

# Evaluación de la impresión 3D como método alternativo en la producción de piezas de reguladores de gas

**Gutierrez, Julieta**

[jugutierrez@itba.edu.ar](mailto:jugutierrez@itba.edu.ar)

**Lucioni, Juan Ignacio**

[jlucioni@itba.edu.ar](mailto:jlucioni@itba.edu.ar)

**Juárez, María del Pilar**

[mjuarez@itba.edu.ar](mailto:mjuarez@itba.edu.ar)

**Eliggi, Gianfranco**

[geliggi@itba.edu.ar](mailto:geliggi@itba.edu.ar)

**Posadas de la Piedra, Santiago**

[sposadas@itba.edu.ar](mailto:sposadas@itba.edu.ar)

*Instituto Tecnológico de Buenos Aires – ITBA (Argentina).*

Fecha de recepción: 14/07/2020

Fecha de aprobación COINI: 08/10/2020

Fecha de aprobación RIII: 19/06/2021

## **RESUMEN**

El objetivo de esta investigación es el estudio de métodos alternativos en la producción de algunos componentes de ciertos reguladores industriales de gas, y el posterior análisis técnico de su viabilidad y rentabilidad. En particular, se estudia la impresión 3D como método de manufactura aditiva como alternativa no convencional para la fabricación de estas piezas teniendo en cuenta el diseño, las máquinas y materiales poliméricos a utilizar. En primer lugar, se determinaron los criterios de selección de materiales y los ensayos requeridos para caracterizar sus propiedades mecánicas. Adicionalmente, se evaluaron métodos de impresión y de post procesamiento para asegurar que la pieza fabricada por impresión 3D soportará los esfuerzos combinados a los que se encuentra sometida en operación normal, manteniendo las propiedades de rugosidad y hermeticidad necesarias para su correcto funcionamiento. En una segunda etapa se analiza la implementación de este cambio en el proceso productivo de la fabricación de los reguladores, considerando cuestiones operativas y logísticas, como así también económicas, con el fin de determinar la factibilidad y los beneficios que otorga dicha modificación e inclusive la posibilidad de extender la utilización de esta metodología de fabricación a otras industrias.

**Palabras Claves:** reguladores de gas; impresión 3D; esfuerzos combinados; materiales poliméricos; ensayo de materiales.

## **Evaluation of 3D printing as an alternative method in the production of gas regulator parts**

### **ABSTRACT**

The aim of this research is to study alternative manufacturing processes for certain components of industrial gas regulators including a feasibility and rentability analysis. In particular, additive manufacturing will be studied as a non-conventional substitute to traditional component manufacturing, taking into account the component's design, the apparatus and polymeric materials to be used. Firstly, materials selection criteria and characterization tests were determined. Additionally, evaluation of 3D printing methodologies and postproduction processes were conducted to assure that the 3D printed component will withstand the combined loads at which it will be exposed during normal operation. Also, the surface roughness requirements were considered when analyzing the material and the 3D printing method. In second place, an analysis of the impact of this change in the productive line and the gas regulator production will be conducted. Operative, logistic and economic issues will be contemplated to determine the feasibility and benefits of the modification of the process and the implementation of additive manufacturing in other industries.

**Keywords:** gas regulators; 3D printing; combined forces; polymeric materials; materials testing

## **Avaliação da impressão 3D como método alternativo na produção de peças reguladoras de gás**

### **RESUMO**

O objetivo desta pesquisa é o estudo de métodos alternativos na produção de alguns componentes de determinados reguladores de gases industriais, seguida da análise técnica de viabilidade e rentabilidade. Em particular, o estudo da impressão 3D como um método de manufatura aditiva se dá como uma alternativa não convencional para a fabricação dessas peças, levando em consideração seu design, as máquinas e os materiais poliméricos a serem utilizados. Primeiramente, foram determinados os critérios de seleção dos materiais e os testes necessários para caracterizar suas propriedades mecânicas. Além disso, métodos de impressão e pós-processamento foram avaliados para garantir que a peça fabricada por impressão 3D resista às tensões combinadas as quais é submetida em operação normal, mantendo as propriedades de rugosidade e estanqueidade necessárias para seu funcionamento correto.

Numa segunda fase, analisa-se a implementação desta alteração no processo produtivo da fabricação dos reguladores, considerando questões tanto operacionais e logísticas quanto econômicas, a fim de determinar a viabilidade e os benefícios conferidos pela referida modificação e a possibilidade de estender o uso desta metodologia de fabricação para outras indústrias.

**Palavras chave:** reguladores de gás; impressao 3D; forças combinadas; materiais poliméricos; teste de materiais

## **1. INTRODUCCIÓN**

El objetivo del trabajo de investigación es el estudio de métodos alternativos de producción en la industria de los reguladores de gas, realizando un particular enfoque en la manufactura aditiva. Se estudiará la viabilidad de reemplazar métodos de fabricación convencionales de piezas de un regulador de gas por impresión 3D, y su impacto en la productividad, costos y funcionamiento.

Durante los últimos años, el desarrollo de la industria y la tecnología han dado lugar al crecimiento exponencial de la impresión 3D como técnica de manufactura, la cual antes se consideraba una tecnología sin futuro, y en contrapartida, actualmente representa una tecnología con potencial infinito. Según el informe Spending Guide de impresión 3D semestral mundial de International Data Corporation (IDC), el gasto global en impresión en 3D (incluyendo hardware, materiales, software y servicios) fue de 13,8 miles de millones de dólares en 2019, un aumento del 21,2% con respecto a 2018 [1]. Para 2022, IDC espera que el gasto mundial sea de casi 22.700 millones de dólares, con una tasa de crecimiento compuesto anual (CAGR) del 19,1% a cinco años.

A lo largo de los últimos años, las impresoras han dejado de ser equipos muy sofisticados de gran tamaño y costo, y han devenido en herramientas considerablemente más accesibles tanto para la industria como para usuarios particulares, por lo que comenzaron a utilizarse para el prototipado de piezas a nivel industrial. La impresión 3D permite generar modelos CAD (o diseño asistido por computadora) de las piezas, y obtener un primer modelo a escala, o prototipo en tan solo unas horas, para luego evaluar el diseño y poder realizar las iteraciones necesarias hasta llegar al producto final [2]. Por otra parte, y debido a la reducción de costos, muchas industrias también implementan la impresión 3D en su línea productiva, especialmente para producir piezas pequeñas con morfología compleja y que de otro modo supondría un gran costo de producción [2].

Actualmente, la industria busca incrementar el uso de esta tecnología en sus procesos con el fin de reducir costos y aumentar la versatilidad de la producción. Estas características de la manufactura aditiva forman parte de “la tercera revolución industrial” [3]. Esta revolución industrial está basada en la personalización masiva ya que ahora tanto una persona en un garaje como un lugar remoto en el mundo puede diseñar e imprimir una pieza o herramienta necesaria sin tener que pagar costos altos o esperar a que lleguen desde otras partes del mundo. Aún más, la manufactura aditiva está generando cambios lentos pero sostenidos en la geografía del Supply Chain [3]. Son estas las razones que llevan a la presente investigación del uso de manufactura aditiva a la búsqueda de soluciones de problemáticas relacionadas.

Debido a que la impresión 3D es una tecnología relativamente nueva, resulta muy importante el estudio de experiencias pasadas para poder partir de una base de información sobre las tecnologías disponibles, los materiales a utilizar, los métodos de impresión, las resistencias de los materiales, entre otros.

El desarrollo de este trabajo se basa en la búsqueda bibliográfica para recolectar información pertinente a la impresión 3D y experiencias previas del uso de esta tecnología en la producción de piezas de relevancia en el ámbito industrial. Primero se hizo un análisis de las distintas tecnologías disponibles de manufactura aditiva disponibles y sus ventajas y desventajas. Luego se realizó un estudio de los distintos materiales que se pueden utilizar con cada tecnología. Al hacer esto, se pudo formar un concepto referente a las propiedades que tendrán las piezas impresas con cada una de las tecnologías.

También se analizaron las propiedades anisotrópicas de la manufactura aditiva ya que ejercen una gran influencia sobre la morfología de la pieza. Una vez realizado el estudio relacionado a la manufactura aditiva, se hizo foco en el diseño de un estudio estadístico y control de calidad para analizar la pieza postproducción y estudiar la viabilidad de su incorporación a la línea productiva.

Este trabajo se centra en la evaluación del reemplazo de una pieza de un regulador de gas. Esta pieza forma parte del mecanismo de apertura del obturador del regulador. De esta forma, esta pieza es crucial para el funcionamiento del regulador. En la Figura 1 se muestra la pieza en cuestión.

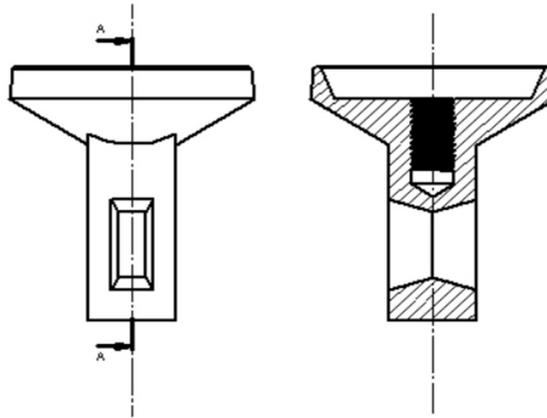


Figura 1 Vista frontal y corte de la pieza que forma parte del obturador del regulador de gas.

La pieza tiene 50 mm de alto de los cuales 35 mm son el cuerpo y 15,5 mm la corona. El cuerpo tiene una base de 16x16 mm y el diámetro de la corona es de 45 mm. En el orificio del cuerpo se encaja una palanca que abre y cierra el obturador. Además, tiene un tornillo enroscado en la corona y el borde superior está apoyado contra el diafragma del regulador (ver Figura 2).

La pieza debe ser capaz de resistir esfuerzos de tracción, compresión contra la palanca, corte en la rosca y esfuerzos de fatiga. Esto significa que deben tenerse en cuenta varios aspectos de la impresión, y no sólo las limitaciones del reemplazo del material sino también las que conllevan la fabricación de una pieza mediante manufactura aditiva.

Tras la finalización del estudio bibliográfico, se procede a hacer un análisis de la pieza de interés, donde se buscará aplicar el conocimiento bibliográfico adquirido. De esta manera se parte de una base teórica de los factores a tener en cuenta en el diseño de la pieza, los ensayos a realizar y las posibles tecnologías, materiales y técnicas de impresión que se pueden aplicar a la problemática.

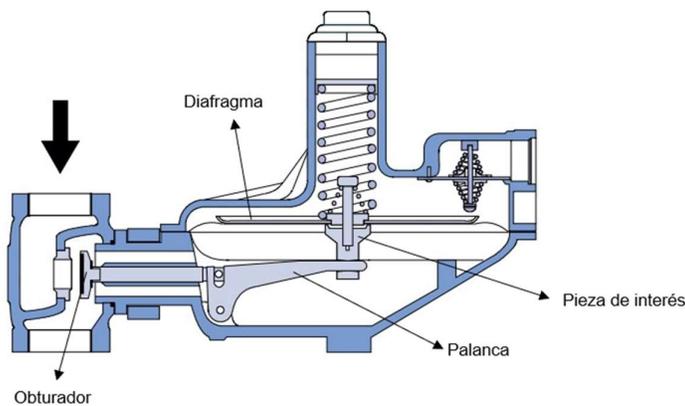


Figura 2 Diagrama de regulador de gas industrial.

## 2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS DE MANUFACTURA ADITIVA: FDM Y POLYJET

La fabricación aditiva es una herramienta que engloba todas las tecnologías de impresión 3D y hace alusión a la técnica de producción que consiste en el aporte de material por capas. Este método permite crear piezas tridimensionales a partir de un archivo digital trabajado con un software correspondiente.

Sin embargo, hay una gran variedad de tecnologías cuyo fin es compartido pero que difieren en las características finales de la pieza, procesos y reprocesos, costo, entre otras variables. Todas ellas presentan ventajas y desventajas y deberán ser elegidas con criterio en función de las restricciones o necesidades de la pieza a producir. En esta sección, se analizan dos tipos de técnicas de impresión 3D: Fused Deposition Modeling (FDM) y Polyjet.

Por un lado, FDM permite confeccionar piezas tridimensionales mediante la fusión y avance de filamento a través de un cabezal de extrusión, siguiendo las especificaciones del software. Se pueden identificar 3 etapas básicas: el pre-procesado o "slicing", la impresión en capas y el post proceso para la eliminación de material. Algunos de los aspectos que caracterizan esta tecnología son la repetitividad, el uso de polímeros termoplásticos, el bajo costo, la duración y funcionamiento de la pieza a largo plazo. Es decir, esta tecnología apunta a un alto grado de funcionamiento y rendimiento de la pieza.

Por otro lado, la tecnología Polyjet se encuentra orientada a la manufactura de piezas con un buen acabado superficial y precisión, otorgando la posibilidad de crear prototipos complejos, estéticos y delicados. La tecnología PolyJet consiste en la pulverización de materiales fotopoliméricos (materiales sensibles a una luz de determinada longitud de onda) en capas extremadamente delgadas, sobre una plataforma de construcción.

Cada capa del polímero se cura inmediatamente cuando se pulveriza con luz ultravioleta, y permite generar productos totalmente curados que pueden ser utilizados inmediatamente, entonces no se necesitan etapas posteriores de curado. El material de apoyo es similar a un gel que permite la construcción de geometrías complejas y tras la finalización de la impresión, es retirada con una mezcla de agua y soda cáustica.

A pesar de las enormes ventajas aparejadas por esta última, muchas industrias como la aeronáutica, arquitectura y automotriz optan por la tecnología FDM debido a que su costo es menor y porque permite utilizar una amplia gama de materiales ingenieriles tales como el ABS, ASA (acrilonitrilo-estireno-acrilato-nitrilo), PC (policarbonato), Nylon con fibra de carbono, ULTEM y PEEK entre otros. En particular, las necesidades de la pieza del regulador de gas que se propone estudiar se ajustan mejor a las ventajas otorgadas por FDM. Es por estas razones que se estudiará la manufactura aditiva a partir de esta tecnología.

Principalmente, los factores que se deben tener en cuenta son los siguientes:

- **Propiedades de las impresoras:** El equipo a utilizar para producir la pieza en cuestión delimitará cuales son los materiales con los que se podrá trabajar, la precisión de la impresión, tiempos de producción, volumen máximo de impresión, capacidad de personalización del proceso de impresión, costo y otras cuestiones fundamentales para la investigación. Es importante marcar la diferencia entre los equipos considerados hobbistas o de uso doméstico y los equipos profesionales. Las impresoras pertenecientes al segundo grupo realizan el proceso de impresión en cámaras cerradas con temperatura controlada dentro de las mismas esto es necesario debido a que el tamaño de las impresiones que se pueden realizar es mucho mayor que las del rubro hobbista y son capaces funcionar varios días de forma ininterrumpida. Otra diferencia crucial es que emplean materiales y softwares propios lo que les permite garantizar

tolerancias dimensionales y propiedades mecánicas de las piezas producidas de fábrica mientras que las impresoras domésticas son compatibles con materiales de distintos proveedores y software de código abierto. El resultado en las cuestiones previamente mencionadas para las piezas producidas depende fuertemente del conocimiento de la persona que hace uso de las mismas.

- **Diseño de la pieza:** Se puede aprovechar la manufactura aditiva a la hora de analizar el diseño de la pieza dado que empleando este método de fabricación se pueden obtener morfologías complejas imposibles de obtener con los métodos de fabricación más tradicionales. Se puede optimizar el diseño para mejorar las propiedades mecánicas.
- **Ensayos a realizar:** Los ensayos de laboratorio contemplados en este trabajo incluyen ensayos de tracción en probetas orientadas a 0°, 45° y 90° respecto de la dirección de aplicación de la carga uniaxial de tracción, y la caracterización de la superficie de fractura con microscopía electrónica de barrido. Adicionalmente, se puede complementar el estudio mediante simulaciones por elementos finitos con software como CATIA y ANSYS.
- **Material polimérico a ser utilizado:** Se realizaron comparaciones de las propiedades de los materiales termoplásticos ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), PEEK (polieteretercetona) y ULTEM (polieterimida) respecto de las propiedades del material de la pieza original (aleación de aluminio).
- **Dirección de impresión:** se puede ir variando, dependiendo de las solicitaciones de la pieza y afecta significativamente las propiedades. En una primera instancia se utilizan las orientaciones de impresión a 0°, 45° y 90°.
- **Temperatura de boquilla y mesada:** Para el ABS la temperatura de boquilla se encuentra entre 220°C a 240°C y la temperatura de mesada a utilizar es de 100°C a 110°C, para el ULTEM la temperatura de la boquilla debe ser de entre 370°C y 390°C y se la temperatura de la mesada (se utiliza una lámina de polieterimida (PEI) sobre la misma para mejorar la adhesión) debe ser de entre 120°C y 160°C, por último para utilizar PEEK como material de impresión la temperatura de la mesada es similar a la del ULTEM pero la temperatura de la boquilla puede alcanzar valores más altos partiendo de los 360°C hasta 450°C.
- **Velocidad de extrusión:** la misma será fundamental en el acabado y precisión. Para definir una velocidad óptima es clave tener en cuenta que se debe mantener un flujo material controlado para no generar variaciones de temperatura en la boquilla y también se presentan las limitaciones mecánicas y electrónicas en función de los componentes de los que esté compuesta la impresora.
- **Color del filamento:** puede repercutir en las propiedades del material significativamente, esto se debe a que los distintos pigmentos afectan las propiedades del material en estado puro.

### 3. ANÁLISIS MECÁNICO DE LA PIEZA Y DISEÑO CAD.

El software que se decidió utilizar para llevar a cabo el modelado de los componentes mencionados fue Catia V5 de la firma Dassault Systèmes™ y dentro del mismo se llevó a cabo el diseño paramétrico de la pieza utilizando principalmente el módulo Part Design.

En un comienzo se modeló la pieza actualmente empleada para el funcionamiento del regulador de gas y luego se realizó el modelado de posibles reemplazos manteniendo en el diseño aquellos parámetros definidos como puntos duros para el correcto funcionamiento del dispositivo. Al momento de realizar estos nuevos diseños se buscó un gran aprovechamiento de las formas complejas que son realizadas sencillamente con una impresora con tecnología FDM y también se tuvieron en cuenta las limitaciones que esta metodología presenta.

En cuanto a las ventajas es oportuno mencionar que se puede disponer de una pieza de mayores dimensiones respetando ciertas limitantes dado que el costo de material es menor que el previamente empleado. Otra característica particular fue el diseño de una cavidad dentro de la pieza donde se insertará una tuerca durante el proceso de impresión evitando de esta forma un proceso de maquinado para obtener la rosca (Figura 3) [4].

Esta técnica de impresión se implementó debido a que las roscas en manufactura aditiva tienden a tener una terminación muy deformada y los radios de los filetes no son uniformes [5]. Dentro de las limitaciones una de las cuestiones a tener en cuenta es la forma en la que será colocada la pieza en la mesada de impresión tanto por un tema de adhesión a la mesada como también la disposición de las sucesivas capas a ser impresas que conformarán la pieza. Para estudiar y comprender las variaciones generadas por las modificaciones realizadas se empleó el módulo Generative Structural Analysis y dentro de este se utilizó la herramienta Static Analysis que hace uso de análisis de elementos finitos en base a la pieza CAD para predecir su comportamiento al enfrentarse a las solicitaciones mecánicas durante el funcionamiento del regulador de gas.

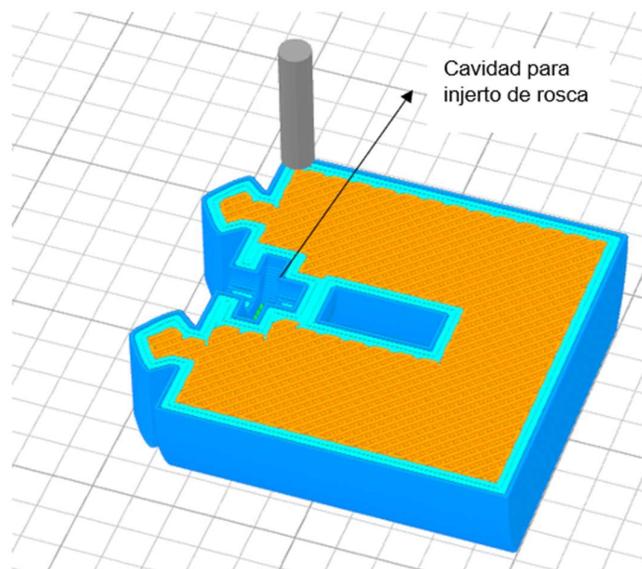


Figura 3 Cavidad para injerto de rosca en la pieza modificada

#### 4. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

La pieza a reemplazar es una parte clave en el funcionamiento del regulador de gas. Originalmente, se trata de una pieza confeccionada en Silumin (aleación de Al-Si) u otras aleaciones metálicas con excelentes propiedades mecánicas capaces de resistir los esfuerzos a los que se encuentra sometida la sección en cuestión. En cuanto a su forma, la pieza presenta un prisma rectangular de 16 mm de base en

su parte inferior con un orificio central rectangular de 8 mm de ancho y 18 mm de alto, cuya función es la de interactuar con la palanca que regula el ingreso de gas a la cámara (Figura 1, 2).

Además, la pieza está compuesta también por una copa cónica en la parte superior con un diámetro mayor de 45 mm, la cual actúa como sello en contacto con un diafragma. Cabe resaltar que las dimensiones pueden variar según el modelo, y que estas medidas se han tomado como estándar para este análisis en particular. Debido a la interacción con la palanca mencionada anteriormente, la pieza se somete a esfuerzos de tracción en la base de la pieza y a compresión en la copa.

El funcionamiento del regulador consiste en regular el ingreso de gas a la cámara para mantener una cierta presión requerida. Es importante resaltar que la presión entrante debe ser siempre mayor que la presión regulada del interior de la cámara. Cuando la presión de la cámara es mayor, la palanca se desplaza de forma tal que se generan esfuerzos de tracción en el prisma rectangular. El máximo esfuerzo de tracción que sufrirá la pieza se corresponde con la presión máxima de operación y el área del diafragma.

Una vez comprendido el funcionamiento de la pieza como así también, las fuerzas a las que se encuentra sometida, es posible analizar posibles cambios en el diseño de la pieza. Si bien el material original es ideal desde el punto de vista de sus propiedades mecánicas, la producción de la pieza acarrea costos altos considerando que se necesitan moldes para fundición en coquilla. Además, debe considerarse el hecho de que el volumen de producción promedio en una empresa de reguladores es de 1000 piezas al año, es decir, una cantidad relativamente baja en comparación a los costos de moldes.

En último lugar, cabe destacar otra ventaja importante que tiene asociada la impresión 3D; esto es la facilidad de realizar cambios y simulaciones previo a la producción de la pieza a partir de un archivo digital.

## **5. ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MANUFACTURA ADITIVA**

Existen varios factores a tener en cuenta cuando se trata de reemplazar el proceso de producción de una pieza. En este caso es incluso más crítico ya que se trata de un reemplazo del material, el método productivo, e incluso el diseño original de la pieza.

Dado que la pieza a reemplazar está limitada en un espacio dentro del regulador y tiene diferentes solicitaciones mecánicas, resulta particularmente importante el estudio de la orientación de las fibras, el acabado superficial de la pieza y su influencia en las propiedades mecánicas, la resistencia de los materiales y sus condiciones operativas.

### **5.1. Material**

En primer lugar, se debe tener en cuenta que se propone reemplazar una pieza obtenida por fundición de aluminio por un polímero, el cual tiene una resistencia mecánica muy inferior y temperaturas de operación más limitadas (ver Tabla 1).

Tabla 1: Propiedades físicas y mecánicas del silumin y polímeros analizados

Propiedad	Silumin [6]	Nylon 30%RF V [7]	ABS [8, 9]		PLA [10]	PEEK [11]
			monofil	i3D FDM	SC	SC
Módulo de Young [GPa]	60	5,7-11	2,07	1,55	3,5	3,7
Tensión de fluencia / Límite Elástico [MPa]	138 - 210	160 - 210	25,3	0° // 22.4 - 25.5	37*	56,6 - 72
Resistencia a la tracción [MPa]	196	142-156	-	37	50	100
Alargamiento a la rotura [%]	2- 20	2 - 5	-	3,5 - 50	6	30 -150
Resistencia al Impacto [J/m] (T ambiente)	-	120 - 135 (Izod)	-	200 - 215	-	80 - 94
Temperatura máxima [°C]	480	80 - 200	Tg = 94	Sin Tm, amorfo	Tm= 173 Tg= 60	Tm=341 Tg=143

Para esto se propone realizar simulaciones por elementos finitos para analizar la respuesta a solicitaciones por cargas estáticas, temperatura y fatiga para determinar las propiedades resultantes como así también si debe contemplarse un posible cambio del diseño actual.

Sin embargo, una limitación que presentan las simulaciones por elementos finitos es que estas consideran a la pieza como un bloque de polímero sólido, mientras que en la realidad, la estructura obtenida por manufactura aditiva consiste de muchas capas de filamentos que se van depositando en la pieza durante la fabricación. Esto genera un apilamiento de los filamentos que puede ser controlado mediante la variación de los parámetros de impresión de la pieza. Por otro lado, para fortalecer las áreas donde existen grandes esfuerzos de corte, se puede imprimir en una dirección más cercana a la perpendicular.

De la misma manera, donde existe una alta fuerza de tracción es posible imprimir en una dirección paralela a la dirección de la tracción para maximizar la resistencia de la pieza a dichas solicitaciones [12]. Estos factores de diseño de impresión afectan significativamente la resistencia mecánica de la pieza y podría afectar los resultados en los ensayos experimentales como así también, durante una simulación por elementos finitos.

## 5.2. Dirección de impresión

La dirección de impresión es un factor muy importante a considerar cuando se diseña la pieza. Esto se debe a las propiedades anisotrópicas de las piezas fabricadas por manufactura aditiva. La resistencia de

la pieza no será la misma si la carga se realiza de forma perpendicular que si se realiza de forma paralela a la dirección de impresión. La deposición de los filamentos de polímero fundido es la principal causa de la característica anisotrópica. En las universidades Bucknell y Duke se realizaron estudios comparativos de las propiedades mecánicas de piezas impresas con diferentes configuraciones de direcciones de impresión [12].

Se realizaron cinco tipos de ensayos mecánicos (tensión, compresión, flexión, impacto y fatiga). Se imprimieron bloques rectangulares en ABS para los ensayos de tensión, flexión y fatiga; un cilindro para la prueba de compresión y un bloque rectangular con ranura para la prueba de impacto. Cada una de las piezas se imprimió con dirección de impresión longitudinal, a 45 grados, 45 grados cruzado<sup>2</sup> y transversal (90 grados). Los resultados mostraron que el límite elástico medio para la orientación longitudinal fue la más resistente con 25,52 MPa. La impresión a 45 grados cruzada tuvo el segundo mejor límite elástico medio con 18,90 MPa y el diagonal (45 grados simple) y transversal (90 grados) tienen los límites elásticos medios más bajos con 15,68 MPa y 14,35 MPa respectivamente. Como era de esperarse, tiene mayor rigidez una pieza impresa con las fibras paralelas a la dirección de esfuerzo. Sin embargo, hay que considerar la anisotropía que esto le genera a la pieza.

Además, si se observa la forma de la pieza en cuestión y se imprime con una dirección de fibras vertical, por un lado, será mucho más resistente a las fuerzas de tracción, pero, por otro lado, justo debajo del orificio se generarán áreas de corte que serán muy débiles. Es por esto que se propone imprimir la pieza con una configuración de 45 grados cruzada. Para que se generen los ángulos de 45 grados con la dirección de esfuerzo, se propone que se imprima la pieza de manera horizontal, es decir, con una de las caras perforadas completamente apoyada sobre la mesada de impresión. Se propone imprimir varias iteraciones de cada modelo de pieza propuesta y replicar los ensayos de este estudio y validar los resultados con los diseños de la pieza en cuestión.

### 5.3. Terminación superficial

Otro factor a tener en cuenta es el acabado superficial debido a que la pieza a sustituir posee un requerimiento de rugosidad media entre 1,2 $\mu$ m y 3,6 $\mu$ m (requerimiento dado por el fabricante). Dado que la rugosidad media obtenida por FDM es del orden del milímetro, el acabado superficial del material debe asegurarse para garantizar un correcto funcionamiento de la pieza dentro del conjunto. En particular, esta pieza requiere una buena terminación para evitar filtraciones y cambios de presión no deseados. Esto se debe a que la corona de la pieza se apoya contra el diafragma de acrílico nitrilo (ver Figura 2).

Este atributo dependerá de las especificaciones de la impresión, la máquina utilizada y el material. Es por este motivo que cabe analizar técnicas de postproceso como la exposición al vapor de acetona en el caso del ABS, que contribuyan a un mejoramiento de acabado superficial sin dañar mucho las propiedades de resistencia del material [13]. Si bien estos tratamientos pueden favorecer enormemente la terminación superficial, se presentan ciertas desventajas relacionadas con la pérdida de propiedades, lo cual podría resultar crítico en la pieza analizada.

Por otro lado, estas técnicas suelen aplicarse con fines estéticos y no se han encontrado muchas investigaciones que actualmente denotan en detalle las desventajas técnicas que acarrearán. Además, resulta complejo determinar la buena repetitividad de postprocesos artesanales ya que los resultados

---

<sup>2</sup> 45 grados cruzados se refiere a la impresión de una capa en dirección 45 grados en un sentido y la siguiente con 45 grados en el otro sentido, de manera que los filamentos quedan a 45 grados.

podrían diferir entre pieza y pieza. En último lugar, se pueden llevar a cabo tratamientos térmicos para eliminar tensiones residuales debidos al proceso de contracción durante la impresión.

#### **5.4. Costos**

Como se mencionó anteriormente, si bien la manufactura aditiva es una tecnología aún muy joven, los costos operativos asociados son cada vez menores. Una de las principales ventajas de la manufactura aditiva es la versatilidad, ya que se puede comenzar a producir una nueva pieza o cambiar el diseño de la misma, con muy bajo costo ya que no hay que invertir en matrices metálicas costosas como en el caso del moldeo por inyección de polímeros o moldes para fundición de aluminio.

Además, se pueden lograr una gran variedad de piezas con la misma impresora. Esto es lo que se busca ganar con la manufactura aditiva y que compensa la disminución de resistencia del material cuando se reemplazan metales por polímeros. A pesar de la gran reducción de costos, resulta fundamental equiparar las propiedades necesarias para un buen funcionamiento de la pieza.

Para poder analizar esto hay que tener en cuenta qué material y la impresora que se va a usar, cuántas piezas se van a imprimir por año, los costos de capacitación de personal que opere las máquinas, mantenimiento de las máquinas, entre otras variables logísticas asociadas al proceso de manufactura mencionado.

Estos representan los principales factores que se deben tener en cuenta a la hora de evaluar el uso de manufactura aditiva para reemplazar la pieza del regulador. De esta manera se propone definir variables que permitan medir la manera en que la manufactura aditiva impacta en el proceso según cada factor. Esta medición se hará teniendo en cuenta las propiedades que tiene la pieza actual de manera que se busca comparar la solución propuesta con el estado actual. Después, se propone realizar una matriz de decisión que permita ponderar cada variable de acuerdo a la importancia que se le da a cada una. Esto permitirá tener una herramienta precisa para decidir si es factible llevar a cabo el cambio o si se deben reevaluar algunos aspectos para que resulte viable.

Una vez realizados los ensayos propuestos a la pieza y habiendo llegado a un nuevo diseño de esta, se propone hacer un ensayo estadístico de test de hipótesis. Este consiste en establecer valor de carga objetivo que la pieza debe soportar en su punto más débil (orificio del cuerpo) y partir de la hipótesis nula de que la resistencia media de la pieza es menor a ese valor. A partir de esta hipótesis se debe calcular una cantidad representativa de muestras (piezas impresas lo más uniformes posible) y cargarlas con el valor de carga objetivo. Se evaluarán los resultados de la carga resistida y se buscará rechazar la hipótesis nula para poder asegurar con un determinado nivel de confianza que la pieza resiste esa carga. Este análisis es muy importante ya que permite obtener una idea de cómo se comportan las piezas impresas para la producción a partir de una pequeña muestra.

## **6. CONCLUSIONES**

Esta investigación propone como método alternativo para la producción de piezas de reguladores de gas a la impresión 3D de polímeros, reemplazando las aleaciones metálicas, utilizando la tecnología FDM. Se realizó un estudio bibliográfico de la manufactura aditiva en donde se evaluaron varios aspectos de la tecnología disponible y las propiedades de las piezas impresas.

Para realizar el análisis, se tuvieron en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales, las solicitaciones a las cuales se encuentra sometida la pieza, las temperaturas de funcionamiento y las tolerancias dimensionales. En primer lugar, se utilizaron los módulos Part Design y Generative Structural Analysis del software Catia V5 para el modelado de la pieza y análisis de la misma por elementos finitos. Se concluyó que es posible, dadas las dimensiones de la cámara del regulador, aumentar las propiedades mecánicas de la pieza al agregar material en las paredes de esta.

Debido al contexto de Covid-19 en el que se desarrolla el trabajo, se deja a investigaciones futuras la realización de ensayos mecánicos. De todas formas, el software ha permitido un elevado grado de análisis que junto a información proveniente de otros estudios ha facilitado la detección de los factores que inciden directamente en la impresión y posterior funcionamiento de la pieza. En segundo lugar, la dirección de impresión de la pieza juega un rol fundamental debido a las propiedades anisotrópicas que son producto de la deposición de los filamentos de polímero fundido.

La resistencia de la pieza no será igual si la carga se realiza de forma perpendicular que si se realiza de forma paralela a la dirección de impresión. Si se imprime con una dirección de fibras vertical, por un lado, será mucho más resistente a las fuerzas de tracción, pero, por otro lado, se generarán zonas de corte que resultarán muy débiles. Es por esto que se propone imprimir la pieza con una configuración de 45 grados cruzada.

Nuevamente, dadas las limitaciones, se deja a futuras investigaciones la comprobación experimental de esta sugerencia. En cuanto al acabado superficial, este es un aspecto clave en el funcionamiento debido a que se trabaja con presiones que podrían verse afectadas ante pérdidas o rugosidades en la superficie. La rugosidad media obtenida por FDM es del orden del milímetro, y es por este motivo que se recomienda la aplicación de técnicas de postproceso para asegurarse esta característica. Sin embargo, cabe destacar que estos métodos pueden resultar nocivos para las propiedades mecánicas si los parámetros de tiempo de exposición y tipo de ataque químico no son cuidadosamente ajustados en una etapa previa. En último lugar se examinaron los costos que conlleva la impresión 3D.

Ésta es una de las claras ventajas que presenta la manufactura aditiva ya que con tan solo una impresora, filamento y el software indicado se puede llevar a cabo la producción de varias piezas, es decir, se reducen significativamente los costos operativos y se permite un alto grado de versatilidad. A diferencia de la fundición o inyección, no se requieren matrices metálicas, ya que se trabaja con un archivo digital en el que se pueden realizar cambios en el diseño de las piezas sin impactar los costos operativos.

Para completar el trabajo, el análisis estadístico le proporcionará a la pieza diseñada un nivel de confianza operacional, por lo que se podrá evaluar si la propuesta de cambio será efectiva. A su vez, la matriz de decisión permitirá evaluar el reemplazo de la pieza ponderando los distintos parámetros y denotar dónde están las ventajas y desventajas de la nueva pieza.

## REFERENCIAS.

- [1] Interempresas. (2019). "En 2019, el gasto mundial en impresión 3D se incrementará un 21,2% según IDC" [interempresas.net](https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/231650-En-2019-el-gasto-mundial-en-impresion-3D-se-incrementara-un-21-2-por-ciento-segun-IDC.html), Redacción Interempresa, <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/231650-En-2019-el-gasto-mundial-en-impresion-3D-se-incrementara-un-21-2-por-ciento-segun-IDC.html>
- [2] Ramirez, Rodrigo; Ariza, Raquel; Ceballos, Jorge; Vergelín, Pablo; Sandre, Cristian; Nemcansky, Kevin; Zunini, Cesar; Palladino, Cecilia; Secchi, Mariela; Apecema, Luciana; Becker; Rosalba. (2015). "Panorama de la i3D". INTI. 1a ed, pp 5-22. San Martin: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- [3] Gao, Wei; Zhang, Yunbo; Ramanujan, Devarajan; Ramani, Karthik; Chen, Yong; Williams, Christopher B; Wang, Charlie C.; Shin, Yung C; Zhang, Song; Zavattieri, Pablo D. (2015) "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering". Elsevier. Computer-Aided Design, Volumen 69, pp 65-89 <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- [4] Crease, Alex. (2016). "Embedding Nuts in 3D Printed Parts for Hidden Fastener Strength". Markforged. Disponible en <https://markforged.com/blog/embedding-nuts-3d-printing/>
- [5] Tronvoll, Sigmund A; Elverum, Christer W; Welø, Torgeir. (2018). "Dimensional accuracy of threads manufactured by fused deposition modeling". Science Direct. Procedia Manufacturing 26, NTNU, Trondheim, Noruega.
- [6] Angiolani, Argeo. (1960). Introducción a la Química Industrial. Editorial Andrés Bello, 1960.
- [7] "Poliamida - Nilón 6, 6 Reforzado Con 30% Fibra De Vidrio - Catálogo En Línea - Materiales En Pequeñas Cantidades Para El Diseño - Goodfellow". Goodfellow.Com, 2020, <http://www.goodfellow.com/S/Poliamida-Nilon-6-6-reforzado-con-30-fibra-de-vidrio.html>. Accessed 9 July 2020.
- [8] Rodriguez, Jose & Thomas, James & Renaud, John. (2001). "Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials". Experimental investigation. Rapid Prototyping Journal. 7. 148-158. [10.1108/13552540110395547](https://doi.org/10.1108/13552540110395547).
- [9] "Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS Plastic): Uses, Properties & Structure". (2020). Omnexus.Specialchem.Com. <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-plastic>.
- [10] "Polylactic Acid Or Polylactide, PLA Plastic, Lactic Acid Polymer Guide". (2020). Omnexus.Specialchem.Com, Visita: 14/07/2020. <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polylactide-pla-bioplactic>.
- [11] "Polyether Ether Ketone (PEEK Plastic): Uses, Properties & Material Guide". (2020) Omnexus.Specialchem.Com. <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyetheretherketone-peek-thermoplastic>
- [12] Ziemian, Constance; Sharma, Mala; Ziemian, Sophia. (2012). "Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling". Mechanical Engineering, Dr. Murat Gokcek (Ed.), pp 1-23 ISBN: 978-953-51-0505-3, InTech. <http://www.intechopen.com/books/mechanical-engineering/anisotropicmechanical-properties-of-abs-parts-fabricated-by-fused-deposition-modeling>

[13] Costa, Vivian Thais Leite; Nan Pai, Chi. (2019). "Superficial Characteristics of Acetone Vapor treated ABS Printed Parts for use in Upper Limb Prosthesis". Springer Nature Singapore, XXVI Brazilian Congress on Biomedical Engineering. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-2119-1\\_57](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2119-1_57)