

Optimización de piezas mecánicas mediante el análisis de componentes por técnicas de Diseño Generativo

C. E. Robles Gines^{1*}, S. S. Basilio Guillén², P. F. Pacheco García³

^{1,2,3} Departamento de Ingeniería Mecatrónica, UPAEP Universidad, 17 Sur #901, Barrio de Santiago, C.P. 72410, Puebla, México.

[*cristianeliud.robles@gmail.com](mailto:cristianeliud.robles@gmail.com)

Área de participación: Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Resumen

Se presenta un análisis de los beneficios de optimizar piezas mecánicas por técnicas de Diseño Generativo. Se manufacturaron piezas de manera clásica por impresión 3D. Posteriormente se les hicieron pruebas de tracción para determinar el límite elástico y la carga de rotura, una vez obtenidos estos datos se les aplicaron procesos de Diseño Generativo reduciendo su masa en un 30, 40 y 50 %. Se imprimieron estos diseños optimizados y se sometieron nuevamente a pruebas de tracción y se encontró que soportaban los mismos esfuerzos que la pieza con el diseño original. Además, se hizo una comparación utilizando pruebas de tensión a probetas normalizadas, unas manufacturadas por impresión 3D y otras manufacturadas por moldeo por compresión, con el fin de conocer las diferencias mecánicas y establecer las bases para realizar impresiones 3D que se acerquen lo más posible a las piezas moldeadas por técnicas estandarizadas como el moldeo por compresión.

Palabras clave: Diseño, Generativo, Optimización, Topología.

Abstract

An analysis of the benefits derived from optimizing mechanical parts by Generative Design techniques is presented. Parts were classically manufactured by 3D printing. Later they were tested for traction to determine the yield strength of the parts and the breakage load, once this data was obtained, generative design processes were applied to them by reducing their mass by 30, 40 and 50 %. These optimized designs were printed and re-tested and found to support the same efforts as parts with the original design. In addition, a comparison was made analyzing results of stress tests to standardized test pieces, some manufactured by 3D printing and others manufactured by compression molding, with the goal to know the mechanical differences and establish the bases for making 3D prints that are as close as possible to the parts molded by standardized techniques such as compression molding.

Key words: Design, Generative, Optimization, Topology.

Introducción

Los sistemas generativos se han utilizado a lo largo de la historia, por ejemplo, en diseños renacentistas, arquitectura gótica y en patrones islámicos [1]. Este último es quizás el mejor ejemplo de cómo los humanos usan geometrías para comprender las relaciones entre los humanos y la naturaleza. Gracias a la llegada de las computadoras en la década de 1960 que poseían la capacidad para generar geometrías complejas, dio origen al arte generativo [2]. La investigación en lo que ahora se conoce como diseño generativo, fue iniciada por Frazer a principios de la década de 1970. Su desarrollo ha pasado por varias fases, lideradas principalmente por investigadores académicos enfocados en gran medida sobre la teoría del diseño, sin embargo, se reconoció la falta de métodos de implementación formales para el diseño generativo [3]. En la década de 1980 su uso se expandió a la Arquitectura, la Ingeniería y la Industria de la construcción [2]. El diseño Generativo es un camino apasionante para el diseño de productos que seguirá desarrollándose en los próximos años, se volverá más fácil de usar y fácil de integrar en los procesos de diseño existentes, mejorará la forma en que se crean las soluciones de diseño y cómo abordan las necesidades del mundo real [4].

Hoy en día existen herramientas que benefician a una empresa manufacturera y la pueden hacer más competitiva, ejemplo de estas herramientas son el Diseño Generativo y el análisis por método de elementos finitos [5]. Se ha hablado de estos conceptos desde hace por lo menos treinta años, pero solo recientemente se han empezado a difundir gracias a que se han empezado a incluir como parte de los lenguajes CAD, dedicados al diseño, ingeniería,

el arte, la animación, la multimedia y el nuevo hardware para la impresión 3D y la robótica. Dentro de este universo en ebullición, una de las novedades que promete ser más duradera, porque no es solo técnica, sino también estética, filosófica y epistemológica, es el arte generativo. Lo generativo, como concepto, deriva de la lingüística y de algunas teorías de las ciencias de la complejidad, como los sistemas dinámicos, el caos, la vida artificial y las simulaciones matemáticas de eventos naturales. Como práctica, lo generativo se está convirtiendo en una parte importante de las ciencias de la computación aplicadas al *diseño*, la arquitectura y las artes en general. La literatura dedicada al arte generativo es todavía escasa, y más aún, la que investiga el paradigma generativo desde el punto de vista teórico. Sin embargo, ha habido un pequeño pero creciente número de proyectos que utilizan el diseño generativo como herramienta de investigación [1]. El arte generativo resulta fascinante porque apela a las ciencias, las máquinas, el trabajo distribuido, la convergencia de saberes y herramientas y también porque aprovecha plenamente el potencial de las herramientas digitales, como lo demuestran los trabajos del creciente número de investigadores y artistas que se dedican a estudiarlo [6].

La pregunta que muchos *diseñadores* e ingenieros nos hacemos cuando estamos diseñando una pieza es si ¿Romperá dentro de los límites especificados? y definimos parámetros como el espesor de un nervio, el radio de un redondeo o el ángulo de un chaflán. Con la ayuda de software especializados en la simulación y optimización de geometrías como es el caso de Solid Edge ST10® [7] en donde se pueden diseñar modelos tridimensionales de piezas y ensamblajes al mismo tiempo que definimos conceptualmente la geometría de los mismos. Se puede validar el diseño sin necesidad de fabricar un prototipo físico y tener que aplicar un exhaustivo número de pruebas para determinar sus propiedades mecánicas, con esto se acorta el tiempo de definición de un producto con la certeza de que el diseño es el adecuado y que el producto soportará las condiciones de uso a las que estará expuesto [5]. Asimismo, este software permite definir objetivos y criterios para diseños CAD funcionales, luego genera iteraciones ofreciendo cientos de posibles soluciones. Este proceso presenta un cambio radical, ya que las computadoras no solo facilitan las ideas del diseñador, sino que también rediseñan, mientras los diseñadores todavía están a cargo del proceso depurando soluciones, una de las ventajas es que la relación entre humano y máquina se convierte en colaborativa [2], otra de las ventajas es ahorrar tiempo y evitar errores durante las etapas de diseño [8]. Los conceptos clave del paradigma generativo son la autoorganización y la emergencia, términos que definen los fenómenos naturales o artificiales espontáneos, no planificados, fruto de la libre interacción de los elementos de un sistema complejo que posibilita el surgimiento de estructuras y formas impredecibles e impensables desde el diseño clásico [6].

En este trabajo se detalla cómo se realizó el diseño clásico de 3 cubos de diferentes dimensiones, mismos que se manufacturaron en una impresora 3D MakerMEX [9] con un material ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) de alto impacto para posteriormente, someterlos a pruebas mecánicas de tensión y obtener los valores de esfuerzos a los que dichas piezas fracturan. Una vez obtenido estos valores nos transportamos al ambiente virtual Solid Edge® en donde se optimiza la topología de estas piezas por la técnica de diseño generativo, asegurándonos de que aun cuando resultan geométricamente diferentes a las originales, pueden realizar la misma función (se preservan regiones necesarias), los modelos se validan por el método de elementos finitos, posteriormente se manufacturaron estos nuevos diseños con la misma impresora y el mismo material para nuevamente hacerle las pruebas de tensión y comparar resultados.

Metodología

Todo proceso natural es una fuente adecuada de principios generativos. La calidad del proceso generativo artificial depende de la calidad del modelo que se elabora a partir del proceso natural. Es necesario definir cuál es la diferencia entre el diseño clásico y el diseño generativo [6].

Tabla 1. Comparativa entre Diseño clásico y Diseño generativo [6].

DISEÑO CLÁSICO	DISEÑO GENERATIVO
Objetivo → Idea → Diseño → Producción → Artefacto	Objetivo → Principio Y Proceso Generativo → Selección → Producción → Artefacto
El artefacto corresponde, necesariamente, a la idea de acuerdo con el diseño, a menos que se hayan cometido errores en el proceso de producción.	El artefacto corresponde a seleccionar el mejor, dentro de las diversas opciones que nos ofrece el proceso generativo, en base a las exigencias y las especificaciones requeridas.

El diseño generativo proporciona múltiples beneficios para el desarrollo de nuevos productos. Primero es la creación de intrincados patrones que se parecen a los sistemas naturales, alejándose de las formas geométricas típicas del diseño mecánico. Segundo es la automatización de procesos donde las computadoras realizan tareas complejas y repetitivas que serían demasiado difíciles o tediosas para los humanos. Las oportunidades que la automatización proporciona son con frecuencia consideradas el principal beneficio del diseño generativo en la creación de nuevos productos. En ambos enfoques, los resultados que las computadoras generan son impulsados principalmente por una visión del diseñador, que ya tiene una idea general de cómo se vería el resultado [2].

Diseño en software de CAD

Las piezas que se diseñaron de manera clásica en el software Solid Edge fueron 3:

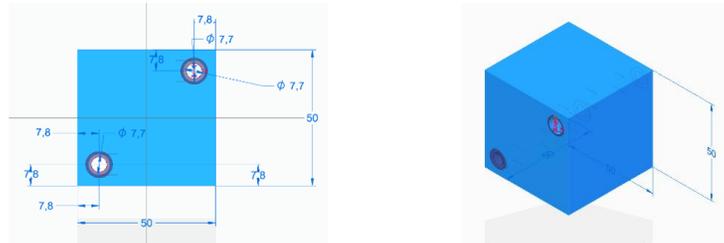


Figura 1. Cubo "A"- Dimensiones *Alto: 50 mm Ancho: 50 mm Profundo: 50 mm*.

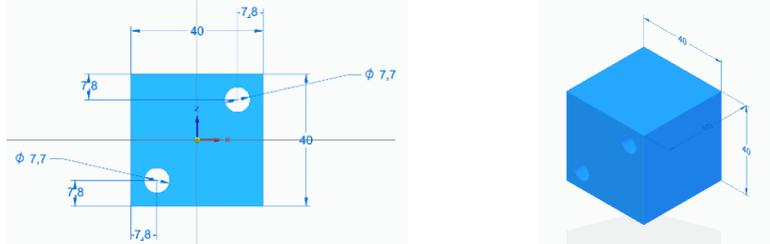


Figura 2. Cubo "B"- Dimensiones *Alto: 40 mm Ancho: 40 mm Profundo: 40 mm*.

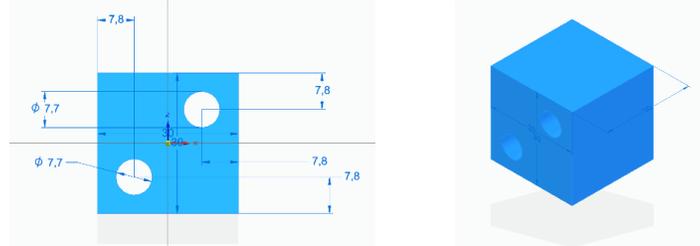


Figura 3. Cubo "C"- Dimensiones *Alto: 30 mm Ancho: 30 mm Profundo: 30 mm*.

Posteriormente se manufacturaron en la impresora 3D Makermax, como se muestran en la siguiente figura:

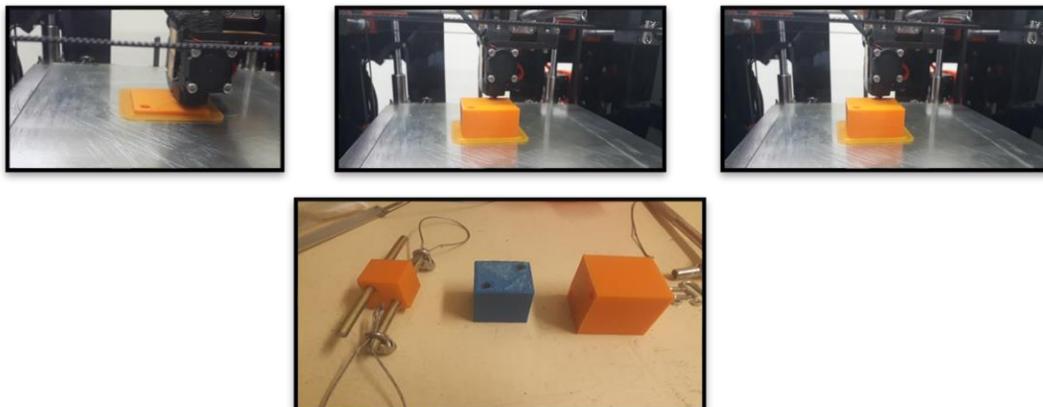


Figura 4. Cubos "A, B, y C"- Impresos.

Pruebas de Tensión a cubos iniciales

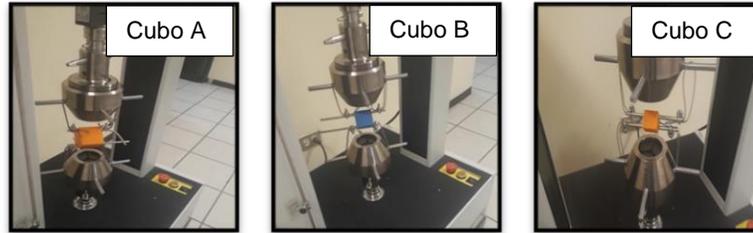


Figura 5. Realización de Pruebas mecánicas de tensión en laboratorios de la UPAEP.

Una vez obtenidos los resultados, se analizaron y se decidió únicamente aplicarle Diseño Generativo al cubo “B” ya que en los 3 cubos (A, B y C), como se muestra más adelante, soportaron el mismo esfuerzo, por lo cual se consideró innecesario optimizar los 3.

Aplicación de Diseño Generativo con base en datos obtenidos

Realizando Diseño Generativo en el ambiente virtual Solid Edge al cubo “B” se obtuvieron 3 nuevos diseños optimizados, a los cuales les llamaremos cubo B_1 , B_2 y B_3 . El cubo B_1 tuvo una reducción de su masa en un 30 %, el cubo B_2 una reducción de un 40 % y el cubo B_3 una reducción de un 50 %. Dichos cubos se muestran en las siguientes imágenes:

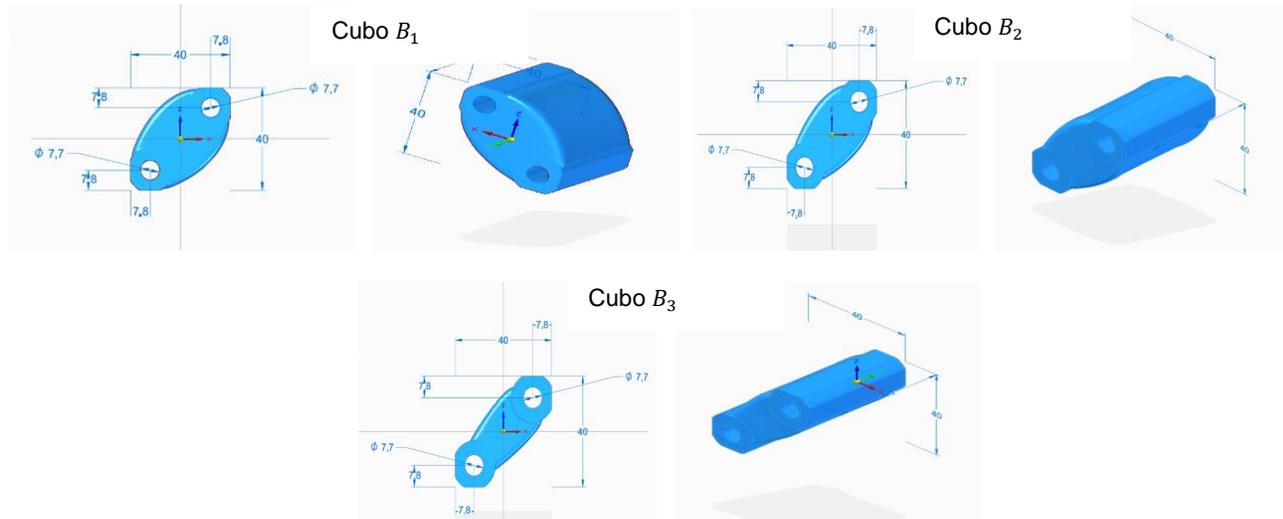


Figura 6. Diseño de Cubos B_1 , B_2 y B_3 .

Impresión 3D

Ya optimizados los cubos B_1 , B_2 y B_3 , se manufacturaron en la impresora 3D Makermex exactamente con los mismos parámetros de impresión que los cubos A, B y C.

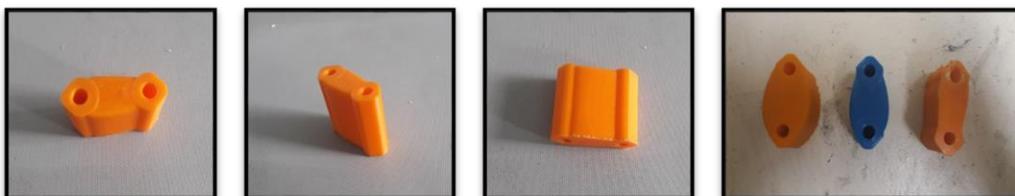


Figura 7. Cubos B_1 , B_2 y B_3 impresos.

Pruebas de tensión a cubos B_1 , B_2 y B_3

Obtenidos estos cubos se procedió a realizarles las pruebas mecánicas de tensión como se muestra en la siguiente figura:

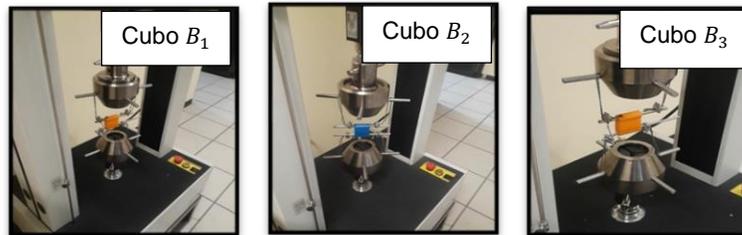


Figura 8. Realización de Pruebas mecánicas de tensión en laboratorios de la UPAEP.

Comparación de los resultados de pruebas de tensión de probetas normalizadas

El moldeo es el procedimiento más común para conformar los polímeros plásticos, en esta técnica, el plástico finamente granulado se fuerza, mediante temperatura y presión, a fluir dentro del molde, a llenarlo y a adoptar su forma. Ambas piezas de molde se calientan, pero solo una se desplaza. El molde se cierra y el calor y la presión aplicados hacen que el material plástico se convierta en viscoso y adquieran la forma del molde [10].



Figura 9. (A) Esquema de un aparato de moldeo por compresión [11], (B) Plástico granulado y molde utilizado con el mismo diseño que el de impresión 3D y (C) Manufacturando la probeta en laboratorios de la UPAEP.

Diseño de probetas normalizadas en el software SolidWorks® [12]

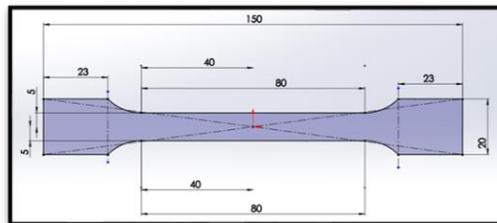


Figura 10. Dimensiones de probeta normalizada [13].

A continuación, se muestran las probetas manufacturadas y listas para someterlas a pruebas de tensión.



Figura 11. Probetas manufacturadas de color azul, por Impresión 3D y de color blanco, por moldeo de compresión.

Una vez obtenidas se les realizaron las pruebas de tensión en el laboratorio del CESAT (Centro de Servicios de Alta Tecnología) de la UPAEP.

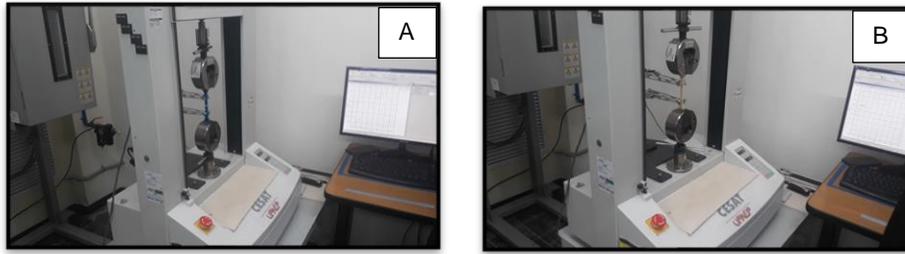


Figura 12. (A) Prueba de tensión a probeta impresa en 3D y (B). Prueba de tensión a probeta manufacturado por moldeo de compresión.

Resultados y discusión

Datos de las pruebas de tensión obtenidos del software NexygenPlus [14] de los cubos A, B y C

Tabla 2. Datos de prueba de tensión Tiempo-Carga.

	Time (s)	Load (N)
Cubo A	30.44	1645.4
Cubo B	32.91	1610.8
Cubo C	52.35	1651.2

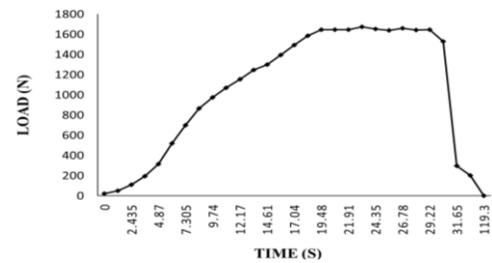


Figura 13. Load (N) - Time (S) del cubo A.

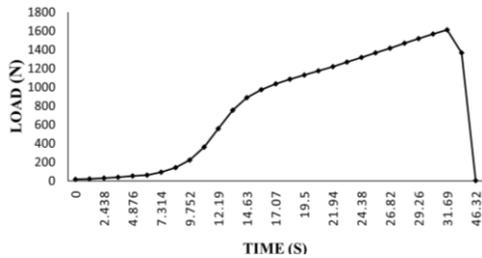


Figura 14. Load (N) - Time (S) del cubo B.

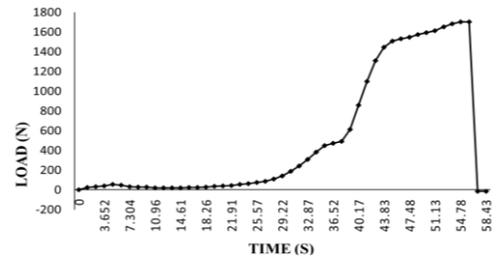


Figura 15. Load (N) - Time (S) del cubo C.

Datos de las pruebas de tensión obtenidos del software NexygenPlus de los cubos B_1 , B_2 y B_3

Tabla 3. Datos de prueba de tensión Tiempo-Carga.

	Time (s)	Load (N)
Cubo B_1	52.36	1749.9
Cubo B_2	36.81	1937.2
Cubo B_3	34.08	1578.6
Promedio	1755.2	

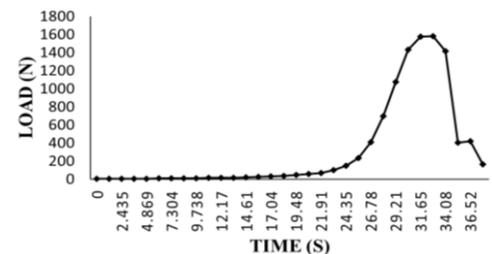


Figura 16. Load (N) - Time (S) del cubo B_1 con una reducción de material en un 30%.

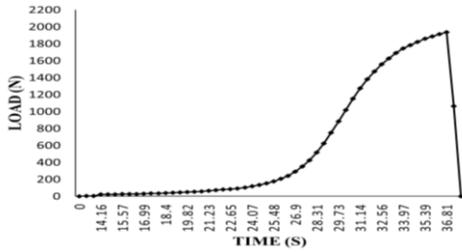


Figura 17. Load (N) - Time (S) del cubo B_2 con una reducción de material en un 40 %.

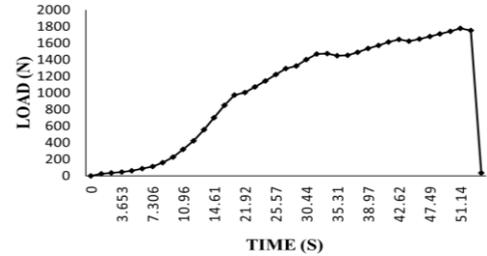


Figura 18. Load (N) - Time (S) del cubo B_3 con una reducción de material en un 50 %.

Datos de las pruebas de tensión obtenidos del software NexygenPlus para las probetas manufacturadas por moldeo de compresión

Tabla 4. Datos de prueba de tensión de probeta manufacturada por moldeo de compresión.

Prueba	Tensión	Espécimen
ID Prueba	PMU.185.1 9	Probeta 1
Fecha	2019.12.02	Probeta 2
Humedad	49	
Material		
Cotización		
Velocidad	50 mm/min	Max_Stress
Descartar	Units	MPa
	Probeta 1	27.2
	Probeta 2	26.9
	Promedio	27.1

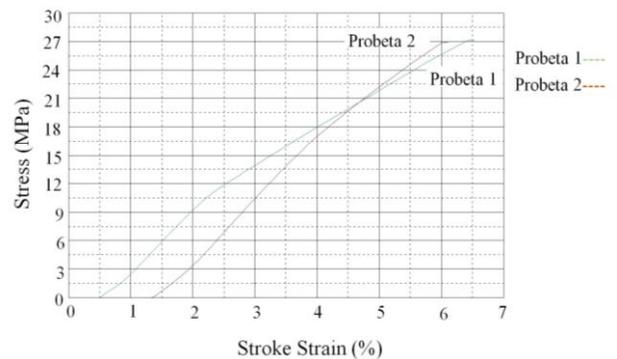


Figura 19. Load (N)- Stroke Strain (%) probeta manufacturada por moldeo de compresión.

Datos de las pruebas de tensión obtenidos del software NexygenPlus de las probetas impresas en 3D

Tabla 5. Datos de prueba de tensión de probeta impresa en 3D.

Prueba	Tensión	Espécimen
Prueba	PMU.184.1 9	Probeta 1
ID Prueba	2019.12.02	Probeta 2
Fecha	21.5	Probeta 3
Velocidad	50 mm/min	
	Name	Max_Stress
	Units	MPa
Descartar	Probeta 1	29.5
	Probeta 2	29.7
	Probeta 3	27.1
	Promedio	28.8

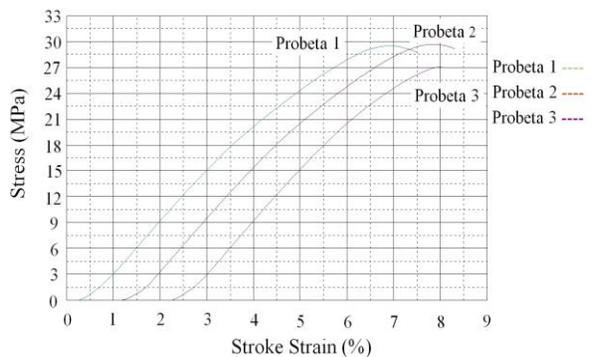


Figura 20. Load (N)- Stroke Strain (%) probeta impresas en 3D.

Como se puede apreciar, los valores promedio de los 2 tipos de probetas varían.

Trabajo a futuro

Se profundizará en el desarrollo de un mayor número de pruebas de diseño, simulación y manufactura aditiva, con la finalidad de encontrar parámetros confiables para la optimización de piezas funcionales impresas con diferentes materiales plásticos de ingeniería a través de la manufactura aditiva. Existe una amplia variedad de

requerimientos en la industria en la que una pieza de plástico juega un papel importante en un proceso, y que de fallar implica que dicho proceso se detenga o no se pueda llevar a cabo hasta recuperar dicha pieza, de modo que el uso del diseño generativo, que de entrada apoya en la optimización de la geometría y por tanto del uso de los materiales, nos deja la posibilidad de seguir explorando hasta encontrar las condiciones de diseño y manufactura para desarrollar piezas funcionales para la industria.

Conclusiones

El diseño generativo se está convirtiendo en una herramienta clave para el diseño industrial, proporcionando un amplio número de beneficios, uno de los más importantes, es la gran capacidad que ofrece para la automatización en los procesos de diseño, pero además ofrece un estilo estético único inspirado en las formas de la naturaleza.

A los diseñadores se les recomienda tomar en cuenta esta herramienta, para integrar la automatización en sus procesos, y con esto, potencializar sus diseños haciéndolos más eficientes y resistentes, utilizando geometrías intrincadas. Con ventajas en rendimiento mecánico y uso de materiales [4].

En base a los resultados obtenidos, se ha encontrado que las piezas a las que se les aplicó Diseño Generativo, ofrecieron la misma resistencia a la ruptura en comparación con las piezas diseñadas con geometrías clásicas, por ejemplo un cubo, con la ventaja que se obtiene un ahorro de material que puede ir del 30, al 50 %, para mayores porcentajes las propiedades de las piezas ya se vieron afectadas, y como ya se ha mencionado, esto se traduce en una reducción de costos y al mismo tiempo acorta el desarrollo de nuevos productos.

Por otra parte, comparando los resultados entre las probetas manufacturadas por moldeo de compresión y las probetas manufacturadas por impresión 3D, si lo que se busca es resistencia a la ruptura en esfuerzos de tensión, las probetas manufacturadas por impresión 3D ofrecerán mayor resistencia.

Agradecimientos

A CONACYT por su valioso apoyo para la realización de este trabajo, al área de Laboratorios de Ingeniería de UPAEP y al CESAT de UPAEP.

Referencias

- [1] N. Webb y A. Buchanan, «Digitally aided analysis of medieval vaults in an English cathedral, using generative design tools,» *International Journal of Architectural Computing*, vol. 17(3), p. 241–259, 2019.
- [2] A. Lobos, «Applying Generative Systems to Product Design,» *XXII Generative Art Conference - GA2019*, pp. 1-9, 2019.
- [3] S. Krish, «A practical generative design method,» *Computer-Aided Design*, n° 43, pp. 88-100, 2011.
- [4] A. Lobos, «Finding Balance in Generative Product Design,» *In Proceedings of Norddesign Conference: Design in the era of digitalization*, pp. 14-17, August 2018.
- [5] S. Gómez Gonzalez, Solidworks Simulation, Mexico D.F.: Alfaomega Grupo Editor, 2013.
- [6] U. Roncoroni, Manual de diseño generativo, Lima: Editorial Universidad de Lima, 2016.
- [7] Siemens, «Solid Edge 2020,» 01 01 2020. [En línea]. Available: www.solidedge.siemens.com/es/solutions/products/complete-product-development-portfolio/solid-edge-2020/.
- [8] M. Forrai, «Opportunities for application of the generative engineering method in heavy machine design.,» *Acta Technica Corvinienses – Bulletin of Engineering Tome IX, Fascicule 2, ISSN: 2067 – 3809*, pp. 147-150, 2016.
- [9] Makermex, «Impresora 3D modular MM1,» 01 01 2014. [En línea]. Available: <http://makermex.com/shop/product/impresora-3d-modular-mm1-1?category=1>.
- [10] C. J. William D., Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales 2, Barcelona: Reverté, 2007.
- [11] F. Bilmeyer W., Text book of Polymer Science, New York: Wiley Interscience, 1984.
- [12] S. Dassault, «CAD 3D,» 01 01 2020. [En línea]. Available: www.solidworks.com/es/category/3d-cad.
- [13] 5.-1. ISO, «Plastics — Determination of tensile properties— Part 1: General principles,» ISO/TC 61/SC 2 Mechanical behavior, 2019.
- [14] I. Technologies, «NEXYGEN Plus 3.0,» 23 10 2019. [En línea]. Available: <https://nexygen-plus.software.informer.com/3.0/>.