al material de extrusión usado, debido a que si no se presenta una buena preparación (Tamizaje) del material a utilizar se pueden presentar obstrucciones teniendo en cuenta la presencia partículas de tamaño mayor al diámetro de la salida. Para evitar que la preparación afecte directamente el proceso se fabricaron boquillas que modifican la resolución de la pieza generada. Sin embargo, se recomienda garantizar un tamaño de partícula menor al diámetro del agujero de salida.

V. REFERENCIAS

- [1] Anukiruthika, T., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). 3D printing of egg yolk and white with rice flour blends. *Journal of Food Engineering*, 265, 109691. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109691>
- [2] Atos. (2014). 3D printing ., 9. Retrieved from <https://atos.net/content/dam/global/ascent-whitepapers/ascent-whitepaper-3d-printing.pdf>
- [3] Blandón, A. (2010). *Diseño de un dispositivo salva desniveles para edificaciones que impiden el acceso a personas en situación de discapacidad* (tesis de pregrado de ingeniería de diseño de productos). Universidad EAFIT, Medellín, Colombi
- [4] Castaño Posada, A., & Moreno Ramirez, H. (2004). *Libro de diseño de máquinas* (Tesis de Ingeniera Mecánica). Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombi
- [5] Cengel, Y. (2014). *Termodinámica* (8th ed.). México DF: Mc Graw Hill Education.
- [6] Chen, Z., Li, Z., Li, J., Liu, C., Lao, C., Fu, Y., . . . He, Y. (2019). 3D printing of ceramics: A review *Journal of the European Ceramic Society*, 39(4), 661-687. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013>
- [7] Dick, A., Bhandari, B., & Prakash, S. (2019). 3D printing of meat. *Meat science*, 153, 35-44. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013>
- [8] Grover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. McGraw-HILL.
- [9] Lasso Eduardo. (2007). *Caracterización del efecto de*

- abrasivos revestidos en la rugosidad superficial en el acero inoxidable SAE-304* (Tesis de Pregrado) Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombi
- [10] Lopez, C. (2016), Impresoras 3D., 3. Retrieved from https://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranet-tmpl/prog/local_repository/documents/17854.pdf
- [11] Manosalva Sánchez, S. R., & Naranjo Merchán, W. E. (2007). Geología y mineralogía de yacimientos de caolín en el departamento de Boyacá. *Ingeniería Investigación Y Desarrollo*, 4(1), 48-52.
- [12] Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos*. México: Pearson Educación.
- [13] Palacio Alamillo, M. (2017). *Diseño y puesta en marcha de nuevos filamentos cargados para su uso en impresión 3D* (Máster Universitario en Ingeniería, Procesado y Caracterización de Materiales). Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España.
- [14] Staticboards. (2016). Guía para comprar motores paso a paso. Retrieved from <https://www.staticboards.com/showpost.php?postID=21>
- [15] Stepeeronline. (S.F.) Nema 23 Bipolar 3Nm. Retrieved from <https://www.omc-stepperonline.com/nema-23-bipolar-3nm-425oz-in-4-2a-57x57x114mm-4-wires-stepper-motor-cnc.html>
- [16] Sun, J., Zhou, W., Yan, L., Huang, D., & Lin, L. Y. (2018). Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *Journal of Food Engineering*, 220, 1-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.028>
- [17] Universidad de Cantabria. (s.f). Introducción a los engranajes. Cinemática y dinámica de máquinas (pp. 5) Departamento de Ing. Estructural y Mecánica. Retrieved from <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1805/course/section/2155/Tema%20VI%201%20Teoria.pdf>
- [18] Velilla Díaz, W. (2008). *Diseño y validación de un modelo de extrusora de arcilla* (tesis de maestría en ingeniería mecánica). Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.
- [19] Xu, J., Ding, L., Cai, L., Zhang, L., Luo, H., & Qin, W. (2019). Volume-forming 3D concrete printing using a variable-size square nozzle Automation in Construction, 104, 95-106. doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.008>
- [20] Yerovi, X. (2018). *Diseño de un mortero con arcillas incluyendo agregado no clasificado con cemento portland tipo I y tipo HE para uso en Impresoras 3d* (tesis de pregrado en ingeniería civil). Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.