

Optimización experimental de los parámetros de fabricación sobre las propiedades mecánicas de piezas de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) impresas en 3D

Experimental optimization of manufacturing parameters on the mechanical properties of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) 3D-printed parts

VARGAS, Lisandro ¹
RODRÍGUEZ, Alfonso ²
RAMÍREZ, Rafael A. ³

Resumen

El documento presenta, a través de un diseño experimental de dos factores y tres niveles, el efecto de los parámetros de fabricación, velocidad de deposición y Airgap (espacio entre filamentos depositados), sobre el comportamiento mecánico de modelos fabricados con ABS mediante la tecnología FDM. El análisis de varianza determinó que existe un efecto significativo entre los factores y sus interacciones. La mayor resistencia a la tensión se logró con velocidades de impresión entre 0,140-0145 mm/seg y sin espacio entre los filamentos.

Palabras claves: optimización de parámetros de proceso, impresión 3d, propiedades mecánicas.

Abstract

The document presents, through a two-factor and three-level experimental design, the effect of the manufacturing parameters, Deposition Rate and Airgap (space between deposited filaments), on the mechanical behaviour of models manufactured with ABS by means of FDM technology. The analysis of variance determined that there is a significant effect between the factors and their interactions. The highest tensile strength was achieved with printing speeds between 0.140-0145 mm/sec and no spacing between the filaments.

key words: optimization of processing parameters, 3d printing, mechanical properties.

1. Introducción

Uno de los métodos más comunes entre las diferentes técnicas de manufactura aditiva es el Modelado por Deposición Fundida (FDM), que implica depositar material en áreas bidimensionales, predefinidas por los modelos CAD (diseño asistido por computador), proceso que se puede comparar con la generación de estrategias

¹ Docente Ingeniería Mecánica. Universidad del Atlántico. lisandrovargas@mail.uniatlantico.edu.co

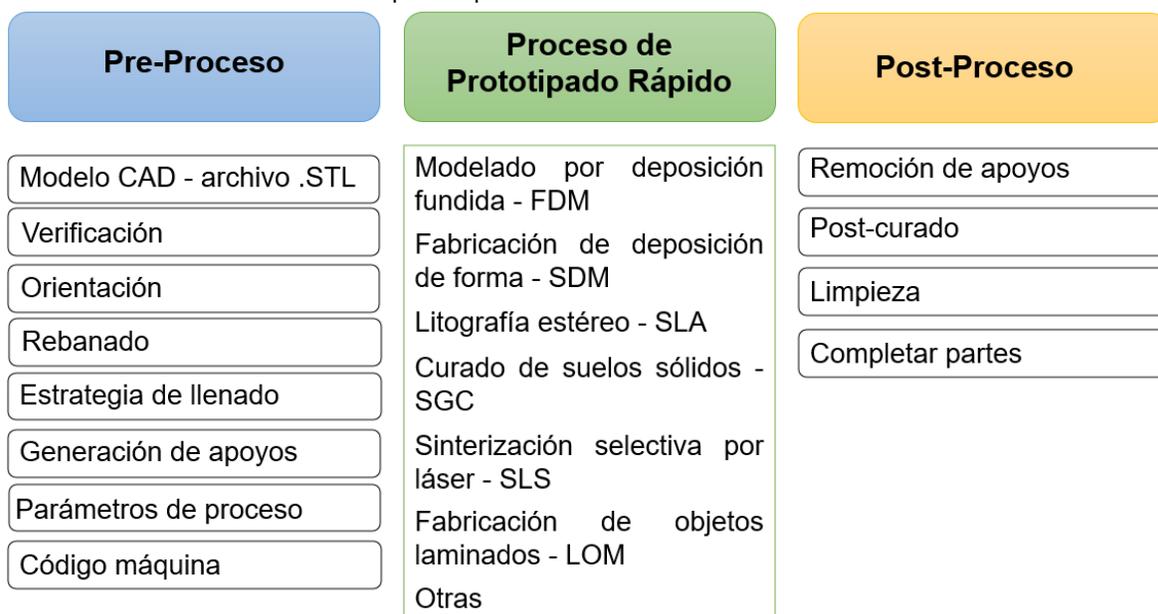
² Docente Ingeniería Mecánica. Universidad del Atlántico. alfonsorodriguez1@mail.uniatlantico.edu.co

³ Docente Ingeniería Mecánica. Universidad del Atlántico. rafaelramirez@mail.uniatlantico.edu.co

convencional de control numérico (NC) para la eliminación de material en operaciones de mecanizado. Los modelos funcionales son fabricados con material plástico como el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) (Berman, 2012; Espalin, Muse, Macdonald y Wicker, R. 2014). A partir del 2014, la impresión en 3D ha evolucionado hacia un potencial muy inmediato en la utilización masiva para la manufactura instantánea de objetos. Esta expansión de la técnica de FDM ha venido acompañada de un aumento en el estudio de las técnicas de impresión 3D, ya que es vital para comprender las propiedades y características de las piezas que se fabrican (Wittbrodt y Pearce, 2015; Torrado, Roberson, Wicker, 2014; Torrado, Shemelya, English, Lin, Wicker y Roberson, 2015).

Antes de analizar las propiedades de una pieza fabricada por FDM, primero se debe conocer el funcionamiento del proceso. Todos los procesos de manufactura aditiva siguen varios pasos, desde la creación del modelo CAD hasta la fabricación del modelo físico. Estas etapas se han organizado en tres grupos llamados: Pre-proceso, proceso y post-proceso, como muestra la figura 1. El tiempo de fabricación, la contracción, el acabado superficial, el comportamiento mecánico y la cantidad de material de soporte son parámetros afectados por cada paso en la etapa de pre-procesamiento.

Figura 1
Etapas del proceso de manufactura aditiva.

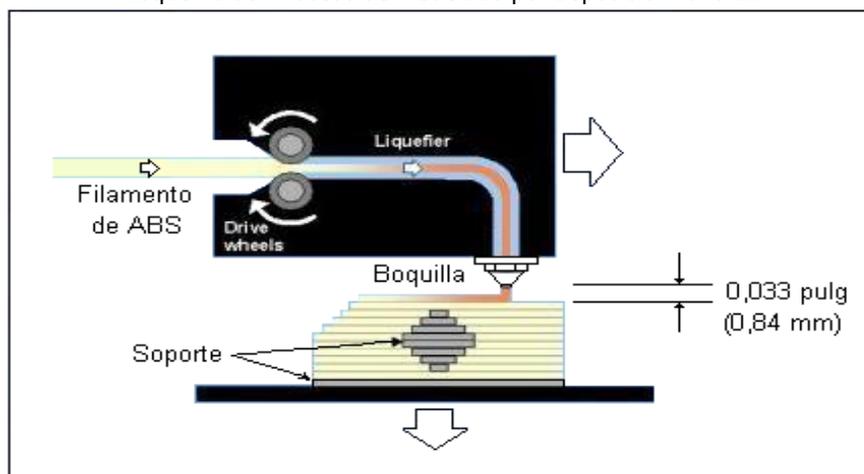


Fuente: Elaboración propia adaptado de Gibson (2002)

El primer paso para generar una pieza en FDM es crear un modelo sólido tridimensional desde un diseño CAD. Luego, el modelo se exporta al software de FDM Quickslice™ utilizando el formato de estereolitografía (STL). Este formato enmalla el modelo (Shofner, Lozano, Rodríguez-Macias, Barrera, 2003). El formato STL es admitido por la mayoría de los sistemas CAD y simplifica la geometría de la pieza al reducirlo a sus componentes más básicos. La desventaja es que el modelo pierde algo de resolución, ya que solo los triángulos son bien representados, y no los arcos. Sin embargo, las imperfecciones introducidas por estas aproximaciones son aceptables siempre que sean menores que la inexactitud inherente al proceso de fabricación. Una vez que el archivo STL se ha exportado al software Quickslice™, se configuran los parámetros de fabricación. El modelo se rebana horizontalmente en secciones delgadas a una altura fija determinada. Estas secciones representan los contornos bidimensionales que generará el proceso FDM. Cuanto más delgadas son las secciones, mayor exactitud dimensional presentará la pieza. El software luego usa esta información para generar el plan de proceso (código G) que controla el hardware de la máquina FDM y crea las trayectorias de la boquilla.

El proceso físico de fabricación, representado en la figura 2, consiste en que un filamento de ABS, que inicialmente se encuentra en estado sólido almacenado en rollos, se funde y es expulsado por una boquilla en forma de hilos que se depositan en una base plana, capa a capa, a una velocidad de flujo específica siguiendo la ruta programada. Los filamentos van solidificando conforme van tomando la forma de cada capa. Cuando se completa la primera capa, el cabezal que contiene la boquilla se mueve en el plano X-Y, y la base se mueve verticalmente en el plano Z (el grosor de la capa) para comenzar a depositar una nueva capa que se fusiona con el material ya depositado, de acuerdo con los requisitos de la pieza del archivo STL. Después de un período de tiempo, el cabezal habrá depositado una representación física completa del archivo CAD original (Shofner, Rodríguez-Macias, Vaidyanathan, Barrera, 2003). El paso final es el post-procesado. Esto implica el quitar el prototipo de la máquina, remover el material de apoyo, limpiar el modelo y si es necesario realizar un post-curado.

Figura 2
Esquema del Proceso de modelado por deposición fundida.



Fuente: Elaboración propia

Es interesante notar que en el proceso de FDM puede requerir que se construya una estructura de soporte debajo de las secciones. Si un corte horizontal sobresale del anterior, simplemente caerá sobre el sustrato cuando la boquilla FDM intente depositarlo. Por lo tanto, la máquina FDM posee una segunda boquilla que extruye material de soporte para apoyar las partes sobresalientes del modelo 3D. El material de soporte es similar al material del modelo, pero es más frágil, de modo que puede retirarse fácilmente una vez que se completa el modelo. Si bien los modelos fabricados por FDM son más resistentes que los modelos hechos por otros procesos de manufactura aditiva, como por ejemplo la estereolitografía (SLA), todavía experimenta fracturas frágiles a cargas relativamente bajas. El proceso FDM deposita material de forma direccional, que da como resultado partes no isotrópicas. En el presente artículo se describe una técnica de diseño experimental para establecer los efectos de los parámetros de procesos de la tecnología FDM, Airgap (distancia entre dos filamentos contiguos) y la Velocidad del cabezal de extrusión, sobre la resistencia a la tensión, en modelos fabricados con ABS en la máquina Titán SH-1.

1.1. Revisión bibliográfica

Diversos autores han realizado investigaciones sobre los efectos en las propiedades mecánicas de piezas fabricadas por FDM debido al cambio de los parámetros de proceso y han analizado estadísticamente los efectos más significativos (Lee, Abdullah, Khan, 2005; Lee, Kim S.G, Kim H.J, Ahn, 2007; Bagsik, Schöppner, 2011; Novakova-Marcincinova, Novak-Marcincin, 2013). Es así que Ahn, Montero, Odell, Roundy y Wright (2002) determinaron que las piezas de FDM mostraron una gran discrepancia entre las resistencias a la compresión y la

resistencia a la tracción, y encontró que la resistencia a la compresión era aproximadamente el doble de la resistencia a la tracción. Hossain (2013) comprobó experimentalmente las características anisotrópicas en modelos de policarbonato fabricados por FDM, considerando parámetros de proceso como, el Airgap, la orientación y el ancho de la deposición y el ancho del contorno. Concluyó que los modelos fabricados por FDM tienen resistencia a la tensión entre 65% y 72% mayor que las piezas hechas por inyección y formularon una serie de recomendaciones de diseño para las piezas a ser fabricadas con FDM. En ese sentido, Tymrak et al (2014) examinaron las propiedades a la tensión del ABS encontrando que la resistencia a la tensión de las piezas de ABS hechas en máquinas de FDM estaba en un promedio de 28.5 MPa. Asimismo Reddy et al (2007) encontró que los parámetros, airgap, temperatura de la boquilla y la temperatura del licuefactor tienen un impacto significativo sobre la resistencia de las piezas fabricadas con ABS, un hallazgo que es válido para la mayoría de los materiales utilizados en FDM. Del mismo modo Kumar et al (2010) determinaron que la orientación y el ancho de la deposición, el grosor de la capa y el Airgap son los cuatro factores importantes que deben tenerse en cuenta en un proceso de FDM e indicaron que estos parámetros influyen fuertemente en la resistencia a la tracción, la deflexión, el impacto y la flexión de las piezas fabricadas. Wu et al (2015) investigaron el proceso de extrusión del material teniendo en cuenta el gradiente de temperatura entre los filamentos contiguos, ya que estos permiten que los polímeros termoplásticos formen una interfaz de fusión sólida. Estableció que minimizar el Airgap aumenta el área de contacto entre los filamentos depositados y conduce a una fusión más fuerte del material.

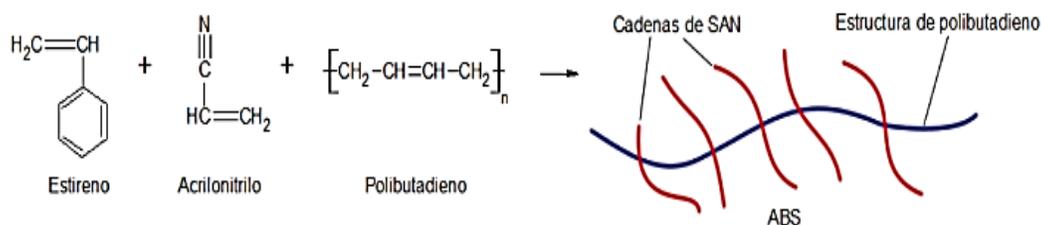
2. Metodología

El estudio de las propiedades de los materiales y su comprensión, requieren la caracterización previa, de forma que se pueda obtener un conocimiento inicial para modelar y predecir el comportamiento mecánico de piezas fabricadas por FDM, o simplemente para evaluar los cambios que se producen en el material durante la fabricación. El conocimiento de las características del material permite a los fabricantes una mejor comprensión de las fichas técnicas lo cual puede conducir a un ahorro de energía y de materia prima durante la fabricación.

2.1. Material y equipo de manufactura aditiva

El material más utilizado en la manufactura aditiva es el termoplástico Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno, (ABS). El ABS es un material heterogéneo formado por una fase homogénea rígida y una elastomérica. El estireno y el acrilonitrilo forman un copolímero vítreo lineal (SAN) que se desempeña como matriz. El butadieno y el estireno también forman un copolímero lineal (caucho de BS) que actúa como el material de relleno (Vargas-Henríquez, Córdoba-Nieto, 2015). La combinación de los dos copolímeros forman el ABS, el polímero estireno-acrilonitrilo (SAN) y el polibutadieno, que es una combinación excelente de esfuerzo, rigidez y dureza. En la figura 3 se muestra la estructura representativa del ABS.

Figura 3
Estructura del ABS



Fuente: Adaptado de Billmeyer (1975)

Cada monómero es un componente importante del ABS: el acrilonitrilo, entre 15% y 35%, contribuye con la resistencia a la temperatura, resistencia química y dureza superficial, mientras que el butadieno, entre 5% y 30%, aporta dureza y resistencia al impacto, y el estireno, entre 40% y 60%, contribuye con el brillo, rigidez y facilidad de procesamiento (Vargas-Henríquez, Córdoba-Nieto, 2015). La tabla 1 muestra las principales propiedades del material.

Tabla 1
Propiedades del ABS

Propiedades	Valor
Resistencia a la tensión (MPa)	45
Módulo de elasticidad (MPa)	2345
Resistencia al impacto (J/m)	106
Densidad (kg/cm ³)	1,04
Conductividad térmica x10 ⁻⁵ (W/m°C)	4,9
Dureza (HB)	109

Fuente: Elaboración propia

Para la fabricación de las probetas en FDM se utilizó una impresora 3D modelo Titán SH-1 de la empresa Stratasys. El volumen máximo de construcción de los modelos es de 406x355x406 mm. Se seleccionó esta máquina por su flexibilidad en el ajuste de los parámetros de fabricación. En la tabla 2 se muestran los parámetros de impresión que se dejaron fijos. Sus valores se escogieron iguales al realizado por (Velasco, 2016), pues se usó el mismo material que se utilizó en este proyecto, el ABS, con el fin de tener resultados comparativos.

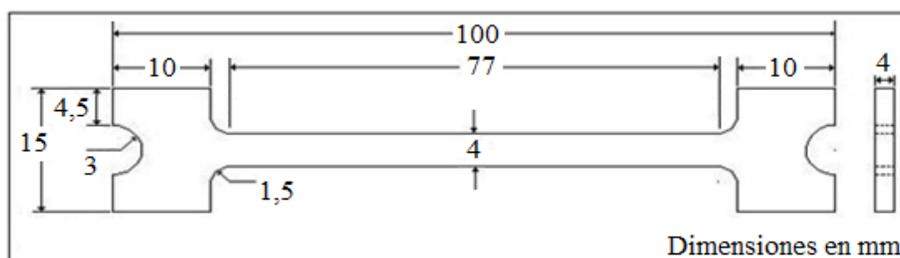
Tabla 2
Parámetros de proceso para la fabricación de las probetas

Parámetro	Valor
Altura de la capa (SI)	0,254 mm
Ancho de la capa (RW _p)	0,508 mm
Altura y ancho del contorno	0,508 mm
Recorrido de la boquilla	Zig-Zag
Forma del relleno	rectilínea
Temperatura de fusión	240°C
Temperatura cama de impresión	60°C
Diámetro de la boquilla	0,40 mm

Fuente: Elaboración propia

2.2. Diseño de las probetas

Figura 4
Representación esquemática de la probeta plana para Ensayo de Tracción



Fuente: Elaboración propia

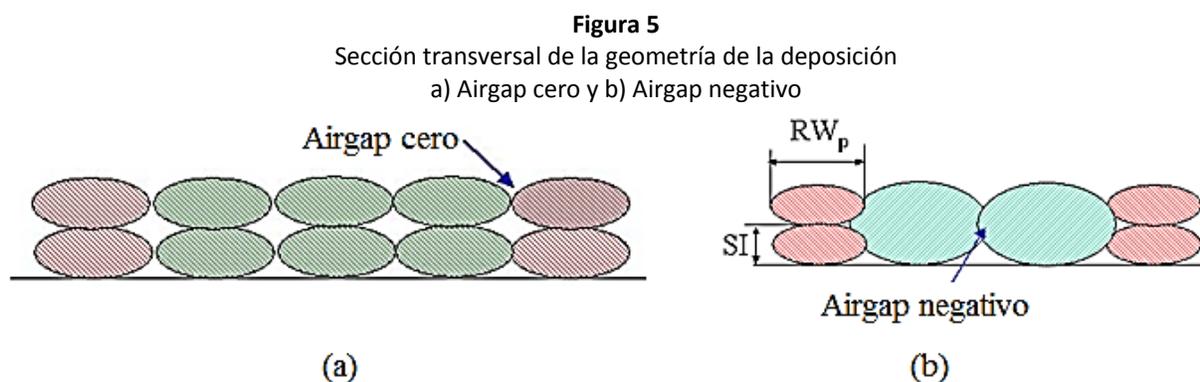
Se diseñó un modelo CAD, en el software Solidworks, de la geometría de la probeta de tracción para evaluar las propiedades mecánicas del ABS según la norma ASTM D638 Tipo IV para especímenes de tracción para materiales plásticos. La figura 4 ilustra las dimensiones en milímetros utilizadas para crear el modelo CAD. Las muestras se imprimieron con una boquilla T16 con diámetro de 0,016 pulg (0,40 mm). Esta boquilla es usada para modelos de grandes volúmenes.

2.3. Parámetros a estudiar

Se considera que el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas por FDM es afectado por varios factores, entre ellos están el espesor de capa, la distancia de la deposición, el gap (distancia entre las capas), la orientación de fabricación del modelo, la presencia de estructuras de apoyo, la velocidad de fabricación, la temperatura de extrusión. Esta investigación se centra en los parámetros que se explican a continuación.

Velocidad del cabezal de extrusión: Es la velocidad con que se construye el prototipo, es decir la velocidad con la se deposita el filamento. Este factor afecta directamente la resistencia y la calidad de los prototipos, también incide sobre el tiempo de construcción y la exactitud dimensional.

Airgap: Corresponde al espacio entre dos filamentos contiguos de material depositado como muestra la figura 5. Un Airgap positivo indica que dos filamentos consecutivos no tienen contacto, mientras que, si este valor es negativo, la distancia entre centros es menor que el ancho del filamento (RW_p). Un Airgap negativo contribuye a una mayor resistencia a la tensión de las piezas, ya que se rellenan los huecos vacíos entre filamentos, aumentando la densidad, y por lo tanto, aumenta la resistencia de las uniones entre filamentos. Sin embargo, puede aparecer un exceso de material, que lleva consigo un mal acabado, o incluso que los filamentos contiguos presenten deformaciones (Del Medico Bravo, 2017). También, se puede producir ineficiencia en la adherencia entre capas y además, debido a la fluidez del material depositado se puede generar mayor pandeo cuando la boquilla está más cerca de la plataforma de deposición (Vasudevarao et al, 2000).



Fuente: Elaboración propia

El objetivo del experimento es ver cómo afecta las variables de proceso la resistencia a la tensión de las probetas fabricadas por FDM. Para las variables definidas anteriormente, se definieron tres niveles para cada uno: un nivel alto (+1), un nivel central (0) que es el setpoint de la máquina y otro nivel bajo (-1).

Para poner los niveles apropiados para cada variable, se partió de la base de los niveles con los que se trabaja la máquina actualmente. Así, para el Airgap, el nivel central se tomó con respecto a la calibración que se realiza en la máquina Titán SH-1, esta calibración tiene una altura de la boquilla de 0,033 pulg (0,84 mm) y la máquina reconoce como el punto cero (0,0) o setpoint (ver figura 2), con esta altura de boquilla se genera una distancia entre hilos (Airgap) de cero (0,0), lo que significa que los hilos depositados solo se tocan. Para el nivel bajo, se bajó la boquilla hasta una distancia de deposición de 0,032 pulg (0,81 mm), generando un Airgap de -0,025 mm,

lo que significa que dos hilos se solapan ocupando parcialmente el mismo espacio, fabricando una probeta densa que requiere un tiempo de fabricación más largo. Se realizaron pruebas preliminares con una distancia más baja, pero produjo probetas defectuosas porque la boquilla prácticamente tocaba la lámina de acrílico y presentaba taponamiento. Y para el nivel alto se subió la boquilla hasta 0,89 mm, generando un Airgap de 0,051 mm, es decir, que los hilos de material depositado no se toca, fabricando una probeta porosa.

Para escoger los niveles de velocidad del cabezal de extrusión, se partió de igual manera que para la distancia entre hilos. Para el nivel central, su valor predeterminado es de 0.14 mm/seg. Para el nivel alto, la velocidad es de 0,145 mm/seg y para el nivel bajo es de 0,135 mm/seg. La tabla 3 enumera los parámetros del proceso considerados y sus configuraciones.

Tabla 3
Parámetros y niveles de proceso
asignados para el diseño de experimento

Factor	Nivel Bajo (-1)	Nivel Central (0)	Nivel Alto (+1)
Airgap (A) mm	-0,025	0.000	0.051
Velocidad (B) mm/seg	0.135	0.140	0.145

Fuente: Elaboración propia

Con las variables de procesos definidas se realizó un diseño experimental factorial completo de dos factores y tres niveles con 4 repeticiones para un total de 9 tratamientos (36 probetas). En la tabla 4 se muestra la combinación de valores para cada uno de los factores.

Tabla 4
Diseño factorial completa
(9 tratamientos)

Experimento	Airgap (mm)	Velocidad de impresión (mm/seg)
1	-0,025	0,135
2	-0,025	0,140
3	-0,025	0,145
4	0,000	0,135
5	0,000	0,140
6	0,000	0,145
7	0,051	0,135
8	0,051	0,140
9	0,051	0,145

Fuente: Elaboración propia.

La respuesta a evaluar o variable dependiente es la resistencia a la tensión de modelos fabricados con ABS mediante la tecnología FDM. La variable respuesta mensurable está representada matemáticamente en un modelo lineal.

2.4. Pruebas mecánicas

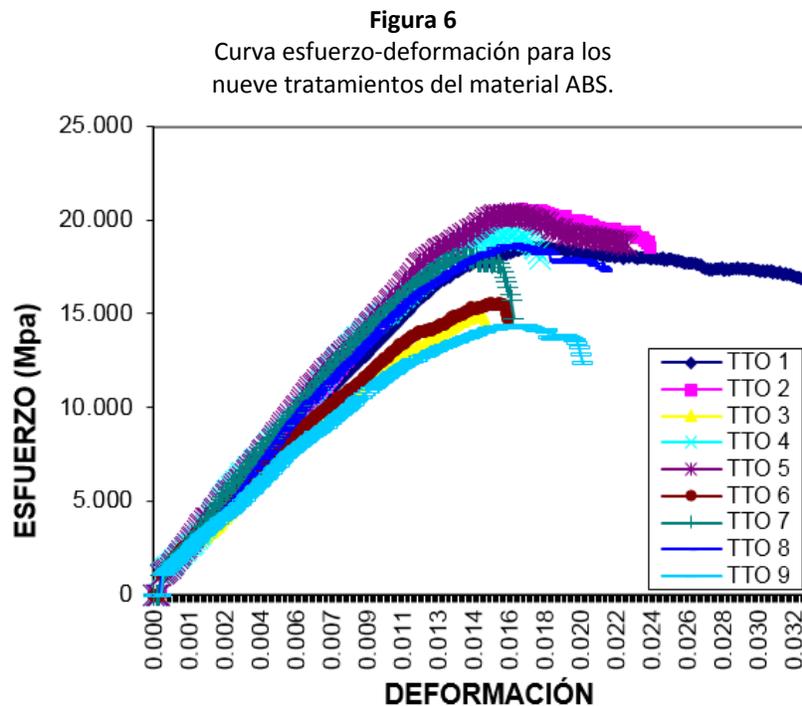
La medición de las propiedades mecánicas se realizó en una máquina Stress/Strain de PASCO referencia AP-8216, con una celda de carga (Economy Force Sensor) CI-6746 de 250 N y siguiendo las condiciones de la norma ASTM D638. La velocidad de carga del ensayo fue de 4000 pasos/seg, generando un torque de 14 N-cm y una velocidad lineal de 0,15 mm/seg aplicada hasta la ruptura de la probeta. El esfuerzo y la deformación fueron calculados usando el software DataStudio y el análisis de los datos de la resistencia última a la tensión se realiza en el

software estadístico Desig Expert. La experimentación se aleatorizó para eliminar cualquier sesgo debido al tiempo o cualquier arreglo no deseado en las experimentaciones. Por cada tratamiento se realizaron cuatro experimentaciones y se tomó un promedio de estos para el análisis.

3. Resultados

3.1. Propiedades mecánicas

Se realizaron ensayos de tensión a las 36 probetas, obteniendo un comportamiento de la curva de esfuerzo deformación de los 9 tratamientos experimentales como se muestra en la figura 6.



Fuente: Elaboración propia

En cada experimentación se obtuvieron las medias de la resistencia a la tensión como muestra la tabla 5. Las probetas del tratamiento 3 fabricadas con velocidad de impresión 0,145 mm/seg y Airgap de -0,025 mm, y la del tratamiento 9 fabricada con velocidad de impresión de 0,145 mm/seg y airgap de 0,51 mm presentaron los valores más altos de resistencia a la tensión (20,785 y 20,169 MPa respectivamente); en contraste, las probetas del tratamiento 1 fabricadas con velocidades de impresión de 0,135 mm/seg y airgap de -0,025 mm y las probetas del tratamiento 4 fabricadas con velocidades de impresión de 0,135 mm/seg y airpag de 0,0 presentaron los valores más bajos de la resistencia a la tensión (14,597 y 14,815 respectivamente). Este comportamiento se debe a la porosidad y a defecto presentes en las probetas fabricadas con esos parámetros.

Tabla 5
Resultados Promedios de
las Pruebas Mecánicas.

Experimento	GAP (mm)	Velocidad de impresión (mm/seg)	Resistencia a la tensión (MPa)	Desviación estándar
1		0,135	14,597	0,134
2	-0,001	0,140	18,923	0,015
3		0,145	20,785	0,166
4		0,135	14,815	0,586
5	0,000	0,140	18,454	0,043
6		0,145	18,758	0,140
7		0,135	15,161	0,054
8	0,002	0,140	19,330	0,078
9		0,145	20,169	0,040

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Análisis estadístico

Se determinó una prueba de análisis de varianza con nivel de significancia $\alpha=0.05$, para determinar si los parámetros y sus interacciones usados en el diseño que afectan significativamente el comportamiento de las diferentes probetas para la resistencia a la tensión. En la tabla 6 se recopilan los resultados de la ANOVA.

Tabla 6
Análisis de varianza para
la resistencia a la tensión

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de Cuadrados	Valor F	Prob>F
Modelo	182.13	8	22.77	128.72	<0,0001**
Airgap	5.44	2	2.72	15.37	<0,0001
Velocidad	171.32	2	85.66	484.29	<0,0001
Airgap*Vel	5.38	4	1.34	7.60	0,0003
Error	4.78	27	0.18		
Total	186.91	3			

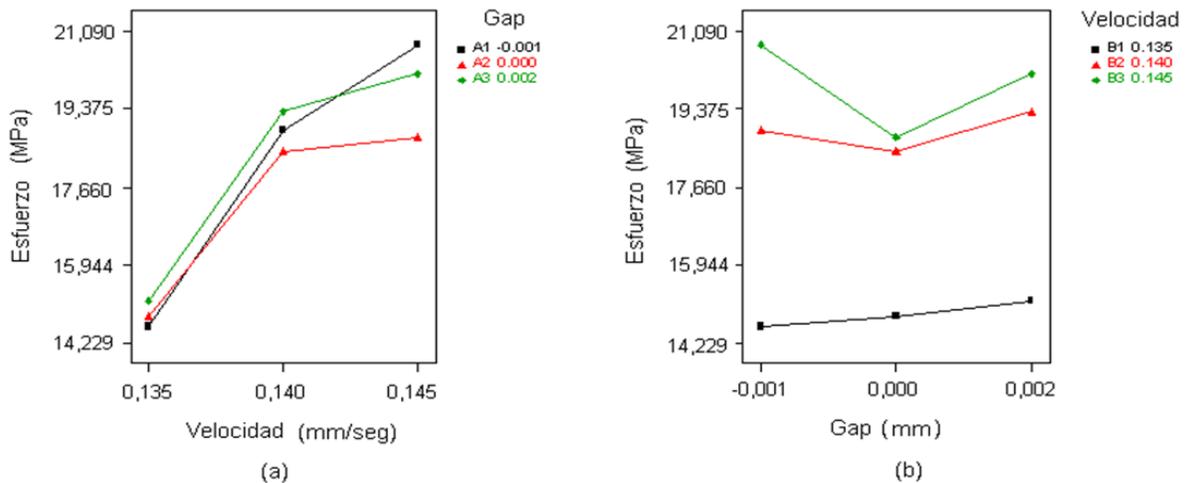
**Significante

Fuente: Elaboración propia.

Del análisis de varianza se concluye que existe un efecto significativo entre los efectos principales, airgap y la velocidad de impresión, dado que el valor crítico es $F_{0.05,2,27} = 3,35$, lo que genera que $F > F_{0.05,2,27}$, y entre su interacción, dado que el valor crítico es $F_{0.05,4,27} = 2,73$, lo que genera que $F > F_{0.05,4,27}$ (Montgomery, 2003). En la figura 7 se corrobora esto, donde se observa que la interacción entre los factores es significativa, ya que afectan la resistencia a la tensión de los prototipos.

Figura 7

Gráficas de la resistencia promedios de los prototipos en cada combinación de tratamientos

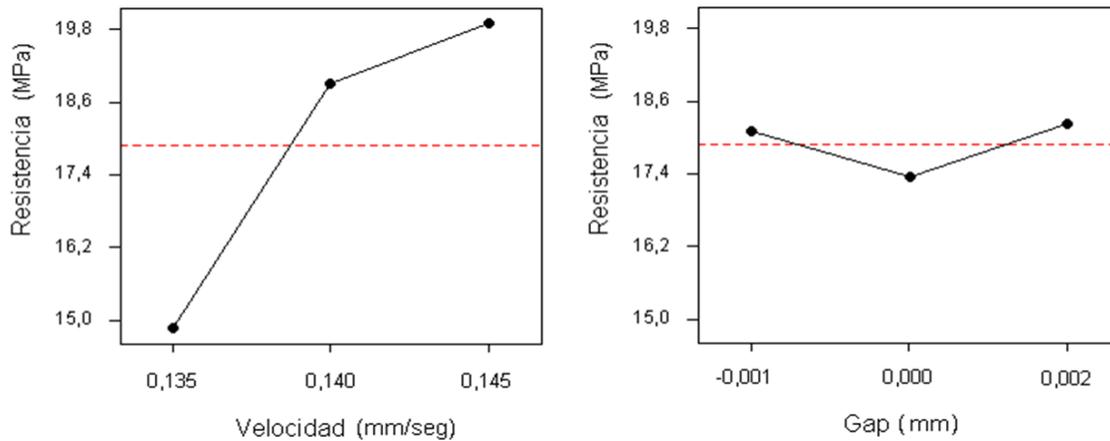


Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se aprecia en la figura 8, que entre los factores principales la velocidad de impresión del material es la que mayor significancia presenta (valor $F=484$) a niveles altos (0,145mm/seg) e intermedios (0,140 mm/seg), como parámetro de fabricación para las probetas de ABS, sobre la resistencia a la tensión del material independientemente del airgap utilizado. Además, se observa que el airgap ejerce una influencia menor sobre la resistencia, comparada con la velocidad de impresión, ya que sus valores bajo, medio y alto producen una resistencia a la tensión muy cercana a la línea punteada que corresponde a un valor promedio de la resistencia.

Figura 8

Gráfica de la resistencia a la tensión contra los efectos principales.

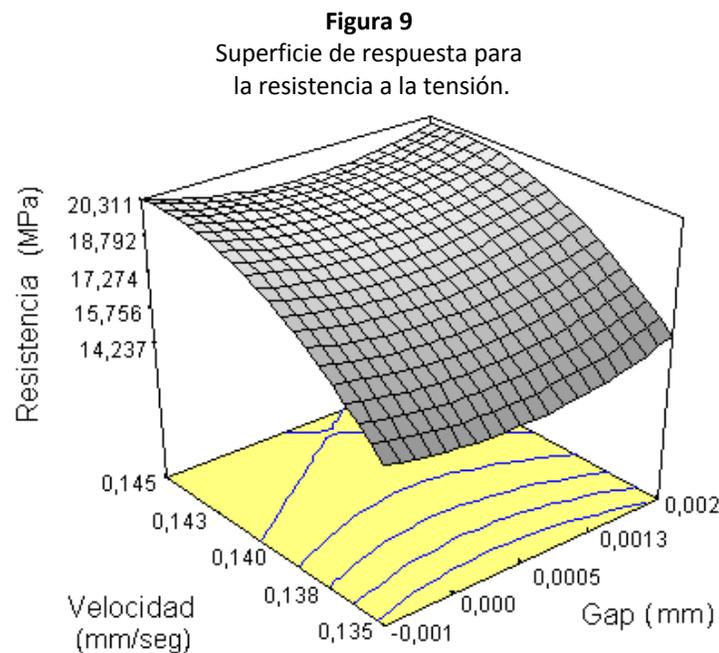


Fuente: Elaboración propia

A partir del modelo ANOVA, se realizó un análisis de regresión múltiple para obtener la ecuación 1, que permitió modelar la resistencia a la tensión de los prototipos fabricados en función de los factores de diseño, Airgap y la velocidad de impresión. En este caso la representación de la regresión para el modelo refinado en término de los factores codificados es:

$$Esfuerzo = 18,28 + 0,059 * Airgap + 2,50 * Vel + 0,90 * Airgap^2 - 1,52 * Vel^2 - 0,20 * Airgap * Vel \quad (1)$$

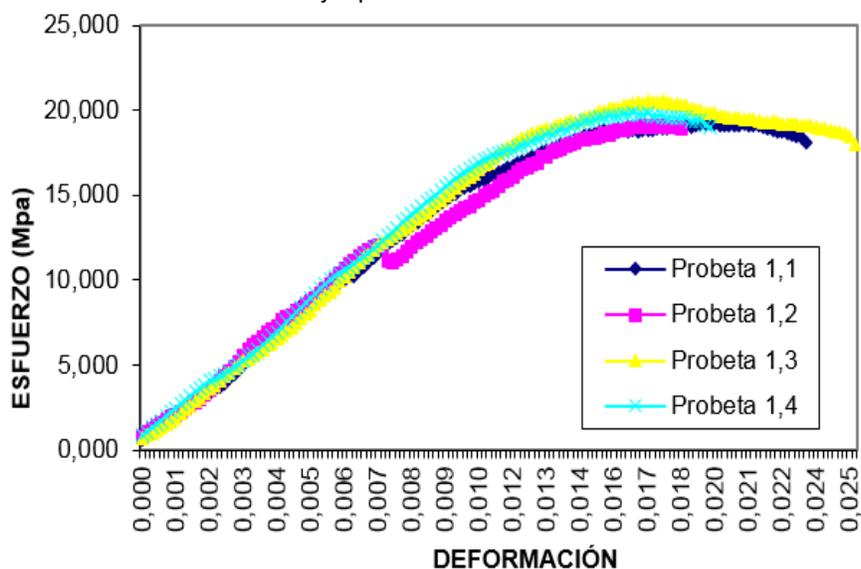
Se realiza una verificación de análisis residual para determinar la validez del modelo y verificar si algún punto atípico influye indebidamente en los resultados. La regresión muestra que el coeficiente de correlación es mayor al 95%, $R^2=0,975$, lo que determina que el modelo obtenido representa razonablemente la relación entre la resistencia a la tensión y los parámetros utilizados para el diseño de las probetas. Por lo tanto, examinando la figura 9 de superficie de respuesta, se puede inferir que el intervalo de valores para las mejores condiciones de resistencia a la tensión se logra para una configuración de velocidades de impresión entre 0,140 y 0,145 mm/seg y una distancia entre filamentos contiguos (Airgap) de 0,0, lo que corresponde a una altura de la boquilla de 0,84 mm (0,33 pulg), utilizados en la fabricación del prototipo. El criterio utilizado para seleccionar el rango de valores óptimo fue el método Duncan que consiste en comparar todos los pares de medias de la resistencia a la tensión a un 5% de significancia, estableciendo unos límites que maximicen la variable respuesta. Como meta se escogió 20,000 MPa, el límite inferior de 18,058 MPa y el límite superior de 21,000 MPa.



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, con las condiciones óptimas se predice una respuesta de la resistencia a la tensión. Esta respuesta es calculada basada en la ecuación del modelo descrito anteriormente, y se verifican los resultados experimentalmente fabricaron cuatro probetas con estas condiciones. En la figura 10 se muestra la curva de esfuerzo-deformación obtenida para estas probetas.

Figura 10
Curvas esfuerzo-deformación para la mejor predicción del modelo.



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 7 muestra la comparación entre los valores calculados con el modelo y los valores determinados experimentalmente para la resistencia a la tensión de cuatro probetas fabricadas con los parámetros óptimos. Durante el ensayo de tensión real, las probetas para los ensayos 1 y 2 produjeron valores de esfuerzo de tensión mayores pero cercanos al valor calculado por el modelo, y muestran errores de 4,3% y 3,8% respectivamente, demostrando un buen comportamiento del modelo. Por otra parte, las probetas de los ensayos 3 y 4 también generaron esfuerzos de tensión experimentales mayores que el valor calculado por el modelo, con errores de 10,57% y 7,42% respectivamente, estando los valores dentro de la meta establecida en la optimización.

Tabla 7
Valores Calculados por el Modelo versus Resultados Experimentales

Resistencia a la Tensión		
Calculado	Experimental	%Error
18,396	19,227	4,32%
18,396	19,122	3,80%
18,396	20,571	10,57%
18,396	19,870	7,42%

Fuente: Elaboración propia

4. Conclusiones

Los parámetros de fabricación, velocidad del cabezal de impresión y el Airgap (distancia entre dos filamentos depositados), se optimizaron para maximizar la resistencia a la tensión en probetas de ABS fabricadas por el proceso FDM, utilizando un diseño experimental factorial completo. Los resultados generados del experimento fueron muy homogéneos, ya que los errores no presentaron sesgo y se obtuvo un panorama coherente con lo esperado y esbozados por la literatura.

La Velocidad en impresión y el Airgap demostraron ser factores significativos para la determinación de la resistencia a la tensión de los modelos fabricados con ABS por la tecnología FDM. De estos dos factores la velocidad es la más influyente, por lo tanto, debe ser la variable sobre la cual se debe ejercer mayor control.

Se realizó una optimización de los datos y se obtuvo que las mejores condiciones para maximizar la resistencia a la tensión se presentan a velocidades de impresión del material entre 0,140 mm/seg y 0,145 mm/seg y a una altura de la boquilla de 0,84 mm, este punto corresponde al setpoint de la máquina y a un airgap de cero (0,0), es decir que los filamento apenas se toquen evitando así la porosidad en el modelos final.

Un Airgap negativo entre los filamentos aumenta la resistencia a la tensión. Sin embargo una distancia de la boquilla menor de 0,032 pulgadas no se debe usar, ya que se encontró que el modelo no se construye bien debido al exceso de material que se presenta en la boquilla. Para modelos relativamente gruesos, un gap negativo puede producir una disminución en la calidad de la superficie y en las tolerancias dimensionales.

Se puede usar un modelo con un mayor número de factores y niveles para proporcionar más información sobre la sensibilidad de la calidad final de los prototipos fabricados usando un diseño factorial fraccionado para reducir el número de corridas. Los avances futuros en la calidad de los modelos finales podrían incluir mejores técnicas de postprocesamiento y mejoras en el hardware FDM y el sistema de control.

Referencias bibliográficas

- Ahn, S.H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., y Wright, P.K. (Octubre, 2002,). Anisotropic material properties of fused deposition modelling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248–257.
- Bagsik, A., y Schöppner, V. (2011). Mechanical properties of fused deposition modeling parts manufactured with ultem*9085. Antec 2011, Boston.
- Berman, B. (abril, 2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155-162.
- Billmeyer, F.W. (1975). *Ciencia de los polímeros*. Barcelona, España: Editorial Reverte.
- Del Medico Bravo, A. J. (2017). *Propiedades mecánicas de componentes fabricados mediante modelado por deposición fundida*. (Trabajo de grado de Ingeniería mecánica). Universidad de la Laguna. Tenerife, España.
- Espalin, D., Muse, D., Macdonald, E., y Wicker, R. (mayo, 2014). 3D printing multifunctionality: Structures with electronics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72, 963-978.
- Gibson, L. (Ed.) (2002). *Software solutions for rapid prototyping*. Wiley London, Uk: Professional Engineering Publishing.
- Hossain, M.S., Ramos, J., Espalin, D., Perez, M., y Wicker, R. (2013). Improving tensile mechanical properties of FDM-manufactured specimens via modifying build parameters. *Annual international solid freeform fabrication symposium; an additive manufacturing conference, proceedings*, 380-392
- Kumar Sood, A., Ohdar, R.K., y Mahapatra, S.S. (enero, 2010). Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modeling processed parts. *Materials & Design*, 31(1), 287–295.
- Lee, B.H, Abdullah, J., y Khan, Z.A. (octubre, 2005). Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. *Journal Materials Processing Technology*, 169(1), 54–61.
- Lee, C.S., Kim, S.G., Kim, H.J., y Ahn, S.H. (junio, 2007). Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 12, 627-630.

- Montgomery, D. C. (2003). *Diseño y análisis de experimentos*. México D.F : Editorial Limusa Wiley.
- Novakova-Marcincinova, L., y Novak-Marcincin, J.(2013). Verification of mechanical properties of ABS materials used in FDM rapid prototyping technology. *Proceedings in manufacturing systems*, 8(2). 87-92
- Reddy, B.V., Reddy, V.R., Ghosh, A. (febrero, 2007). Fused deposition modelling using direct extrusion. *Virtual and Physical Prototyping* 2(1), 51–60.
- Shofner, M.L., Lozano, K., Rodríguez-Macias, F.J., y Barrera, E.V. (junio, 2003). Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling. *Journal of Applied Polymer Science*, 89(11), 3081–3090.
- Shofner, M.L., Rodríguez-Macias, F.J., Vaidyanathan, R., y Barrera, E.V. (diciembre, 2003). Single wall nanotube and vapor grown carbon fiber reinforced polymers processed by extrusion freeform fabrication. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(12), 1207–1217.
- Torrado, A.R. , Roberson, D.A., y Wicker, R.B. (marzo, 2014). Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 14(3), 343–353.
- Torrado, A.R., Shemelya, C. M., English, J.D., Lin, Y., Wicker, R.B., y Roberson, D.A. (abril, 2015). Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing. *Additive Manufacturing*, 6, pp. 16-29.
- Tymrak, B.M., Kreiger, M., y Pearce, J.M. (junio, 2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials and Design*, 58, 242–246.
- Vargas-Henríquez, L., y Córdoba-Nieto, E. (2015). *Inspección de la calidad superficial en el prototipado rápido*. Alemania: Editorial Académica Española.
- Vasudevarao, B., Natarajan, D., Henderson, M., y Razdan, A. (noviembre, 2000). Sensitivity of RP surface finish to process parameter variation. *Partnership for Research in Stereo Modeling and Department of Industrial Engineering Arizona State University*, Tempe, AZ 85287-5906.
- Velasco, Marco A. (noviembre, 2016). Caracterización de propiedades mecánicas de piezas en ABS en función de los parámetros de proceso de manufactura aditiva FDM. XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Asociación Española de Ingeniería Mecánica. <https://www.researchgate.net/publication/312937308>
- Wittbrodt, B., Y Pearce, J. M. (octubre, 2015). The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. *Additive Manufacturing*, 8, 110-116.
- Wu, W., Geng, P., Li, G., Zhao, D., Zhang, H., y Zhao, J. (agosto, 2015). Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS. *Materials*, 8(9), 5834–5846.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-NoCommercial 4.0 International

