



Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Centro Interdisciplinario de Posgrados

e Investigación

Escuela de Ingeniería

Doctorado en Ingeniería Mecatrónica

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

Tesis que para obtener el Grado de Doctor en Ingeniería Mecatrónica

Presenta

Cristian Eliud Robles Gines

Director

Dr. Prudencio Fidel Pacheco García

Puebla, México.

JULIO, 2020



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyla**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Todo es susceptible de mejorar.
Bursztyn

Dedico esta Tesis a:

A Dios

Por siempre alentarme con sus palabras.

A mi esposa

Por su absoluto apoyo en el seguimiento de mis estudios.

A mis padres

Por su incondicional apoyo en mi formación.

A mi abuelo

Por su excelente ejemplo de entrega al trabajo.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por haberme permitido concluir esta meta.

Quiero agradecer a mi Director, el Dr. Prudencio Fidel Pacheco García, por su apoyo y sus atinadas recomendaciones en la realización de este trabajo.

Agradezco a CONACYT por proporcionarme los medios económicos para desarrollar mis estudios de posgrado.

Agradezco al área de Laboratorios de Ingeniería y al CESAT de la UPAEP.

RESUMEN

La industria manufacturera en México tiene una gran tradición y juega un papel fundamental en nuestra economía. Se considera interesante hablar de su historia, sus diferentes sectores y muchos otros aspectos. La actividad manufacturera siempre ha tenido una gran tradición en México. Nuestros pueblos originarios tenían amplia experiencia en prácticas como la artesanía, la construcción, el tejido y la orfebrería. En 1519, con la llegada de los españoles, el factor manual empezó a mermar y, poco a poco, se modernizaron los procesos, impulsando la industrialización. Por supuesto, el comienzo de la Revolución Industrial, en 1760, y su extensión a diferentes rincones del mundo, permitió que se consolidara aún más el aparato productivo nacional con el surgimiento de múltiples fábricas y empresas con recursos de vanguardia para la época. A partir de 1877, con el auge del sistema eléctrico y el nacimiento de nuevos sistemas de ferrocarriles, la industria manufacturera en México vivió un nuevo periodo de desarrollo acelerado, hasta que el conflicto armado en medio de la Revolución Mexicana (1910-1917) frenó el ritmo de crecimiento. Tras la redacción de una nueva constitución y el regreso de la estabilidad política y social, México se ha mantenido como uno de los principales países manufactureros del mundo, pese a los vaivenes que, como muchos otros países, ha enfrentado la industria. En México hay una gran cantidad de sectores de manufactura que forman parte fundamental de la economía, entre los más destacados se encuentran el automotriz, el de maquinarias y equipos y el de industrias metálicas, así como el de producción de alimentos, bebidas y tabacos.

Entre ellos han llegado a sumar más del 60% del Producto Interno Bruto (PIB) manufacturero en años recientes, por ejemplo, en 2011, solamente la industria alimentaria, de bebidas y tabacos, aportó el 27.9% del PIB. Otros sectores claves que generan ganancias millonarias en exportación, así como abastecimiento interno, son: plástico y hule, madera, química, muebles, colchones y persianas, insumos y acabados textiles, curtido y acabado de cuero.

La industria manufactura en México está en la mira de inversores y empresas de diferentes partes del mundo. De hecho, este sector agrupa más del 60% de la inversión, una de las causas del atractivo de la industria mexicana es que su mano de obra resulta mucho más económica que la de otros países. Si bien los procesos de transformación de materia prima se han modernizado en las últimas décadas, y prácticas como la *robótica*, la *mecatrónica* y la *automatización* han ganado espacio, el factor humano sigue siendo indispensable.

Los beneficios económicos de la industria manufacturera en México van más allá de la captación de inversión extranjera. Año tras año, esta actividad genera miles de millones de dólares en ingresos para la nación. Por ejemplo, en los primeros 5 meses de 2019 la industria manufacturera tuvo un gran rendimiento, con una tasa de crecimiento de 10.5% con respecto al mismo periodo del año anterior, y generó \$225.616 millones de dólares solamente en exportaciones. Esta cifra representó cerca del 57% del total de las ganancias que tuvo México en ese lapso por ventas a otros países.

En lo que va del siglo XXI, la industria manufacturera en México ha representado anualmente entre el 15% y el 18% del PIB del país. En 2018, por ejemplo, aportó el 17.1% del PIB. (UNEA, 2020)

En este sentido, los estudiantes y profesionistas se deben actualizar y especializar en herramientas que benefician a las empresas manufactureras a ser más competitivas, ejemplo de una de estas herramientas es el software de simulación de Diseño de SolidEdge® de Siemens, el cual fácilmente puede someter diseños a las mismas condiciones en las que se verán en el mundo real y con esto se mejora la calidad de los productos y al mismo tiempo reduce los costos de prototipos interactivos y pruebas (Gómez Gonzalez, 2013).

En esta tesis, se presenta un análisis de los beneficios que se derivan de optimizar piezas mecánicas por técnicas de Diseño Generativo, para ello se manufacturaron piezas de manera clásica utilizando manufactura aditiva, posteriormente se les hicieron pruebas de tracción en el laboratorio de ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Puebla, para poder determinar el límite elástico de la pieza y la carga de rotura, una vez obtenidos estos datos y con la ayuda de software especializado se les aplicó Diseño Generativo, dejando los componentes necesarios y desechando lo innecesario, es decir, se manufacturó este nuevo diseño reduciendo la cantidad del material requerido inicialmente en un 30, 40 y hasta 50 %. Una vez obtenidas las piezas, ya optimizadas, nuevamente se sometieron a pruebas de tracción y los resultados demostraron que soportaban los mismos esfuerzos que la pieza con el diseño inicial. Además, se hizo una comparativa analizando resultados de pruebas de

tensión a 2 probetas normalizadas, la primera manufacturada por impresión 3D y la segunda manufacturada por moldeo de compresión.

Índice

CAPÍTULO 1.	13
Introducción, justificación, objetivos, delimitaciones y alcances.	13
1.1 Introducción	14
1.2 Justificación	16
1.3 Objetivos	18
1.4 Delimitaciones	19
1.5 Alcances	19
CAPÍTULO 2.	20
Marco teórico.	20
2.1 Introducción	21
2.2 Antecedentes	22
2.3 Breve historia del Arte y del Diseño	23
2.4 Lo Generativo como principio y metodología Artística	25
2.4.1 El principio Generativo	26
2.5 Orden emergente	26
2.6 Lo generativo en el Dominio Artificial	27
2.6.1 La importancia del contexto	28
2.7 El Diseño clásico y el Diseño generativo	29
2.7.1 Modelos y simulaciones	30
2.8 Propiedades y ventajas de paradigma Generativo	31
2.8.1 Propiedades	31
2.8.2 Ventajas	32
2.9 El arte Generativo y la Tecnología	33
2.10 Los aspectos científicos del arte generativo	35
2.10.1 La complejidad en general	36
2.10.1.1 El cuestionamiento de la ciencia clásica	36
2.11 La teoría de Sistemas	37
2.12 Emergencia	38
2.13 La teoría del Caos y el Azar	39
2.14 Geometrías No Euclidianas y Fractales	40
2.14.1 El Espacio Curvo	41
2.14.2 Fractales	42
2.15 Las simulaciones científicas	43

2.15.1 La vida Artificial.....	44
2.15.2 La Inteligencia Artificial	45
2.15.3 La visualización Científica.....	45
2.16 Química, Física, Mecánica, Biología.....	46
2.16.1 Química	46
2.16.2 Biología y Ecología	47
2.16.3 Física y Mecánica	47
2.17 El paradigma generativo y la tecnología	48
2.17.1 ¿Qué son Las Tecnologías Informáticas?	48
2.17.2 La complejidad y la Computación	49
2.17.2.1 Complicado y Complejo	49
2.17.2.2 Emergencia.....	50
2.17.2.3 Caos y Azar	50
2.18 Continuo y discreto	51
2.19 El cuestionamiento a la tecnología.....	52
CAPÍTULO 3.	54
Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de materiales.	54
3.1 Introducción	55
3.2 Los materiales y la ingeniería	55
3.3 Tipos de materiales.....	56
3.3.1 Materiales metálicos	57
3.3.2 Materiales poliméricos	58
3.3.2.1 ABS y PLA	58
3.3.3 Materiales cerámicos	59
3.3.4 Materiales compuestos.....	60
3.3.5 Materiales electrónicos	62
3.4 Propiedades mecánicas de los materiales.....	62
3.4.1 Esfuerzo normal.....	63
3.4.2 Deformación unitaria normal.....	66
3.4.3 Diagramas de esfuerzo-deformación unitaria	67
3.4.3.1 Tensión	67
3.4.3.2 Compresión	69
3.5 Elasticidad y plasticidad	71
3.6 Módulo de elasticidad o Módulo de Young	73
3.7 Ley de Hooke	74

3.8 Límite elástico	75
3.9 Relación de Poisson.	75
3.10 Tablas de propiedades mecánicas.....	78
CAPÍTULO 4.	79
Herramienta de análisis del Diseño Generativo	79
4.1 introducción.....	80
4.2 Aspectos Históricos del FEA.....	81
4.3 Posibles errores en el FEA	83
4.4 Geometría del Elemento	86
4.5 Generación de malla.....	88
4.6 Aplicación de carga.....	90
4.7 Condiciones de frontera	92
4.8 Esfuerzo de Von Mises	94
4.9 Criterio de tensión normal máxima.....	95
4.10 Factor de seguridad	96
4.11 Alcances del FEA.....	97
Resumen.....	97
CAPÍTULO 5.	99
Simulaciones de los casos de estudio.	99
5.1 Introducción	100
5.2 Diseño y manufactura de los cubos.	100
5.2.1. Pruebas de tensión	103
5.3 Aplicación de Diseño generativo con base en datos obtenidos	105
5.3.1 Manufactura por Impresión 3D	107
5.3.2 Pruebas de tensión a prototipos 30% (B1), 40% (B2) y 50% (B3) de ahorro de material	108
5.4 Manufactura de probetas normalizadas por Impresión 3D y moldeo por compresión	109
CAPÍTULO 6	114
Resultados y conclusiones	114
6.1 Introducción	115
6.2 Resultados de las pruebas de tensión de los cubos A, B, y C.	115
6.3 Datos de las pruebas de tensión obtenidos del software Nexygen Plus para los cubos B1, B2, y B3.....	118
6.4 Datos de las pruebas de tensión obtenidos del software Nexygen Plus para las probetas manufacturadas por moldeo de compresión	122

6.5 Datos de las pruebas de tensión obtenidos del software Nexygen Plus para las probetas impresas en 3D	123
6.6 Conclusiones.....	125
Anexos	126
Bibliografía.....	139

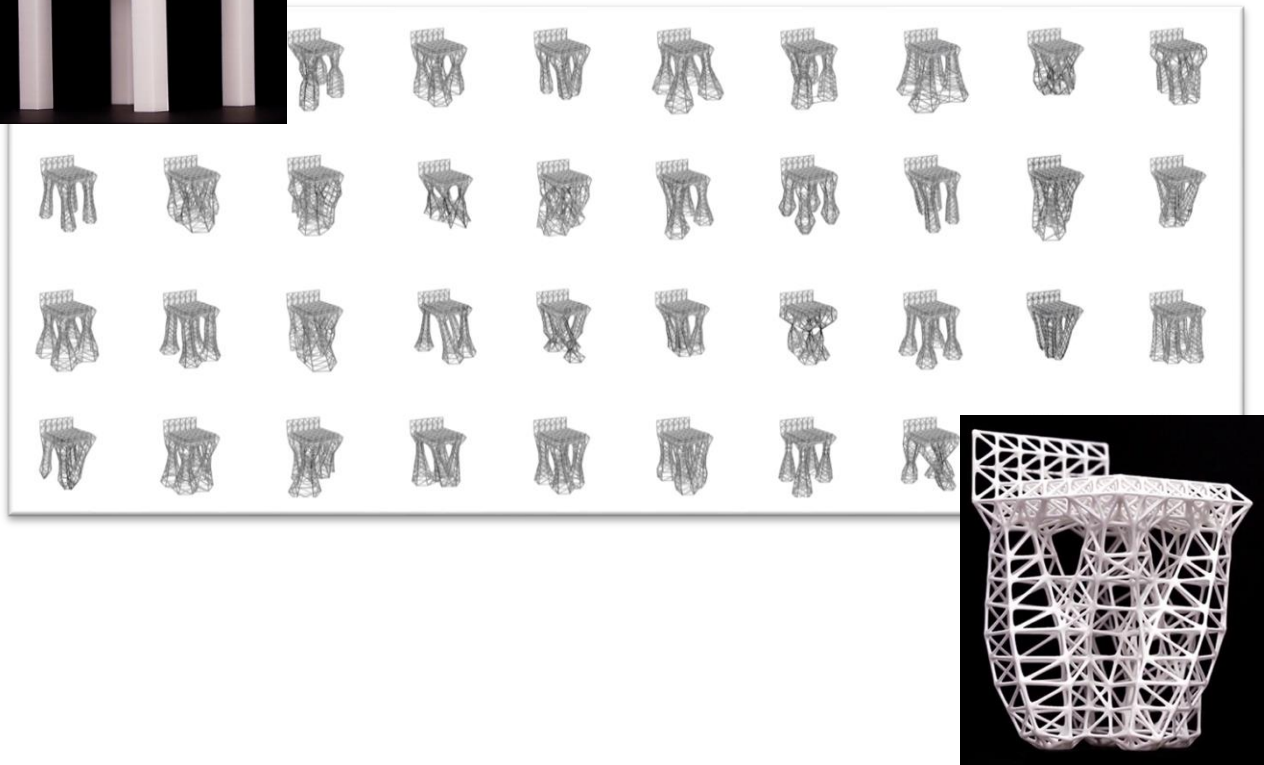
Lista de figuras

Figura 2.1 Papel decorativo marmorizado de Florencia. (Marbledarts, 2017)	23
Figura 2.2 Tullio Crali. <i>Vuelta horizontal</i> .1938.....	24
Figura 2.3 Paul Cézanne. La Montagne Sainte–Victoire, 1905.....	41
Figura 2.4 Bill Caplan, Curved Spaced, 2015.....	42
Figura 2.5 Cellular Automata Painting. (Roncoroni, 2003).	45
Figura 2.6 Valores continuos y valores Discretos.....	52
Figura 2.7 Los resultados de los dados son Discretos.	52
Figura 3.1 Ejemplo de tensión y compresión.....	64
Figura 3.2 Barra prismática.	65
Figura 3.3 Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para un acero estructural común en tensión (no a escala).	69
Figura 3.4 Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para el cobre en compresión. ..	70
Figura 3.5 Diagramas esfuerzo- deformación unitaria que ilustran (a) un comportamiento elástico y (b) un comportamiento parcialmente elástico.	73
Figura 3.6 Alargamiento axial y contracción lateral de una barra prismática en tensión (a) antes de aplicar la carga y (b) barra después de aplicar la carga. (Las deformaciones de la barra se muestran muy exageradas).	76
Figura 4.2 Problema estructural. a) Modelo idealizado b) Modelo de elemento finito.	84
Figura 4.3 Tensión de Von Mises.....	94
Figura 5.1. Cubo “A”- Dimensiones <i>Alto</i> : 50 mm <i>Ancho</i> : 50 mm <i>profundo</i> : 50 mm.	101
Figura 5.2. Cubo “B”- Dimensiones <i>Alto</i> : 40 mm <i>Ancho</i> : 40 mm <i>profundo</i> : 40 mm.	101
Figura 5.3. Cubo “C”- Dimensiones <i>Alto</i> : 30 mm <i>Ancho</i> : 30 mm <i>profundo</i> : 30 mm.	102
Figura 5.4 Cubos “A, B, y C”- Impresos.	102
Figura 5.5 Configuraciones que se utilizaron para las impresiones 3 D en el Software UltraMaker Cura 4.0. (Ultimaker, 2019).....	103
Figura 5.6. Realización de Pruebas mecánicas de tensión en laboratorios de la UPAEP.	104

Figura 5.7 Diseño del Cubo <i>B1</i>	106
Figura 5.8 Diseño del Cubo <i>B2</i>	106
Figura 5.9 Diseño del Cubo <i>B3</i>	107
Figura 5.10 Cubos “ <i>B1</i> ”, “ <i>B2</i> ”, y “ <i>B3</i> ” Impresos.	108
Figura 5.11. Realización de Pruebas mecánicas de tensión en laboratorios de la UPAEP.	109
Figura 5.12. Esquema de un aparato de moldeo por compresión. (Bilmeyer W., 1984)	110
Figura 5. 13. Molde utilizado con el mismo diseño que el de impresión 3D y plástico granulado.	110
Figura 5. 14. Manufacturando la probeta en laboratorios de la UPAEP.	111
Figura 5. 15. Dimensiones de probeta normalizada.	111
Figura 5.16. Probetas manufacturadas, de color azul, por Impresión 3D y de color blanco, por moldeo de compresión.	112
Figura 5. 17. Prueba de tensión a probeta impresa en 3D.	112
Figura 5. 18. Prueba de tensión a probeta manufacturada por moldeo de compresión.	113
Figura 6.1. Load (N) - Time (S) del cubo A.....	116
Figura 6.2. Load (N) - Time (S) del cubo B.....	117
Figura 6.3 Load (N) - Time (S) del cubo C.	118
Figura 6.4 Load (N) - Time (S) del cubo <i>B1</i> con una reducción de material en un 30%.	119
Figura 6.5 Load (N) - Time (S) del cubo <i>B2</i> con una reducción de material en un 40%.	120
Figura 6.6 Load (N) - Time (S) del cubo <i>B3</i> con una reducción de material en un 50%.	121
Figura 6.7 Load (N)- Stroke (mm) probeta manufacturada por moldeo de compresión.	123
Figura 6.8. Load (N)- Stroke (mm) probeta impresas en 3D.	124

Lista de tablas

Tabla 2.1 Comparativa entre Diseño clásico y Diseño generativo	30
Tabla 4.1 Bibliotecas de elementos de código (Budynas & Nisbett, 2008).	86
Tabla 6.1 Datos de prueba de tensión Tiempo-Carga del Cubo A.	115
Tabla 6.2. Datos de prueba de tensión Tiempo-Carga del Cubo B.	116
Tabla 6.3 Datos de prueba de tensión Tiempo-Carga del Cubo C.	117
Tabla 6.4 Datos de prueba de tensión Tiempo-Carga del Cubo <i>B1</i>	118
Tabla 6.5 Datos de prueba de tensión Tiempo-Carga del Cubo <i>B2</i>	119
Tabla 6.6 Datos de prueba de tensión Tiempo-Carga del Cubo <i>B3</i>	120
Tabla 6.7 Datos de prueba de tensión de probeta manufacturada por moldeo de compresión.	122
Tabla 6.8 Datos de prueba de tensión de probeta impresa en 3D.	123



CAPÍTULO 1.

Introducción, justificación, objetivos, delimitaciones y alcances.

CAPÍTULO 1

Introducción, Justificación, Objetivos, Delimitaciones y Alcances

1.1 Introducción

En el mercado global altamente competitivo, las empresas de productos constantemente buscan nuevas formas de acortar los plazos de entrega para el desarrollo de nuevos productos que cumplan con todas las expectativas del cliente. En general, las empresas han invertido en CAD/CAM, prototipado rápido y una serie de nuevas tecnologías que proporcionan beneficios empresariales (Gómez Gonzalez, 2013).

La ingeniería es el proceso de diseño, fabricación, montaje y mantenimiento de productos y sistemas. Existen dos tipos de ingeniería, ingeniería hacia adelante, en donde CAE a través de las tecnologías CAD y CAM forman la automatización de la ingeniería y la fabricación, en la ingeniería hacia adelante un diseño formaliza ideas a través de modelos de computadora y entonces transforma esos modelos en objetos tangibles del mundo real. El otro tipo de ingeniería es conocida como ingeniería inversa, en donde los procesos fluyen en dirección opuesta, es decir, se crea un modelo informático de un objeto a través de mediciones del objeto tal como existe en el mundo real, en este contexto definimos la ingeniería inversa como la capacidad de generar un modelo CAD de un objeto tangible del mundo real. (Raja & Fernandez, 2008)

Gracias a los avances de las ciencias de la computación y de las herramientas digitales -Software y Hardware- se están modificando las artes visuales; asimismo, se han alterado las jerarquías de la comunicación de una forma que todavía no se

comprenden completamente. Dentro de este universo de ebullición, una de las novedades que promete ser más duradera, es el Diseño Generativo.

Lo generativo, como concepto, deriva de la lingüística y de algunas teorías de la ciencia 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. El Diseño Generativo resulta fascinante porque apela a las ciencias, las maquinas, el trabajo distribuido y 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 que se dedican a estudiarlo. 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 impredecible e impensables desde el diseño clásico. Se habla de arte generativo desde hace por lo menos 30 años, pero solo recientemente este concepto ha empezado a difundirse gracias al desarrollo de nuevos e innovadores lenguajes de programación, dedicados al diseño, el arte, la animación, la multimedia y el nuevo Hardware para la impresión 3D y la robótica. (Roncoroni, 2016)

El diseño generativo es un tipo de inteligencia artificial que desarrolla gramáticas de una forma única basadas en tres tipos de información:

1. Un conjunto de reglas.
2. Una manera de desarrollar formas.

3. Un objetivo que puede incluir factores como la masa y/o resistencia para unirse con las formas resultantes (Krish, 2011).

En este trabajo se detalla cómo se diseñaron de manera clásico unas piezas, mismos que se manufacturaron en una impresora 3D Makermex 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 a un ambiente virtual llamado SolidEdge® de Siemens en donde se optimiza la topología de estas piezas por la técnica de diseño generativo, asegurándonos que realiza geométricamente la misma función (se preservan regiones necesarias), 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. Además, se hizo una comparativa analizando resultados de pruebas de tensión a 2 probetas normalizadas, la primera manufacturada por impresión 3D y la segunda manufacturada por moldeo de compresión. En este trabajo se consultarán diversas fuentes, para poder dar un panorama general del diseño generativo, y también, se espera que, en un futuro, le sirva a alguna persona interesada en optimizar cualquier diseño.

1.2 Justificación

La literatura dedicada al arte generativo es todavía escasa, y más aún lo es la que investiga el paradigma generativo desde el punto de vista teórico y pedagógico, este es un vacío que debe llenarse para evitar la debilidad del arte generativo que, como

señalan sus críticos más atentos, es precisamente el despilfarro de aplicaciones, diseños, modelos 3D, scripts etcétera, que generan toda clase de formas, pero sin ninguna relación con la realidad concreta y el contexto cultural. (Salingaros, 2002)

Por ejemplo, los textos existentes, o bien hacen hincapié en algún entorno tecnológico específico (por ejemplo, Processing o Grasshopper), o bien están exclusivamente orientados a los aspectos científicos e informáticos, como *The Computational Beauty of Nature* de Nary Flake (Flake, 2001). Este hecho no es un defecto en sí, pero deja al descubierto muchos aspectos importantes de los procesos generativos, como su lugar en el debate artístico global.

Por otro lado, las instituciones educativas que empiezan a proponer cursos de diseño generativo, en el intento de superar la metodología “tradicional” impuesta por los programas comerciales, no encuentra el soporte teórico y pedagógico necesario. Al respecto, muchos de los manuales anglosajones suponen un cierto grado de conocimiento científico o informático que no necesariamente se encuentra en los contextos educativos latinoamericanos, pues en nuestros sistemas no existe todavía la costumbre de cruzar disciplinas tan diferentes como la pintura, la música y la programación, ni se cuenta todavía en su mayoría con una sólida tradición interdisciplinaria (Roncoroni, 2016).

Es importante mencionar que el Diseño Generativo valida sus diseños por el método de elementos finitos, que es un método numérico de cálculo empleado en la resolución de ecuaciones diferenciales parciales, y muy utilizados en problemas de ingeniería para simular fenómenos físicos. Es considerado el método de análisis estándar más utilizado debido a su generalidad y compatibilidad para ser implementado en cualquier

tipo de ordenador. El software utilizado formula ecuaciones matemáticas que definen el comportamiento de cada elemento y su conectividad con el resto. Las ecuaciones tienen en cuenta las cargas impuestas (fuerzas, presiones, etc.) las restricciones de movimiento del modelo (sujeciones) y las propiedades mecánicas del material. La resolución de cada una de las ecuaciones planteadas para cada uno de los elementos permite conocer los desplazamientos de cada uno de ellos, así como las tensiones y las deformaciones unitarias (Gómez Gonzalez, 2013).

Es por estas razones, arriba mencionadas, que se considera importante aprender y aplicar estas herramientas en las que se tiene acceso en la Universidad, y con esto no solo poder adentrarnos a la prometedora línea de investigación “Diseño generativo” sino compartir los resultados logrados en publicaciones.

1.3 Objetivos

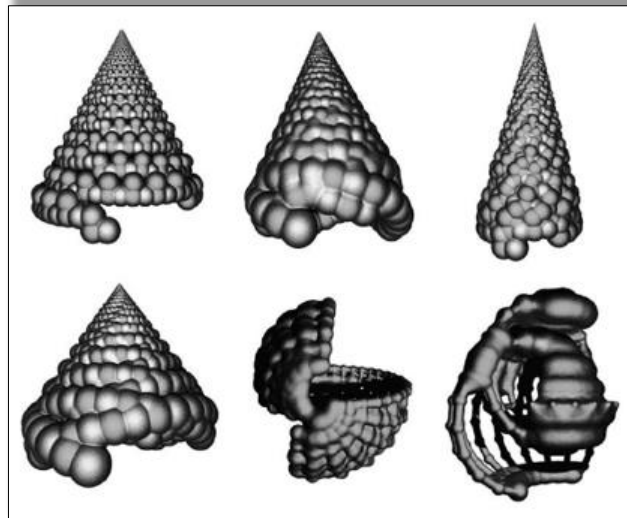
- Describir el Diseño Generativo de manera teórica, desde sus antecedentes hasta la aplicación al caso de estudio.
- Optimizar piezas diseñadas de manera clásica, por la técnica de diseño generativo, asegurando que realiza geométricamente y físicamente la misma función, preservando solo las regiones necesarias del cuerpo.
- Validar mediante el método de elementos finitos que las piezas optimizadas soportan las mismas condiciones de esfuerzo a las que se somete las piezas diseñadas de manera clásica.
- Reducir el material utilizado y con esto ahorrar en costo de manufactura de la pieza de una manera considerable.

1.4 Delimitaciones

- Los análisis sólo se harán en los laboratorios de ingeniería de la Universidad, más no se llevará a cabo la implementación en una empresa manufacturera.
- La mejor manera de aplicar con éxito los análisis, es combinar los conocimientos básicos de la teoría con la experiencia práctica y los criterios del ingeniero con experiencia (Kurowsky, 1994), el Diseño Generativo, al ser una tecnología innovadora, no se podrá tener el apoyo de un ingeniero con experiencia, ya que muchas empresas en el país, están empezando a implementar esta tecnología.

1.5 Alcances

- Con el Diseño Generativo, se puede crear el diseño óptimo en términos de variables de peso y resistencia, adaptado para los procesos de fabricación deseados (Siemens, 2020).
- Las ventajas del Diseño Generativo van desde componentes más ligeros hasta la minimización del derroche de materiales en la siguiente fase de fabricación.
- Se pueden obtener formas complejas sumamente personalizadas, perfectas para la fundición o para los procesos actuales de manufactura aditiva.
- Los análisis computarizados de elementos finitos son suficientemente precisos como para evitar errores innecesarios (Kurowsky, 1994).



(Roncoroni, 2016)

CAPÍTULO 2.

Marco teórico.

CAPÍTULO 2

Marco teórico

2.1 Introducción

El Diseño Generativo se puede resolver con una gran variedad de herramientas y técnicas, pero lo importante es, precisamente, la innovación y la personalización que alimenta esta diversidad, más que la aplicación práctica de una u otra receta tecnológica. Es importante mostrar que, considerando los cambios del contexto productivo y del exceso de oferta que caracteriza a la cultura contemporánea, el potencial del arte generativo no reside tanto en sus productos, sino en sus procesos y metodologías, esto es, en sus aspectos creativos, metodológicos, pedagógicos, y en brindar herramientas heurísticas para la investigación.

En este capítulo, se expondrá, una adaptación del manual del diseño generativo adecuado a nuestra realidad y coherente con sus fundamentos estéticos, científicos y tecnológicos, y con la variedad de sus procesos y herramientas. Por lo tanto, el objetivo de este capítulo no es profundizar en la técnica, esa se verá en capítulos más adelante de esta tesis, sino más bien, en la metodología, enfatizando la naturaleza compleja e interdisciplinaria del paradigma generativo. Se proporcionará una introducción al arte generativo, donde se explica qué es, cuáles son sus relaciones con la estética, la ciencia y la tecnología, y, finalmente, sus razones pedagógicas y artísticas. Además, se exponen los fundamentos filosóficos como los principios estéticos subyacentes: conceptos de apertura, interactividad, hipertextualidad, proceso complejidad y emergencia. Subsecuentemente, se detallarán los fundamentos científicos, conceptos generales y algunas referencias a teorías, como la vida artificial, la genética y los

fractales entre otros. Se plantean las relaciones entre sistemismo complejo y autoorganización, caos e indeterminación, fractales y auto-similaridad. (Roncoroni, 2016)

2.2 Antecedentes

Lo generativo, como principio general, tiene sus antecedentes en algunos aspectos de las estéticas de las vanguardias históricas y en ciertas teorías científicas y avances que se desarrollan a partir de la segunda guerra mundial. El origen del arte generativo es en gran medida, gracias a la llegada de las computadoras en la década de 1960 que permitían generar geometrías complejas (Boden & Edmonds, 2009). En la década de 1980 su uso se expandió a la arquitectura, a la ingeniería y a la industria de la construcción (Frazer , Liu , Tang , & Janssen, 2002). Sin embargo, el paradigma generativo ha entrado en el mundo del arte y del *diseño* -como una teoría del arte y un marco teórico- solamente desde los años 90's.

Sobre lo que pueda significar el termino *Generativo* hay algunas ideas generales que encuentran la aprobación de la mayoría de los artistas, diseñadores y programadores. Ello, no obstante, y a pesar de que lo generativo quiere proponerse no solo y simplemente como un nuevo ismo, sino como un paradigma capaz de desencadenar una verdadera revolución artística, el análisis de sus estructuras y principios, así como el debate de sus problemas y cuestiones abiertas, está lejos de concluirse. Por esto, hasta la labor de los mejores teóricos y artistas generativos no está exenta de imprecisiones y contradicciones. (Roncoroni, 2016)

2.3 Breve historia del Arte y del Diseño

El concepto generativo es relativamente moderno. Fue propuesto en el campo de las artes conjugando, por un lado, su definición en la lingüista Chomsky y, por el otro, ciertos principios de las ciencias de la computación y de la complejidad.

Cabe mencionar que algunos de los principios fundamentales del paradigma generativo son bastante antiguos; por ejemplo, los conceptos griegos *techné* (Arte, ciencia y sabiduría artesanal), de *poiesis* (producción creativa) de *aletheía* (el saber que se revela por medio de la *poiesis*). están en la base de la idea de la emergencia. Se encuentran también principios generativos en el arte generativo islámico, que construye sus patrones sobre algoritmos combinatorios algebraicos, y en las técnicas artesanales para fabricar los papeles texturizados que se han utilizado desde la edad media en Florencia.



Figura 2.1 Papel decorativo marmorizado de Florencia. (Marbledarts, 2017)

Las técnicas de pintura decorativas renacentistas, denominadas de brocha gorda, jugaban con las propiedades químicas de diferentes médiums y pigmentos para simular, de modo generativo, texturas naturales como el mármol o las maderas. Incluso

Leonardo Da Vinci, en el *tratado de la pintura* hablo de procesos generativos naturales, como las manchas de humedad en los muros que forman paisajes fantásticos.

Al comienzo de la Revolución Industrial, el arquitecto catalán Antoni Gaudí desarrollo mecanismos generativos basados en los árboles para diseñar las columnas del templo de la Sagrada Familia. Asimismo, los surrealistas y los futuristas experimentaron varios procesos generativos multiautor y tecnológicos para renovar el lenguaje del arte, como el *cadáver exquisito*, *intonarumori* de Luigi Russolo y la *aeropittura*. Para terminar con las vanguardias, los dadaístas han trabajado con procesos aleatorios e interactivos muy parecidos a ciertas técnicas generativas que se utilizan hoy.



Figura 2.2 Tullio Crali. *Vuelta horizontal*.1938.

Llegando a la posmodernidad, el artista conceptual Sol Lewitt desarrollo (siguiendo ciertas ideas surrealistas) varios procesos generativos y algorítmicos. Jackson Pollock

utilizó el Dripping (similar a las técnicas de brocha gorda), un proceso cuyos principios son el movimiento, la gravedad y el azar, mientras que varios artistas del land art aplicaron implícitamente principios generativos al dejar las obras expuestas a los efectos de los agentes naturales, usados como coautores de la obra.

Finalmente, por lo que se refiere a la música, Mozart utilizó principios generativos practicando juegos musicales con los dados y escribiendo piezas musicales aleatorias como las *musikalisches Würfelspiel*. Mas adelante, la música de vanguardia, naturalmente, estuvo muy ligada a los procesos generativos, como se aprecia en las piezas musicales Fluxus de John Cage, en las obras de Karlheinz Stockhausen, de Brian Eno y del músico arquitecto griego Iannis Xenakis (1976), quien exploró las aplicaciones creativas del azar y de las permutaciones en la música serial. En cuanto al arte generativo hoy, es una historia que todavía estamos escribiendo... (Roncoroni, 2016).

2.4 Lo Generativo como principio y metodología Artística

En la actualidad, se denomina generativo a un proceso orgánico o inorgánico capaz de producir o crear, de modo autónomo y espontáneo, una forma o una estructura coherente y ordenada. Todo organismo vivo es generativo, en cuanto produce algo nuevo, es decir se reproduce. Pero también un proceso inorgánico puede ser generativo, en cuanto transforma la materia suya y de los elementos a su alrededor.

2.4.1 El principio Generativo

Todo principio generativo tiene un punto arranque, es decir un mecanismo que desencadena y regula su desarrollo. Por ejemplo, la forma de las estalagmitas se genera por la caída de agua, en las que se encuentran ciertos minerales, y por el tiempo. También se puede pensar el principio generativo como el conjunto de genes que caracterizan a una especie, y las obras generativas serían individuos particulares; en otras palabras, los genes contienen el programa que genera los individuos, interactivamente con el contexto. Un principio generativo es, entonces, una suerte de esquema o guion para reproducir una serie de objetos diferentes entre sí, pero con un aspecto en común. (Roncoroni, 2016)

2.5 Orden emergente

Un verdadero proceso generativo es complejo, sistémico, dinámico e impredecible; eso significa que un mismo principio puede generar resultados muy diferentes, en razón de su complejidad. En cierto sentido, un proceso generativo es caótico en cuanto a que es sensible a las condiciones iniciales; pequeñas variaciones pueden generar cambios muy grandes en lo que se obtiene al terminar el proceso.

Todo proceso natural es generativo, dado que produce transformaciones en la materia orgánica e inorgánica de modo impredecible, o por la libertad de comportamiento de cada organismo, o por la complejidad del sistema. Esquematizando, un proceso generativo es:

- Sistémico

- Complejo
- Libre
- Interactivo
- Impredecible
- Emergente
- Ordenado, estructurado, con forma

2.6 Lo generativo en el Dominio Artificial

Si bien complejidad, emergencia y las demás características que componen el paradigma generativo son propiedades de los procesos naturales, en teoría, también un proceso artificial puede ser generativo. Sin embargo, hay que aclarar que lo artificial tiene limitaciones, aunque estas no siempre quedan claras a los artistas o futuristas generativos. El problema es que una visión imprecisa debilita la consistencia tanto del arte como de la investigación y de las aplicaciones educativas del paradigma generativo.

Como se vio antes, un proceso natural es emergente, porque la forma o la estructura generada es el resultado de una suma de hechos en el tiempo, cada uno con su libertad. Como consecuencia, esta clase de formas nunca responde a un esquema fijo, sino a la evolución en el tiempo de acuerdo con ciertas condiciones del sistema y del contexto. Ciertamente, se puede decir que, el algoritmo contiene un esquema de lo que será la forma, pero esto afecta a su especie, no a las variaciones de cada una de sus evidencias. La forma individual es, por lo tanto, emergente.

Ahora bien, un proceso artificial no goza de la libertad que caracteriza la vida orgánica, ni de la mera complejidad de los procesos inorgánicos naturales. La variedad

paramétrica, aunque sea capaz de producir procesos impredecibles, no es suficiente para garantizar una verdadera emergencia. Pues, en todos los casos, se trata de un efecto determinista, en cuanto el proceso artificial es siempre el mismo y de todas formas limitado.

Sin embargo, un proceso artificial puede ser generativo, sin ser emergente al cien por ciento; en otras palabras, puede ser lo suficientemente complejo para ser impredecible, sin ser suficientemente libre para salir de su programa. Esta limitación no quita las posibilidades generativas de un proceso artificial bien pensado: sin tener la libertad y variedad de sus referentes naturales, sus resultados son igualmente valiosos.

2.6.1 La importancia del contexto

Un aspecto del problema generativo es la relación de lo digital con el contexto natural; el arquitecto estadounidense (Cristhopher, 1964), pionero de la arquitectura generativa, ha dicho que el contexto es: *“Anything in the world that makes demands of the form —including designer, client, user, meaning, aesthetics, environment, and function”* (Cualquier aspecto en el mundo real que requiere algo en términos formales, incluyendo diseñadores, clientes, usuarios, significados, estética, medioambiente o funciones prácticas). Un proceso artificial puede resolver sus limitaciones tecnológicas, pues es posible que sea enriquecido por cientos de variables del contexto natural captadas mediante interfaces interactivas, sensores y otros aparatos (conocidos como physical computing). Además, el contexto incluye también al usuario, lo que abre la cuestión de las interfaces entre este y los sistemas generativos artificiales. Y también

da razón de la necesidad de que cada uno desarrolle sus procesos personalizados, porque el mismo autor es la fuente más pura del poder generativo.

2.7 El Diseño clásico y el Diseño generativo

En términos de arte y diseño, la filosofía generativa es un verdadero cambio de paradigma. La diferencia entre un proceso clásico y uno generativo resultará más clara si se analiza el caso de un panal de abejas: los apicultores construyen con cera los panales de celdas hexagonales mediante moldes prefabricados, saben perfectamente de antemano la forma que desean lograr y el ingenio está en optimizar así la producción de la miel; en cambio, las abejas siguen espontáneamente su instinto cuando hacen su panal, no tienen la idea previa de confeccionar unas celdas hexagonales. La forma hexagonal resulta de la interacción entre diferentes factores y ha surgido mediante la selección natural y la evolución. Ciertamente, los panales fabricados por las abejas son imperfectos, ninguna celda es exactamente igual a otra, y ningún panal es igual a otro, pero se adaptan perfectamente a las condiciones de cada colonia y a sus diferentes entornos, a los que ofrecen una infinita variedad de formas y soluciones.

Los algoritmos generativos (con las limitaciones arriba señaladas) intentan reproducir esta flexibilidad y variedad de formas y soluciones con relación a un determinado contexto, cosa que el diseño clásico no puede hacer, pues su solución es puntual. El artista generativo, en efecto, produce una familia de objetos que pueden ser muy diferentes entre sí y no todos perfectos.

El diseño generativo, entonces, consiste propiamente en el diseño del proceso, ya que el producto final es el resultado autónomo, interactivo y paramétrico del proceso mismo. Se trata de un método de diseño “abierto”, que se basa en un proceso generativo natural o en su simulación artificial, analógica o digital.

2.7.1 Modelos y simulaciones

Todo proceso natural es una fuente adecuada de principios generativos: la biología, la física, la química, la geología, la ecología, la meteorología, y los procesos sociales también. La calidad del proceso generativo artificial depende de la calidad del modelo que se elabora a partir del proceso natural.

Tabla 2.1 Comparativa entre Diseño clásico y Diseño generativo

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.

Los objetos obtenidos mediante un proceso generativo no necesariamente son perfectos. Se trata, desde luego, de hacer una selección del mejor, es decir, de aquel que se ajusta más a las exigencias y las especificaciones requeridas.

2.8 Propiedades y ventajas de paradigma Generativo

Ahora que se ha definido una idea más precisa de lo generativo, se pueden determinar sus requisitos, propiedades y ventajas. Pero antes es necesario despejar la confusión entre los conceptos algorítmico y paramétrico: un proceso generativo es ciertamente algorítmico, en cuanto sigue una serie de pasos lógicos, y es paramétrico, porque se rige por variables que regulan su comportamiento. Sin embargo, un proceso algorítmico y paramétrico no necesariamente es generativo, es decir, no garantiza propiedades complejas, sistémicas, dinámicas y emergentes.

2.8.1 Propiedades

Estas propiedades nacen de tecnologías informáticas y matemáticas especiales como estas:

- Vida artificial
- Inteligencia artificial
- Fractales
- Procesos recursivos
- Simulaciones y modelos de procesos naturales
- Sistemas dinámicos
- Sistemas de ecuaciones diferenciales
- Teoría del caos
- Gramáticas generativas

Desde el punto de vista informático, los procesos generativos más eficientes se caracterizan por ser:

- **Interactivos.** El intercambio de datos, métodos, técnicas y experiencias enriquece el proceso creativo y su complejidad.
- **Distribuidos.** La interactividad supone la libertad de compartir y comunicar la información.
- **Paralelos.** Los sistemas dinámicos complejos son intrínsecamente paralelos y no secuenciales.
- **Abiertos.** Informaciones, algoritmos y códigos deben estar disponibles libremente.

- **Interdisciplinarios.** Es una consecuencia implícita de la variedad de conocimientos y técnicas que nacen de un mundo abierto y paralelo.

2.8.2 Ventajas

Un proceso de diseño generativo es, con seguridad, más rico, creativo e innovador que el diseño clásico, pero requiere aparatos y soportes científicos y tecnológicos, un alto grado de experimentación, tiempos de desarrollo y curvas de aprendizaje más largas, y no garantiza resultados certeros. ¿Por qué es, entonces, tan importante? ¿Cuál es su ventaja? ¿Por qué hacer algo con un proceso generativo cuando el diseño clásico podría lograr lo mismo con mayor rapidez?

- Un proceso generativo se presta al trabajo grupal e interdisciplinario, que, si no necesariamente es una característica positiva en términos de productividad, lo es en términos de formación y aprendizaje.
- Un proceso generativo toma en cuenta el contexto, es algo que tiene empatía y respeto con y por su entorno. Cuando un proceso generativo es tecnológico (es decir, utiliza computadoras), la complejidad del contexto puede ser modelada y parametrizada, e insertada en el proceso, lo cual es mucho más difícil en el diseño clásico, pues cuando la complejidad crece excesivamente, decrece el control directo que se tiene sobre ella.
- El método generativo permite explorar posibilidades creativas que no están al alcance del diseño clásico, explorar procesos nuevos y combinarlos entre sí. Esto es importante tanto en la producción como en la educación: impulsa la originalidad tecnológica, el uso creativo de herramientas y el desarrollo de tecnología propia.

- Si bien el diseño generativo requiere tiempo para su desarrollo e implementación, luego permite obtener rápidamente variantes de diseños con una facilidad desconocida para el diseño clásico.
- Los procesos generativos informatizados ofrecen la posibilidad de reutilizar los diseños en otros contextos, combinar diferentes diseños y otras técnicas desconocidas para el diseño clásico con mucha facilidad.
- Está preparado para la nueva generación de equipos de prototipado rápido, la robótica, la creación de nuevos materiales y técnicas constructivas, los diseños para la realidad virtual, internet y los mundos virtuales, como los videojuegos.
- El Diseño Generativo 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 vuelve colaborativa (Lobos, 2019).
- Otra de las ventajas es que, ahorra tiempo y evita errores durante las etapas de diseño (Forrai, 2016).
- El diseño generativo proporciona varios beneficios, incluido el desarrollo de formas con geometrías únicas y mejora del rendimiento (Agkathidis, 2016).

2.9 El arte Generativo y la Tecnología

Un proceso generativo puede ser natural o artificial. En el caso artificial, es necesario el uso de alguna tecnología, que puede ser simple o compleja, analógica o, con las limitaciones que caracterizan a la informática, digital. Hay que recordar que la mayoría de los artistas generativos han subrayado que lo generativo no depende de una

tecnología en particular, sino que es más bien un algoritmo, es decir, una planificación de pasos, acciones o procesos oportunamente parametrizados y combinados.

Sin embargo, no existirían el arte y el diseño generativo sin la computadora, pues la naturaleza numérica de los modelos matemáticos y los programas informáticos permiten que estos procesos sean automatizados y combinados entre sí con gran flexibilidad, velocidad y eficiencia. Asimismo, la herramienta informática posibilita que un proceso sea interactivo, es decir que operadores humanos, sistemas artificiales o naturales puedan cooperar mediante varios tipos de interfaces. Pero, como se ha señalado anteriormente, la computación presenta límites que el artista generativo debe tomar en cuenta para no ilusionarse excesivamente y no cometer ingenuidades:

- Un proceso informático es determinista, se ejecuta siempre igual y no alcanza la emergencia de los fenómenos naturales o artificiales analógicos.
- Un proceso informático es discreto y no alcanza la variedad y continuidad de la realidad.
- En un programa, el número de parámetros y variables, por más grande que sea, es mucho menor que los que existen en la realidad.
- La programación paralela, en general, no está disponible, y su alternativa, el multitasking, no ofrece las mismas posibilidades.
- Para ciertos procesos, la velocidad de cálculo de los actuales microprocesadores puede ser insuficiente.
- La transmisión de datos por internet es lenta y en realidad dificulta el trabajo distribuido.

- Por ahora, las herramientas de programación disponibles para implementar los procesos generativos tienen curvas de aprendizaje demasiado largas.
- Los equipos, desde las computadoras hasta los robots, son todavía bastante caros.

2.10 Los aspectos científicos del arte generativo

Los artistas generativos consideran que una obra de arte generativo se puede llevar a cabo con un proceso totalmente arbitrario, abstracto y de pura fantasía, siempre y cuando tenga parámetros suficientes para permitir variaciones y una cierta dosis de sorpresa en sus resultados. No obstante, el verdadero interés de los principios generativos está en relacionar el proceso creativo con los fenómenos naturales; en este sentido, un modelo preciso de la naturaleza ofrece mayor fuerza creativa, comunicativa y didáctica, porque enriquece la creatividad con el conocimiento científico, la experiencia concreta, la historia y los demás aspectos del contexto natural y social.

Naturalmente, hay muchos procesos naturales —orgánicos e inorgánicos— que pueden ser eficazmente modelados para “mover” un proceso generativo. A continuación, se describen algunos conocimientos y métodos de la ciencia realmente indispensables desde el punto de vista práctico. En tal sentido, los conceptos científicos que más se utilizan en el diseño generativo son la complejidad, el valor cognitivo de la forma, la teoría de sistemas, la teoría del caos, las geometrías no euclidianas, la vida y la inteligencia artificial, y la genética.

2.10.1 La complejidad en general

Antes de entrar en los temas específicos, se presentan algunos conceptos generales sobre la complejidad: se podría decir que la complejidad en la ciencia se propone a raíz de ciertas teorías, como consecuencia de ciertos fenómenos y en parte también gracias a las tecnologías informáticas.

2.10.1.1 El cuestionamiento de la ciencia clásica

Las ciencias de la complejidad consideran a la ciencia clásica en modo crítico por tres razones fundamentales. La primera es la necesidad de estudiar fenómenos científicamente nuevos, como la meteorología, las finanzas y la ecología... procesos sistémicos complejos por naturaleza, que exigen nuevas herramientas conceptuales. La segunda razón es la “incertidumbre” física y matemática que sufre la ciencia por los cuantos y los teoremas de Kurt Gödel. Por ejemplo, la física cuántica ha mostrado la compleja relación que se establece entre los fenómenos observados y el observador: el punto de vista influye en las informaciones que se recogen; esto cuestiona la pretensión de que la mirada de la ciencia sea absolutamente precisa y objetiva. En cierto sentido, la investigación comienza a abordar el tema de las relaciones entre los fenómenos, ya que ha llegado al fondo de los fenómenos en sí. Y a esto se agrega, por parte de algunos filósofos de la ciencia, el cuestionamiento metodológico y epistemológico. Todo esto se precisa en algunas críticas puntuales:

- A. Critica el reduccionismo. La complejidad pretende dar una explicación global de los fenómenos, con relación a los demás.

- B. Incluye parámetros rechazados por Descartes, como el tiempo, el cambio, la percepción, las emociones.
- C. Se relaciona con la interdisciplinariedad, volviendo a “contaminarse” con las humanidades, la filosofía y el arte. Requiere de nuevos instrumentos matemáticos. Acostumbra a pensar en términos generales, de relaciones.

Cabe preguntarse por los retos que se presentan al artista generativo. En primer lugar, hay que evitar el uso arbitrario y poético de la ciencia, puesto que de esta forma se anula tanto el valor epistemológico del arte como el rigor de la ciencia. En segundo lugar, se debe averiguar si la aplicación de estos principios, que da lugar a los fenómenos emergentes, consigue resultados concretos o simplemente ilusiones y simulacros. Muchas obras de arte generativo sufren claramente de estas limitaciones.

2.11 La teoría de Sistemas

La teoría general de sistemas, elaborada por Ludwig von Bertalanffy (1976), brinda varios conceptos fundamentales del arte generativo. Considera que todo proceso generativo es sistémico porque consiste en una dinámica de muchos elementos dentro un contexto común. En efecto, la teoría general de sistemas surgió para explicar el comportamiento de un fenómeno teniendo en cuenta el contexto y a través de la relación entre sus elementos, lo cual se opone al método reduccionista, que explica solo un aspecto del fenómeno artificialmente aislado de los demás. Otro rasgo importante es que el estudio considera los sistemas dentro de sus procesos de cambio y transformación, como sucede en la realidad. Todo esto se traduce en los principios de la retroalimentación, del tiempo y del cambio.

- *Retroalimentación o feedback.* En un proceso sistémico, la información circula libremente entre el sistema (en su totalidad) y sus elementos. La actividad de los elementos modifica el estado general del sistema, lo que a su vez afecta a los elementos individuales. Es el principio de la recursividad.
- *Homeostasis.* Es la tendencia al equilibrio de los sistemas, que define el nivel de respuesta y de adaptación al contexto. La entropía de un sistema es el desgaste que esta presenta en el transcurso del tiempo. Los sistemas altamente entrópicos tienden a desaparecer por el desgaste generado por su desarrollo y deben tener mecanismos de revisión, reelaboración y adaptación permanente, para evitar su desaparición.
- *Tiempo y evolución.* Todo sistema complejo es dinámico, es decir, se debe comprender en su conjunto histórico. El tiempo se puede implementar fácilmente en los procesos algorítmicos. Por ejemplo, en la vida artificial y en los autómatas celulares.

2.12 Emergencia

Un sistema complejo es caótico y emergente, pues su estructura y el orden de sus elementos son el resultado de este complejo proceso de interacción y retroalimentación. Y la emergencia es lo que se espera de un proceso generativo. ¿Pero de qué se está hablando exactamente? Un fenómeno (como también el diseño o la forma de un artefacto) se dice emergente cuando no está planificado de antemano, o impuesto por alguien o algo externo al sistema, sino que surge desde la libre interacción de los elementos del sistema. Emergente significa, asimismo,

“impredecible”, pues la relación con el contexto y la complejidad de los sistemas hacen que los fenómenos emergentes nunca sean iguales. Los elementos y etapas del proceso sistémico son lo realmente importante, quizás más que el mismo fenómeno que el sistema produce como resultado.

Lo emergente implica para un sistema una suerte de finalidad común, un objetivo común, una intencionalidad general implícita hacia ciertos objetivos estratégicos, pues tanto los organismos como los fenómenos naturales inorgánicos responden a las leyes de sobrevivencia o a las necesidades de la materia. Obviamente, lo orgánico tiene algo especial, puesto que construye su orden sobre la base de un objetivo, sea la pura sobrevivencia y reproducción, sea algo más complejo, como la cultura o las relaciones sociales. Ciertamente, solo la vida produce este “pique” hacia lo nuevo, hacia la modificación y reconstitución creativa de la realidad, dado que todo organismo tiene el principio absoluto de la creatividad: la reproducción. Es importante notar, desde el punto de vista científico y tecnológico, que los fenómenos emergentes no son caóticos, no se obtienen jugando con el azar, de esto se hablara más adelante en esta tesis.

2.13 La teoría del Caos y el Azar

La teoría del caos, elaborada por Ilya Prigogine (1977) y otros científicos en los años cincuenta, pretende explicar la complejidad de los fenómenos naturales dentro de su libre desarrollo. Análogamente a la teoría de sistemas, incluye el cambio, el contexto y sus accidentes.

Para explicar la entropía típica de la complejidad, la teoría del caos propone el efecto mariposa: un sistema complejo es caótico cuando es muy sensible a cualquier pequeña variación de uno de sus elementos; a lo largo del tiempo, el sistema presentará grandes e imprevisibles variaciones precisamente como consecuencias extremas de estos mínimos factores. Así, se dice que el movimiento de las alas de una mariposa en Japón puede provocar un huracán en Estados Unidos.

Volviendo al diseño generativo, si se plantea un proceso suficientemente complejo, articulado y parametrizado, se puede obtener una gran variedad de diseños diferentes cambiando sus entradas iniciales. Pero esto presenta problemas computacionales, pues los parámetros no son suficientes comparados con la realidad, y los instrumentos de cálculo son inadecuados

Por esta razón, en el software generativo el comportamiento caótico se simula con el azar, aunque se trate de una solución artificial y arbitraria, introducida desde el exterior del sistema y que, por lo tanto, se debe considerar una trampa, un truco o una inconsistencia teórica y creativa. Sin embargo, el sistema informático resulta igualmente imprevisible, porque puede ser sumamente complicado, lo que provoca igualmente sorpresa e interés (Roncoroni, 2016).

2.14 Geometrías No Euclidianas y Fractales

En el marco de la crítica a la ciencia clásica, se encuentran varias cuestiones relativas a la geometría. Me refiero a las geometrías no euclidianas, que tienen el objetivo de revelar las estructuras del espacio real de modo más completo que la simplificación

euclidiana de cubos, esferas o pirámides; con esto, pretenden facilitar la generación de formas complejas que posibilita la computadora.

La medida euclidiana tradicional simplifica la complejidad del detalle sintetizando la forma, lo que es evidente en la pintura de Paul Cézanne (1937), que sintetiza la naturaleza en formas geométricas simples: “Tratar a la naturaleza por medio del cilindro, la esfera, el cono, todo puesto en perspectiva adecuada... Dirigirse a un punto central”.



Figura 2.3 Paul Cézanne. La Montagne Sainte-Victoire, 1905.

2.14.1 El Espacio Curvo

Karl Gauss y Albert Einstein fueron los primeros en considerar una alternativa no euclidiana para la geometría del universo. En 1920, Einstein, basándose en el trabajo de Bernhard Riemann, descubrió que la geometría del espacio-tiempo tiene curvatura y, con esto, demostró lo que Gauss había imaginado, es decir, que la geometría de los

griegos corresponde a la estructura infinitesimal del espacio, pero que, al generalizar dicha estructura geométrica, se encuentra la curvatura. La importancia de las geometrías no euclidianas, en términos artísticos, está en la posibilidad de generar nuevas formas y patrones tridimensionales de gran belleza y complejidad. Además, guardan una relación más armónica con la complejidad de las formas naturales.



Figura 2.4 Bill Caplan, Curved Spaced, 2015.

2.14.2 Fractales

La geometría fractal es otro sistema para explicar la complejidad y la irregularidad de las formas naturales. Desde el punto de vista euclidiano, la complejidad no se puede comprender porque no se llega al límite del detalle que se mide: siempre se encuentran más detalles y más pequeños. Los fractales solucionan esta regresión al infinito con base en un proceso recursivo y en la dimensión fraccionaria, que mide la relación entre la forma general y el detalle. El enfoque en el proceso algorítmico y en la formulación

matemática hace de los fractales algo esencial para el diseño generativo, pues se pueden implementar con facilidad. A continuación, se examinan las propiedades esenciales de la geometría fractal: la dimensión fraccionaria, las propiedades topológicas, la recursividad y la autosimilaridad.

- La dimensión fraccionaria. Da cuenta de la complejidad y de la irregularidad de una forma con relación a la escala de su medida. Así los fractales describen muy bien la variedad y el cambio que caracteriza a los fenómenos naturales.
- Topología. Los fractales tienen la propiedad de rellenar el espacio en forma más eficiente que las formas euclidianas. Por ejemplo, la longitud casi infinita del sistema circulatorio con respecto al tamaño finito del cuerpo humano. Tienen también paradojas formales y estructurales, como la posibilidad de superficie finita y perímetro infinito.
- Recursividad y autosimilaridad. Es una propiedad de muchas formas naturales cuyos detalles presentan la misma estructura de la forma general. Así, la estructura de una ramita de un árbol es la misma que la estructura de la rama principal, y esta es la misma que la del árbol entero. Esta propiedad es computacionalmente interesante porque se obtiene con facilidad a través de procesos iterativos y funciones recursivas.

2.15 Las simulaciones científicas

Una aplicación interesante de la tecnología informática en la ciencia es la modelación y la simulación por computadora de los fenómenos naturales. Esto comprende la vida y la inteligencia artificial, muy utilizadas por los artistas generativos, quienes pueden

aprovechar sus principios para generar nuevas formas y experiencias estéticas complejas.

2.15.1 La vida Artificial

La vida artificial es un conjunto de técnicas matemáticas e informáticas que simulan el comportamiento de los organismos naturales, desde los microorganismos hasta los procesos sociales de los seres humanos. Los gurús de los organismos artificiales consideran sus creaciones al mismo nivel de la vida natural, como si a partir de un algoritmo y de un software naciera una entidad independiente que evoluciona, se reproduce, nace y muere.

La vida artificial presenta fenómenos emergentes. Por eso, se aplica muy bien a la experimentación artística generativa, ya que ayuda a generar nuevas clases de imágenes en formas que superan las posibilidades de la creatividad del artista humano, a pesar de que es un ser humano el que puede pensar y programar esta clase de procesos. Lo interesante es la combinación de procesos científicos y artísticos, lo que otorga a esta clase de arte una peculiar naturaleza epistemológica y, por lo tanto, pedagógica. Naturalmente, la vida artificial se puede combinar con otras técnicas generativas, por ejemplo, con los fractales, las gramáticas generativas, la genética, la multimedia, etcétera.

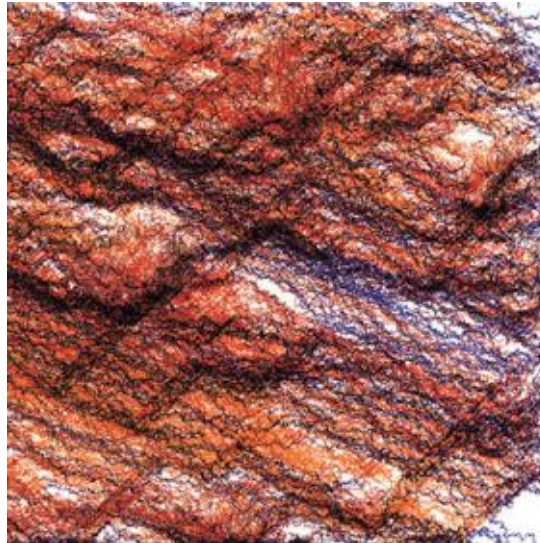


Figura 2.5 Cellular Automata Painting. (Roncoroni, 2003).

2.15.2 La Inteligencia Artificial

Así como la vida artificial reproduce digitalmente los organismos, la inteligencia artificial es un conjunto de técnicas y algoritmos que simulan el razonamiento. Estos algoritmos permiten que los programas se autocorrijan y aprendan, hasta construir sistemas expertos que aplican bases de datos para tomar decisiones inteligentes. Ahora bien, a pesar de algunos logros asombrosos (como la AI que le ganó al campeón mundial de ajedrez), los especialistas han renunciado a la ilusión de reproducir la inteligencia humana (la AI fuerte); hoy, el objetivo es más modesto y humilde, pero no por esto menos valioso.

2.15.3 La visualización Científica

Las simulaciones se presentan al científico a través de imágenes y animaciones; la visualización científica y el arte son, sin embargo, algo más que ilustraciones o

documentos visuales de un experimento científico, incluso producen fenómenos que no suceden en la naturaleza. Esto genera una relación nueva entre ciencia y arte.

2.16 Química, Física, Mecánica, Biología

El arte generativo puede aprovechar los principios de diferentes disciplinas científicas. Estos pueden aplicarse para una simulación rigurosa con fines estéticos o, de modo más libre, tomando muchas licencias poéticas... En todo caso, el poder generativo es grande, porque simples simulaciones de procesos orgánicos o inorgánicos ofrecen una gran variedad de parámetros y, por lo tanto, una notable complejidad.

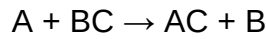
A continuación, se presenta una síntesis de estos procedimientos, con los factores o variables, según la disciplina, que pueden interesar al artista generativo.

2.16.1 Química

La química plantea principios para combinar elementos de acuerdo con sus propiedades. Las técnicas genéticas vistas anteriormente se completan ciertamente con estos principios:

- Reacción de síntesis. Elementos o compuestos sencillos que se unen para formar un compuesto más complejo. $A + B \rightarrow AB$
- Reacción de descomposición. Un compuesto se fragmenta en elementos o compuestos más sencillos. En este tipo de reacción, un solo reactivo se convierte en zonas o productos. $AB \rightarrow A + B$

- Reacción de desplazamiento. Un elemento reemplaza a otro en un compuesto.



Es muy fácil hacer esto con los sistemas-L y también en image processing; las modalidades de combinación de layers de Photoshop son un ejemplo de esto.

2.16.2 Biología y Ecología

La biología y la ecología son importantes, pues sus principios permiten elaborar y reproducir reglas para las simulaciones, como la vida artificial. Principios útiles:

- Morfología y morfogénesis. La morfología analiza las propiedades de la forma en las diferentes disciplinas. La morfogénesis analiza cómo y con base en cuáles principios se desarrolla una determinada forma. Incluye los procesos de evolución y adaptación, como explica On Growth and Form de D'Arcy Thompson. (D'Arcy Wentworth , 1917)

2.16.3 Física y Mecánica

Ciertos principios se pueden utilizar en la simulación de procesos naturales como alteradores de la forma: aceleración, gravedad, resistencia, estática, dinámica, teoría de estructuras, entre otros.

“Cuando se junta la tecnología de diseño generativo con los avances en manufactura, el enfoque para el desarrollo de nuevos productos se transforma completamente, de maneras que simplemente no se pudo haber imaginado antes.” (Kelzer, 2018)

2.17 El paradigma generativo y la tecnología

La obra de arte y el proceso generativo, en cierto grado, son libres del control del artista o del diseñador. El proceso generativo, que da lugar a la obra, puede ser natural — como son los procesos biológicos en el paisajismo, la jardinería o el bonsái— o puede ser artificial, mediante procesos químicos, meteorológicos o geológicos; y, finalmente, puede ser tecnológico, mediante máquinas más o menos complejas, analógicas o digitales. Entonces, es posible hacer arte generativo —y esta es una idea que comparten prácticamente todos los especialistas— sin ningún tipo de tecnología. Pero las tecnologías de la información, gracias a las simulaciones, a la interactividad, al eficiente manejo de la información y a la velocidad, permiten el mejor desarrollo de los sistemas generativos y ofrecen muchas ventajas a la investigación y a la experimentación correspondiente.

Si bien es cierto que las herramientas digitales presentan algunas limitaciones que pueden afectar la calidad generativa y emergente de un proceso artístico tecnológico, estas limitaciones se pueden superar conociendo sus razones y mediante una correcta metodología de trabajo. (Roncoroni, 2016)

2.17.1 ¿Qué son Las Tecnologías Informáticas?

El arte y el diseño generativo se basan esencialmente en las TIC (software, interfaces, computadoras, redes, etcétera), tecnologías complejas y sistemas que incluyen diferentes aspectos, capas y procesos. En síntesis: las computadoras no son máquinas con un comportamiento neutral.

En primer lugar, las TIC son lenguajes: operan a base de códigos escritos y se comunican entre ellas, y entre ellas y los usuarios, mediante software e interfaces, los cuales, como todos los lenguajes, influyen en la percepción y en la lectura de la realidad. En segundo lugar, las TIC manejan conocimientos; por lo tanto, son extensiones del cerebro y de la esfera cognitiva, con las ventajas y problemas que esto comporta. En tercer lugar, las TIC son inteligentes, aunque en el solo sentido de que operan a base de algoritmos y silogismos; en todo caso, es una inteligencia ajena a aquella del usuario. En cuarto lugar, a pesar de lo dicho anteriormente, las TIC son máquinas y exhiben en el fondo comportamientos rígidos. En quinto lugar, las TIC son opacas, es decir, no muestran sus procesos subyacentes, con lo cual parecen obra de magia, lo que influye en la fe y falta de crítica que el usuario tiene frente a ellas. Para los artistas, todo esto implica el riesgo de caer en el efecto especial y en la fantasmagoría, de perder la sustancia, el concepto y la libertad de lo diverso y divergente.

2.17.2 La complejidad y la Computación

Aparte de estos problemas de fondo de las tecnologías de la información en general, se encuentran unas cuestiones puntuales que se refieren a los límites de la computación con respecto a las exigencias específicas del arte generativo.

2.17.2.1 Complicado y Complejo

Los procesos generativos tecnológicos (como, por ejemplo, los autómatas celulares) son suficientemente complicados como para que no se puedan prever sus resultados,

pero no son complejos, pues son sistemas deterministas (es decir, son mecanismos que, con un mismo conjunto de datos, producen siempre resultados iguales. Esto entra en conflicto con el principio generativo que es creativo) cuyo resultado es siempre el mismo, aunque a primera vista no sea predecible.

Lo complejo incluye algo espontáneo y emergente que un programa para computadora no puede lograr, salvo que se considere la interacción con un usuario humano o con elementos naturales (estos procesos son realmente vivos, complejos e impredecibles).

2.17.2.2 Emergencia

Lo mismo puede decirse con respecto a las cualidades emergentes de los procesos generativos computarizados. Según (Kurzweil , 2005), los futuros sistemas informáticos masivamente paralelos podrían ser capaces de producir fenómenos emergentes. Solo que la emergencia es una labor original de los elementos de un sistema complejo; en cambio, en las simulaciones informáticas el estímulo creativo viene desde afuera, no parte de la máquina, esto es, no es espontáneo.

2.17.2.3 Caos y Azar

También los comportamientos caóticos y el azar son dinámicas que no se pueden reproducir en una computadora, pues los procesos computacionales son deterministas, lineales, corren como un tren siguiendo sus binarios. Los sistemas

informáticos logran procesos aparentemente caóticos, pero este resultado se basa en trucos que comprometen la autenticidad del proceso.

2.18 Continuo y discreto

Por último, en los procesos computarizados los cálculos son discretos, esto es, entre un intervalo y otro no hay, por así decirlo, espacio. La realidad virtual discreta tiene menos detalles que la realidad real, es más simple. Esto cuestiona precisamente el concepto de complejidad, que es continuo, no salta, sino que se transforma paso a paso.

La verdad de las simulaciones digitales es, entonces, bastante relativa: a largo plazo produce uniformidad en el diseño, a pesar de que aparentemente el rango de las variables sea muy amplio. Lo digital es discreto también en las opciones que presenta al usuario. Las funciones disponibles tienen un espectro operativo reducido con respecto al proceso al proceso analógico del cual son analogías.

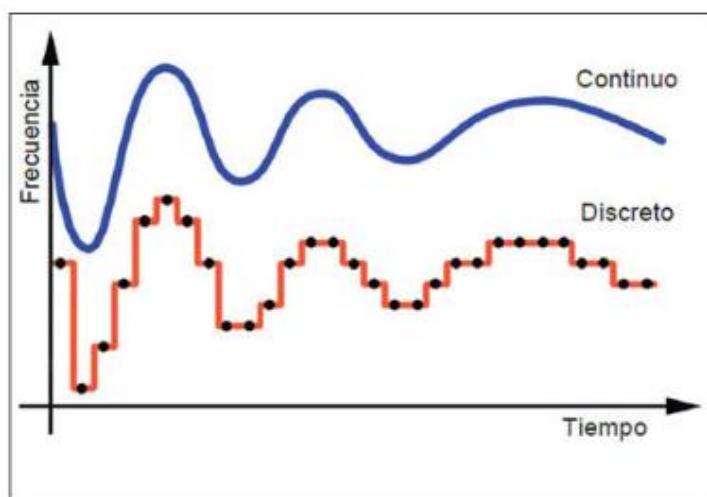


Figura 2.6 Valores continuos y valores Discretos.

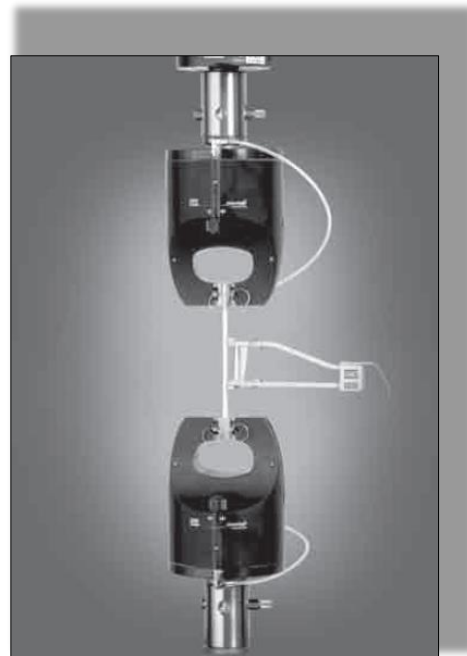
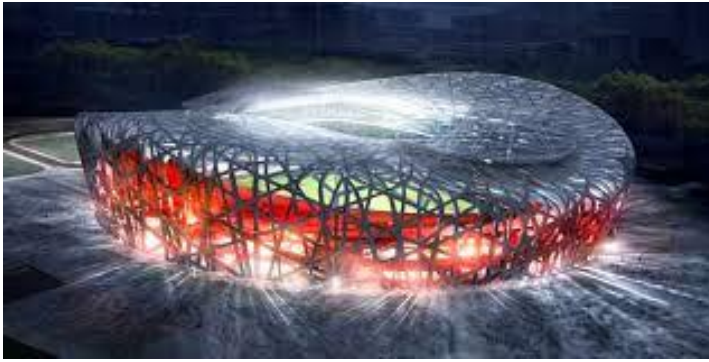


Figura 2.7 Los resultados de los dados son Discretos.

2.19 El cuestionamiento a la tecnología

(Baudrillard, 1996) aborda el problema de las simulaciones, de la virtualidad y de los medios de comunicación: el contenido de los medios no es la realidad, sino la imagen de la realidad hecha por otros medios. Sin embargo, la fuerza y el realismo de los medios son tan fuertes que olvidamos que son solo representaciones de lo real. Así, la realidad poco a poco viene a ser suplantada por los simulacros de la realidad.

Este es el riesgo de las simulaciones (vida artificial, inteligencia artificial, entre otros) que se usan en los algoritmos generativos: el proceso generativo, si se relaciona con la simulación de la realidad en lugar de la realidad, produce solamente un mundo autorreferencial a medida de la tecnología. Por eso se recomienda a docentes, artistas y estudiantes abordar las herramientas informáticas con mucho cuidado crítico y metodológico. (Roncoroni, 2016)



CAPÍTULO 3.

Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de materiales.

CAPÍTULO 3

Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de materiales.

3.1 Introducción

En este capítulo se da una descripción de los conceptos que se deben conocer previamente para poder analizar el diseño una pieza mecánica, así como los conceptos para una mejor interpretación de los resultados, identificaremos las propiedades clave de diversos materiales, como el módulo de elasticidad (E), gráficas del esfuerzo (σ) en función de la deformación unitaria (ϵ). Si estos materiales sólo se desempeñan en el modo elástico, el esfuerzo y la deformación unitaria están relacionadas por la ley de Hooke para esfuerzo normal y deformación unitaria normal ($\sigma = E \epsilon$). Veremos que los cambios en las dimensiones laterales y en el volumen dependen de la relación de Poisson (ν). Los *factores de seguridad* relacionan la resistencia real con la requerida de los elementos estructurales, y consideran una variedad de incertidumbres, como variaciones en las propiedades del material y la probabilidad de una sobrecarga accidental (Gere & Goodno, 2009).

3.2 Los materiales y la ingeniería

El hombre, los materiales y la ingeniería han evolucionado en el transcurso del tiempo y continúan haciéndolo. El mundo actual es de cambios dinámicos y los materiales no son la excepción. A través de la historia, el progreso ha dependido de las mejoras de los materiales con los que se trabaja. El trabajo del hombre prehistórico estaba limitado a los materiales disponibles en la naturaleza como la piedra, madera, huesos y pieles. Con el transcurso del tiempo, pasaron de la Edad de Piedra a las nuevas edades de

cobre (bronce) y de hierro. Debe mencionarse que este adelanto no sucedió de manera uniforme ni simultánea en todas partes (se verá que esto ocurre en la naturaleza, incluso a escala microscópica). De acuerdo con el diccionario Webster, los materiales son sustancias con las que algo está compuesto o hecho.

La producción y elaboración de los materiales hasta convertirlos en productos terminados constituyen una parte importante de la economía actual. Los ingenieros diseñan la mayoría de los productos manufacturados y los sistemas de elaboración necesarios para su producción. Dado que los materiales son necesarios para fabricar productos, los ingenieros deben conocer la estructura interna y las propiedades de los materiales, de tal manera que puedan elegir los más adecuados para cada aplicación y crear los mejores métodos para procesarlos.

Los ingenieros expertos en investigación y desarrollo crean nuevos materiales o modifican las propiedades de los existentes. Los ingenieros de diseño usan materiales actuales, modificados o nuevos para diseñar y crear nuevos productos y sistemas. En ocasiones los ingenieros requieren de un nuevo material para su diseño, y la tarea de crearlo será encomendada a científicos e ingenieros especialistas en materiales (Smith & Hashemi, 2006).

3.3 Tipos de materiales

Por comodidad, la mayoría de los materiales utilizados en ingeniería se dividen en tres grupos principales: materiales metálicos, poliméricos y cerámicos además de estos tres grupos de materiales, se tomarán en cuenta dos tipos más, los materiales compuestos y los materiales electrónicos, dada su gran importancia en la ingeniería.

3.3.1 Materiales metálicos

Estos materiales son sustancias inorgánicas compuestas por uno o más elementos metálicos y pueden contener algunos elementos no metálicos. Son ejemplos de elementos metálicos el hierro, el cobre, el aluminio, el níquel y el titanio. Los materiales metálicos pueden contener elementos no metálicos como carbono, nitrógeno y oxígeno. Los metales tienen una estructura cristalina en la que los átomos están dispuestos de manera ordenada. En general, los metales son buenos conductores térmicos y eléctricos. Muchos metales son relativamente resistentes y dúctiles a la temperatura ambiente y presentan alta resistencia, incluso a altas temperaturas.

Los metales y las aleaciones suelen dividirse en dos clases: aleaciones y metales ferrosos que contienen un alto porcentaje de hierro, como el acero y el hierro fundido, y aleaciones y metales no ferrosos que carecen de hierro o contienen sólo cantidades relativamente pequeñas de éste. Son ejemplos de metales no ferrosos el aluminio, el cobre, el zinc, el titanio y el níquel. La distinción entre aleaciones ferrosas y no ferrosas se hace debido al empleo y producción considerablemente mayores de aceros y hierros fundidos en comparación con otras aleaciones. Ya sea en aleación o puros, los metales se emplean en numerosas industrias; entre otras, la aeronáutica, la biomédica, de los semiconductores, electrónica, energética, de estructuras civiles y del transporte. Los científicos e ingenieros especializados en materiales buscan constantemente mejorar las propiedades de las aleaciones actuales, diseñar y producir nuevas aleaciones con mejores propiedades de fuerza, resistencia a altas temperaturas, deformación y fatiga. Las aleaciones actuales pueden perfeccionarse con mejores técnicas químicas, controlando la composición y las técnicas de procesado (Smith & Hashemi, 2006).

3.3.2 Materiales poliméricos

La mayoría de los materiales poliméricos constan de largas cadenas y/o redes moleculares que frecuentemente se basan en compuestos orgánicos (precursores que contienen carbono). Desde un punto de vista estructural, la mayoría de los materiales poliméricos no son cristalinos, pero algunos constan de mezclas de regiones cristalinas y no cristalinas. La resistencia y ductilidad de los materiales poliméricos varía considerablemente. Dada la naturaleza de su estructura interna, la mayoría de los materiales poliméricos son malos conductores de electricidad. Algunos de estos materiales son buenos aislantes y se emplean como aislantes eléctricos. En general, los materiales poliméricos tienen bajas densidades y temperaturas de ablandamiento o de descomposición relativamente bajas (Smith & Hashemi, 2006).

3.3.2.1 ABS y PLA

Los materiales poliméricos que más se utilizaron en el desarrollo de este trabajo fueron 2, el ABS y el PLA. El Acrilonitrilo Butadieno Estireno, (ABS), este es un termoplástico obtenido por polimerización de estireno y acrilonitrilo en presencia de polibutadieno. El rango de temperatura de trabajo del ABS se ubica entre -20 y 80 °C. Aunque el ABS es amorfo, por lo que se considera que no tiene temperatura de Fusión verdadera, la temperatura a la que puede ser conformado es cercana a los 230° C. Esta baja temperatura junto con sus propiedades mecánicas lo hace uno de los materiales más usados en manufactura aditiva (Velasco P., Rodríguez Suárez, & Restrepo Ardilla, 2016).

Por otra parte, el PLA es un polímero sintético termoplástico de la familia de los poliésteres alifáticos basado en ácido láctico que como biomaterial ha demostrado su capacidad de permitir el crecimiento controlado del tejido biológico durante su biodegradación. El PLA puede hidrolizarse fácilmente a ácido láctico, mediante un proceso de degradación hidrolítica, lo cual podría suministrar algunas ventajas en su reciclaje, a su vez es biocompatible (no provoca rechazo), biodegradable (se elimina naturalmente), inmunológicamente inerte (no produce alergias), no tóxico y reabsorbible (con reabsorción completa) (Rodríguez , 2001).

Hay que tomar en cuenta que, en la mayoría de los casos, un material por sí solo no puede cubrir todos los requerimientos de propiedades mecánicas, biocompatibilidad, etc., afortunadamente, en las últimas décadas se han unido esfuerzos al estudio de materiales compuestos, los cuales se describen de manera detallada más adelante, y son aquellos que están formados por combinaciones de metales, cerámicos y polímeros. Las propiedades que se obtienen de estas combinaciones son superiores a la de los materiales individuales. Las propiedades que se obtienen son un producto de la combinación de los refuerzos que se utilicen y de la matriz que soporta al refuerzo en materiales compuestos (González & et al, 2008).

Véase el Anexo 3, Tabla C, para mayor información de estos materiales.

3.3.3 Materiales cerámicos

Los materiales cerámicos son materiales inorgánicos formados por elementos metálicos y no metálicos enlazados químicamente entre sí. Los materiales cerámicos

pueden ser cristalinos, no cristalinos o mezclas de ambos. La mayoría de los materiales cerámicos tienen una gran dureza y resistencia a las altas temperaturas, pero tienden a ser frágiles (con poca o nula deformación antes de la fractura). Destacan entre las ventajas de los materiales cerámicos para aplicaciones industriales su peso ligero, gran resistencia y dureza, buena resistencia al calor y al desgaste, poca fricción y propiedades aislantes. Las propiedades aislantes, junto con la alta resistencia al calor y al desgaste de muchos materiales cerámicos, los vuelve útiles en revestimientos de hornos para tratamientos térmicos y fusión de metales como el acero (Smith & Hashemi, 2006).

3.3.4 Materiales compuestos

Un material compuesto puede definirse como dos o más materiales (fases o constituyentes) integrados para formar un material nuevo. Los constituyentes conservan sus propiedades y el nuevo compuesto tendrá propiedades distintas a la de cada uno de ellos. La mayoría de los materiales compuestos están formados por un material específico de relleno que a su vez sirve de refuerzo, y una resina aglomerante con objeto de lograr las características y propiedades deseadas. Los componentes no suelen disolverse entre sí y pueden identificarse físicamente gracias a la interfaz que existe entre ellos. Los materiales compuestos pueden ser de muchos tipos. Los que predominan son los fibrosos (compuestos o fibras en una matriz) y los particulados (compuestos o partículas en una matriz). Existen muchas combinaciones diferentes de materiales de refuerzo y matrices que puede emplearse para producir materiales compuestos. Por ejemplo, el material de la matriz puede ser un metal, como el

aluminio; una cerámica, como la alúmina; o un polímero, como la resina epóxica. Dependiendo del tipo de matriz empleado, el material compuesto puede clasificarse como compuesto de matriz metálica (MMC, por sus siglas en inglés), compuesto de matriz cerámica (CMC, por sus siglas en inglés), o compuesto de matriz polimérica (PMC, por sus siglas en inglés). También pueden seleccionarse los materiales fibrosos o particulados entre cualquiera de las tres clases principales de materiales con ejemplos como carbón, vidrio, aramida (conocida comercialmente como kevlar), carburo de silicio y otros.

Las combinaciones de materiales empleados en el diseño de compuestos dependen principalmente del tipo de aplicación y ambiente en el que el material habrá de emplearse.

Los materiales compuestos han sustituido a numerosos componentes mecánicos, en particular en las industrias aeronáutica, electrónica de la aviación, automotriz, de estructuras civiles y de equipo deportivo.

Una de las razones de ello es su elevada relación de resistencia y rigidez-peso. Algunos materiales compuestos avanzados tienen una rigidez y resistencia similar a la de algunos metales, pero con una densidad considerablemente menor y, por lo tanto, menor peso general de los componentes. Estas características vuelven muy atractivos a los materiales compuestos avanzados cuando el peso de los componentes resulta crucial. Por regla general, de manera similar a los materiales cerámicos, las principales desventajas de la mayoría de los materiales compuestos son su fragilidad y baja tenacidad (Smith & Hashemi, 2006).

3.3.5 Materiales electrónicos

Los materiales electrónicos no son importantes por su volumen de producción, pero sí lo son extremadamente por su avanzada tecnología. El material electrónico más importante es el silicio puro, al que se modifica de distintos modos para cambiar sus características eléctricas.

Los dispositivos microelectrónicos han hecho posibles nuevos productos, como los satélites de comunicaciones, las computadoras avanzadas, las calculadoras de bolsillo, los relojes digitales y los robots. El empleo del silicio y otros materiales semiconductores en la electrónica de estado sólido y en la microelectrónica, ha demostrado un enorme crecimiento desde 1970, y se espera que esta tendencia continúe. Han sido espectaculares los efectos de las computadoras y otros tipos de equipo industrial que emplean circuitos integrados fabricados con chips de silicio.

3.4 Propiedades mecánicas de los materiales

La *mecánica de materiales* es una rama de la mecánica aplicada que trata del comportamiento de los cuerpos sólidos sometidos a diversas cargas. Otros nombres para este campo de estudio son *resistencia de materiales* y *mecánica de los cuerpos deformables*. El objetivo principal de la mecánica de materiales es determinar los esfuerzos, las deformaciones unitarias y los desplazamientos en estructuras y sus componentes debidas a las cargas que actúan sobre ellas. Si podemos determinar estas cantidades para todos los valores de las cargas incluyendo las que causan la falla, tendremos una representación completa del comportamiento mecánico de esas estructuras. En la mecánica de materiales vamos un paso más allá al analizar los

esfuerzos y las deformaciones unitarias dentro de cuerpos reales; es decir, cuerpos de dimensiones finitas que se deforman con cargas. Para determinar los esfuerzos y las deformaciones unitarias, empleamos las propiedades físicas de los materiales, así como numerosas leyes y conceptos teóricos. Empleamos teorías para deducir fórmulas y ecuaciones para predecir el comportamiento mecánico, pero no se pueden usar esas expresiones en un diseño práctico, a menos que se conozcan las propiedades físicas de los materiales. Esas propiedades se conocen sólo después de que se han efectuado experimentos cuidadosos en el laboratorio (Gere & Goodno, 2009).

3.4.1 Esfuerzo normal

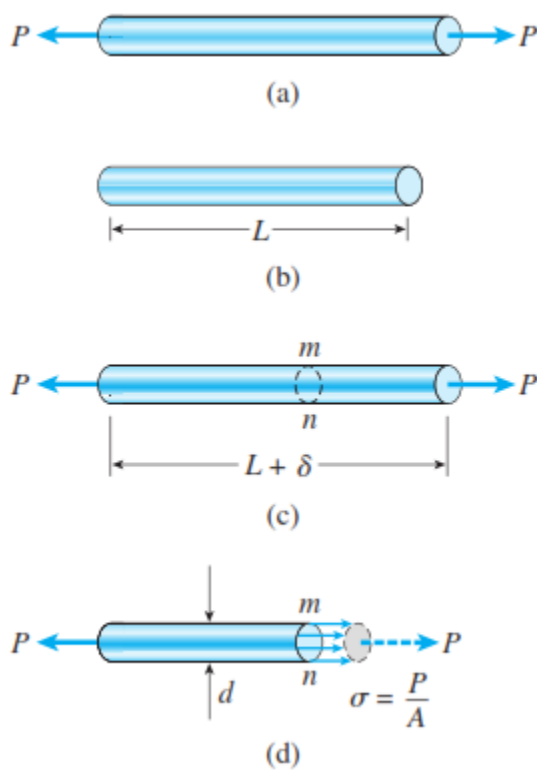
Los conceptos fundamentales en mecánica de materiales son el *esfuerzo* y la *deformación unitaria*. Estos conceptos se pueden ilustrar en su forma más elemental considerando una barra prismática sometida a fuerzas axiales. Una barra prismática es un elemento estructural recto que tiene la misma sección transversal en toda su longitud y una fuerza axial es una carga dirigida a lo largo del eje del elemento, lo que resulta en esfuerzos de tensión o de compresión en la barra. En la figura de abajo se muestran ejemplos donde la barra de arrastre es un elemento prismático en tensión y el puntal del tren de aterrizaje es un elemento en compresión (Gere & Goodno, 2009).



Figura 3.1 Ejemplo de tensión y compresión.

Para fines explicativos, consideremos la barra de la figura 3.2 y aislemos un segmento de ella como un cuerpo libre (figura 3.2 a). Al dibujar este diagrama de cuerpo libre no tomamos en cuenta el peso de la barra misma y suponemos que las únicas fuerzas activas son las fuerzas axiales P en los extremos. Luego, consideramos dos vistas de la barra; la primera muestra la misma barra *antes* de la aplicación de las cargas (figura 3.2 b) y la segunda la muestra *después* de aplicar las cargas (figura 3.2 c).

Observe que la longitud original de la barra se denota con la letra L y el incremento en longitud debido a las cargas se denota con la letra griega δ (delta) (Gere & Goodno, 2009).



Barra prismática en tensión:

- (a) Diagrama de cuerpo libre de un segmento de la barra, (b) segmento de la barra antes de la aplicación de las cargas, (c) segmento de la barra después de la aplicación de las cargas y (d) esfuerzos normales en la barra

Figura 3.2 Barra prismática.

El *esfuerzo* tiene unidades de fuerza por unidad de área y se denota por la letra griega σ (sigma). En general, los esfuerzos σ que actúan sobre una superficie plana pueden ser uniformes en toda el área o bien variar en intensidad de un punto a otro. Supongamos que los esfuerzos que actúan sobre la sección transversal mn (figura 3.2 d) están distribuidos uniformemente sobre el área. Entonces la resultante de estos esfuerzos debe ser igual a la magnitud del esfuerzo por el área de la sección transversal A de la barra, es decir, $P = \sigma A$.

Por tanto, obtenemos la expresión siguiente para la magnitud de los esfuerzos:

$$P = \sigma A \quad (3.1)$$

Cuando la barra es estirada por las fuerzas P , se dice que la barra está sometida a *esfuerzos de tensión*; si se invierte la dirección de las fuerzas, la barra se comprime y tenemos *esfuerzos de compresión* (Gere & Goodno, 2009).

3.4.2 Deformación unitaria normal

Como ya vimos, una barra recta cambiará su longitud al cargarla axialmente, haciéndose más larga en tensión y más corta en compresión. Por ejemplo, considere de nuevo la barra prismática de la figura 3.2. El alargamiento δ de esta barra (figura 3.2 c) es el resultado acumulativo del alargamiento de todos los elementos del material en todo el volumen de la barra. Supongamos que el material es el mismo en toda la barra. Entonces, si consideramos la mitad de la barra (longitud $L/2$), tendrá un alargamiento igual a $\delta/2$ y si consideramos un cuarto de la barra, tendrá un alargamiento igual a $\delta/4$. En general, el alargamiento de un segmento es igual a su longitud dividida entre la longitud total L y multiplicada por el alargamiento en general. Por tanto, una longitud unitaria de la barra tendrá un alargamiento igual a $1/L$ por δ . Esta cantidad se denomina *alargamiento por unidad de longitud*, o *deformación unitaria* y se denota con la letra griega ϵ (épsilon). Podemos observar que la deformación unitaria está dada por la ecuación.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (3.2)$$

Como la deformación unitaria normal es la razón de dos longitudes, es una cantidad adimensional, es decir, no tiene unidades. Por tanto, la deformación unitaria se

expresa simplemente como un número, independiente de cualquier sistema de unidades. Los valores numéricos de la deformación unitaria suelen ser muy pequeños, debido a que las barras hechas de material estructural sólo experimentan cambios pequeños de longitud cuando se someten a cargas. Como ejemplo, considere una barra de acero con longitud L igual a 2.0 m. Al ser sometida a una carga de tensión muy pesada, podría alargarse 1.4 mm, lo que significa que la deformación unitaria es:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{1.4 \text{ mm}}{2.0 \text{ m}} = 0.0007 = 700 \times 10^{-6}$$

La deformación unitaria en el ejemplo anterior podría expresarse como 700 $\mu\text{m/m}$. Además, en ocasiones la deformación unitaria se expresa como un porcentaje, en especial cuando es grande. (En el ejemplo anterior, la deformación es 0.07 por ciento).

3.4.3 Diagramas de esfuerzo-deformación unitaria

3.4.3.1 Tensión

Como ejemplo en la figura 3.3 se muestra un diagrama de esfuerzo-deformación unitaria para un acero estructural común en tensión se muestra. Las deformaciones unitarias están trazadas en el eje horizontal y los esfuerzos en eje vertical (A fin de mostrar todas las características importantes de este material, el eje de la deformación unitaria en la figura 3.3 no está dibujado a escala).

El diagrama inicia con una línea recta desde el origen O hasta el punto A , que indica que la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria en esta región inicial es *lineal*.

Más allá del punto *A*, ya no existe la proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación unitaria; de aquí que al esfuerzo en *A* se le nombre *límite elástico o de proporcionalidad*. Para aceros al bajo carbono, este límite está en el intervalo de 30 a 50 ksi (210 a 350 MPa), pero los aceros de alta resistencia (con contenido mayor de carbono más otras aleaciones) pueden tener límites de proporcionalidad mayores que 80 ksi (550 MPa). La pendiente de la línea recta de *O* a *A* se denomina *módulo de elasticidad*. Debido a que la pendiente tiene unidades de esfuerzo dividido entre la deformación unitaria, el módulo de elasticidad tiene las mismas unidades que el esfuerzo. Con un incremento en el esfuerzo más allá del límite de proporcionalidad, la deformación unitaria comienza a aumentar más rápidamente con cada incremento del esfuerzo. En consecuencia, la curva esfuerzo-deformación unitaria tiene una pendiente cada vez menor, hasta que en el punto *B* la curva se vuelve horizontal. A partir de este punto ocurre un alargamiento considerable de la muestra para ensayo sin un aumento notable en la fuerza de tensión (del punto *B* al *C*). Este fenómeno se conoce como *fluencia* del material y el punto *B* se denomina punto de fluencia.

En la región de *B* a *C* (figura 3.3) el material se vuelve *perfectamente plástico*, lo cual significa que se deforma sin un aumento en la carga aplicada. El alargamiento de una muestra de acero dulce en la región perfectamente plástica usualmente es de 10 a 15 veces el alargamiento que ocurre en la región lineal (entre el inicio de la carga y el límite de proporcionalidad). La presencia de deformaciones unitarias muy grandes en la región plástica (y más allá de ésta) es la razón para no trazar este diagrama a escala. Después de experimentar las grandes deformaciones unitarias que ocurren durante la fluencia en la región *BC*, el acero comienza a *endurecerse por deformación*. Durante el endurecimiento por deformación el material experimenta cambios en su estructura

cristalina, resultando en una resistencia mayor del material ante una deformación adicional. La elongación de la muestra de ensayo en esta región requiere un aumento en la carga de tensión y, por tanto, el diagrama esfuerzo-deformación unitaria tiene una pendiente positiva de *C* a *D*. Al final, la carga llega a su valor máximo y el esfuerzo correspondiente (en el punto *D*) se denomina *esfuerzo último*. Un alargamiento adicional de la barra en realidad se acompaña de una reducción en la carga y la fractura finalmente ocurre en un punto como el *E* de la figura 3.3.

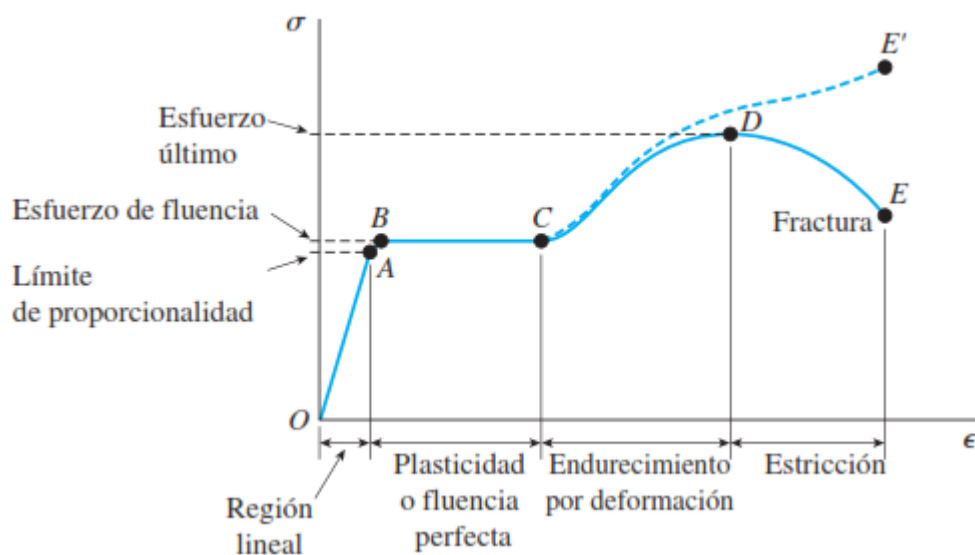


Figura 3.3 Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para un acero estructural común en tensión (no a escala).

3.4.3.2 Compresión

Las curvas esfuerzo-deformación unitaria para materiales en compresión difieren de las curvas de tensión. Los metales dúctiles como el acero, el aluminio y el cobre tienen límites de proporcionalidad en compresión muy cercanos a los de tensión y las regiones iniciales de sus *diagramas esfuerzo-deformación* unitaria en compresión y

tensión son casi iguales. Sin embargo, después que inicia la fluencia, el comportamiento es muy diferente. En un ensayo de tensión, la muestra se estira, puede ocurrir estricción y finalmente sucede la fractura. Cuando el material se comprime, se abulta hacia fuera en los lados y adopta una forma como de barril, debido a que la fricción entre la muestra y las placas extremas evita la expansión lateral. Al aumentar la carga, la muestra se aplanan y presenta una resistencia mucho mayor a un acortamiento adicional (lo que significa que la curva esfuerzo-deformación unitaria se vuelve muy empinada). Esas características se ilustran en la figura 3.4, donde se muestra un diagrama esfuerzo-deformación unitaria en compresión para el cobre.

Las curvas esfuerzo-deformación unitaria para compresión y tensión con frecuencia tienen formas similares, pero los esfuerzos últimos en compresión son mucho mayores que los de tensión. Además, a diferencia de los materiales dúctiles, que se aplanan cuando se comprimen, los materiales frágiles en realidad se fracturan con la carga máxima.

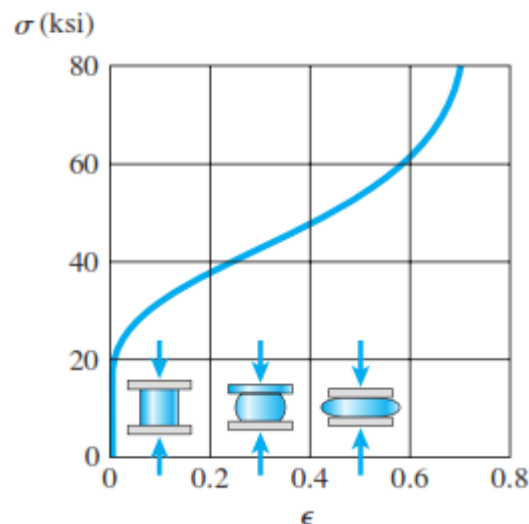


Figura 3.4 Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para el cobre en compresión.

3.5 Elasticidad y plasticidad

Los diagramas de esfuerzo-deformación unitaria representan el comportamiento de los materiales ingenieriles cuando están cargados en tensión o compresión, como se describió en la sección anterior. Para ir un paso más allá, consideremos que sucede cuando la carga se quita y el material se *descarga*. Suponga, por ejemplo, que aplicamos una carga de tensión a una muestra tal que el esfuerzo y la deformación unitaria vayan del origen O al punto A en la curva de esfuerzo-deformación unitaria de la figura 3.5 a. Suponga además que cuando la carga se remueve, el material sigue exactamente la misma curva de regreso al origen O . Esta propiedad de un material, mediante la cual regresa a sus dimensiones originales durante la descarga, se denomina *elasticidad* y se dice que el propio material es *elástico*. Observe que la curva-esfuerzo-deformación unitaria de O a A no tiene que ser lineal a fin de que el material sea elástico (Gere & Goodno, 2009).

Ahora suponga que cargamos este mismo material hasta un nivel mayor, tal que se alcanza el punto B en la curva esfuerzo-deformación unitaria (figura 3.5 b). Cuando la descarga sucede a partir del punto B , el material sigue la línea BC en el diagrama. Esta línea de descarga es paralela a la parte inicial de la curva de carga; es decir, la línea BC es paralela a una tangente a la curva esfuerzo-deformación unitaria en el origen. Cuando se alcanza el punto C , la carga se ha removido por completo, pero en el material permanece una *deformación unitaria residual* o *deformación unitaria permanente*, representada por la línea OC . Como consecuencia, la barra ensayada es más larga ahora que antes de la aplicación de la carga. Este alargamiento residual de la barra se denomina *deformación permanente*. De la deformación total OD desarrollada durante la carga de O a B , la deformación unitaria CD se ha recuperado

elásticamente y la deformación unitaria *OC* permanece como una deformación unitaria permanente. Así, durante la descarga la barra regresa parcialmente a su forma original y, por tanto, se dice que el material es *parcialmente elástico*. Entre los puntos A y B en la curva esfuerzo-deformación unitaria (figura 3.5 b), debe haber un punto antes del cual el material es elástico y después del cual el material es parcialmente elástico. Para encontrar este punto, cargamos el material hasta un valor seleccionado de esfuerzo y luego removemos la carga. Si no hay una deformación unitaria permanente (es decir, si el alargamiento de la barra regresa a cero), entonces el material es completamente elástico hasta el valor seleccionado del esfuerzo.

El proceso de carga y descarga se puede repetir para valores sucesivamente mayores del esfuerzo. Al final se alcanzará un esfuerzo tal que no toda la deformación unitaria se recupera durante la descarga. Mediante este procedimiento es posible determinar el esfuerzo en el límite superior de la región elástica, por ejemplo, el esfuerzo en el punto *E* en las figuras 3.5 a y b. El esfuerzo en este punto se conoce como *límite elástico* del material.

La característica de un material por la cual experimenta deformaciones unitarias inelásticas, más allá de la deformación unitaria en el límite elástico, se conoce como *plasticidad*. Por tanto, en la curva esfuerzo-deformación unitaria de la figura 3.5 a tenemos una región elástica seguida de una región plástica. Cuando suceden deformaciones unitarias grandes en un material dúctil cargado en la región plástica, se dice que el material experimenta *flujo plástico* (Gere & Goodno, 2009).

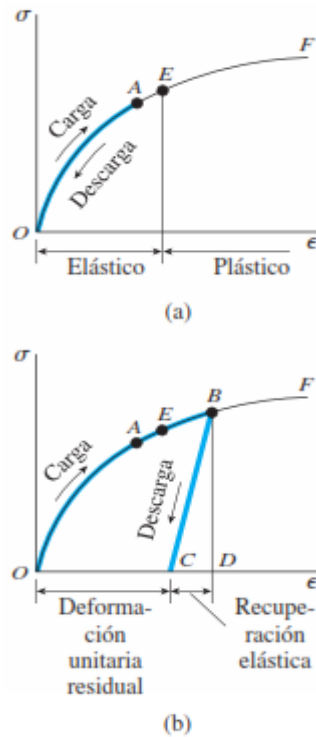


Figura 3.5 Diagramas esfuerzo- deformación unitaria que ilustran (a) un comportamiento elástico y (b) un comportamiento parcialmente elástico.

3.6 Módulo de elasticidad o Módulo de Young

Si se hiciera un ensayo con una probeta y la fuerza que actúa sobre la muestra desapareciera y la probeta volviera a su longitud inicial entonces el metal se deforma elásticamente. Para metales, la máxima deformación elástica suele ser inferior a 0.5 por ciento. En general, los metales y aleaciones muestran una relación lineal entre la tensión aplicada y la deformación producida en la región elástica del diagrama convencional que se describe por la ley de Hooke:

$$E = \frac{\sigma \text{ (tension)}}{\epsilon \text{ (deformacion)}} \quad (3.3)$$

3.7 Ley de Hooke

La relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria para una barra en tensión o compresión simple se expresa por la ecuación

$$\sigma = E \epsilon \quad (3.4)$$

En donde σ es el esfuerzo axial, ϵ es la deformación unitaria axial y E es una constante de proporcionalidad conocida como *módulo de elasticidad* del material. El módulo de elasticidad es la pendiente del diagrama esfuerzo deformación unitaria en la región linealmente elástica, como se mencionó anteriormente la deformación unitaria es adimensional, las unidades de E son las mismas que las del esfuerzo. Las unidades típicas de E son psi o ksi en unidades inglesas y pascales (o sus múltiplos) en unidades SI. La ecuación $\sigma = E \epsilon$ se conoce como *ley de Hooke*, nombrada en honor del famoso científico inglés Robert Hooke (1635-1703), quien fue la primera persona que investigó científicamente las propiedades elásticas de los materiales y probó varios de ellos como metal, madera, piedra, hueso y tendones. Hooke midió el alargamiento de alambres largos que soportaban pesos y observó que los estiramientos “siempre mantienen las mismas proporciones entre sí de acuerdo con los pesos que los causaron”. Así, Hooke estableció la relación lineal entre las cargas aplicadas y los alargamientos resultantes. El módulo de elasticidad tiene valores relativamente grandes para materiales que son muy rígidos, como los metales estructurales. El acero tiene un módulo de elasticidad de aproximadamente 30 000 ksi (210 GPa) y el aluminio tiene valores típicos alrededor de 10 600 ksi (73 GPa). Los materiales más flexibles tienen un módulo menor, los valores para los plásticos varían de 100 a 2000 ksi (0.7 a 14 GPa), algunos valores representativos de E se enlistan en el Anexo 3 tabla B. Para

la mayor parte de los materiales el valor de E en compresión es casi el mismo que en tensión. El módulo de elasticidad con frecuencia se llama *módulo de Young*, en honor de otro científico inglés, Thomas Young (1773-1829), quien introdujo la idea de un “módulo de la elasticidad” en conexión con una investigación de tensión y compresión de barras prismáticas.

3.8 Límite elástico

El límite elástico es un valor muy importante para el diseño estructural en ingeniería, pues es el nivel de tensión al que un metal o aleación muestran una deformación plástica significativa. Debido a que no hay un punto definido de la curva tensión-deformación donde acaba la deformación elástica y empieza la deformación plástica, se determina el límite elástico como la tensión a la que se produce una deformación elástica definida. En muchas ocasiones se determina el límite cuando se produce una deformación de 0.2 por ciento (Smith & Hashemi, 2006).

3.9 Relación de Poisson.

Cuando una barra prismática se somete a tensión, la elongación axial va acompañada de una *contracción lateral* (es decir, contracción normal a la dirección de la carga aplicada). Este cambio de forma se representa en la figura 3.6, donde en la parte (a) se muestra la barra antes de la carga y en la (b) después de la carga. En la parte (b), las líneas discontinuas representan la forma de la barra antes de la carga.

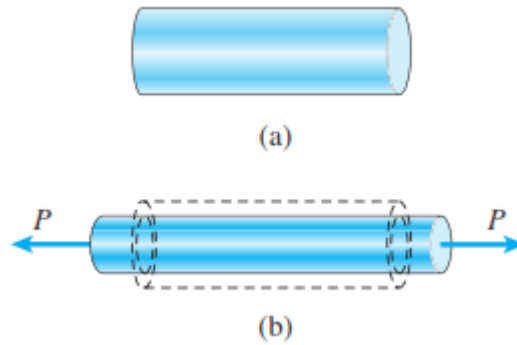


Figura 3.6 Alargamiento axial y contracción lateral de una barra prismática en tensión (a) antes de aplicar la carga y (b) barra después de aplicar la carga. (Las deformaciones de la barra se muestran muy exageradas).

La contracción lateral se observa con facilidad estirando una banda de caucho, pero en los metales los cambios en las dimensiones laterales (en la región linealmente elástica) usualmente son demasiado pequeños para observarlos a simple vista. Sin embargo, se pueden detectar mediante dispositivos sensitivos de medición. La *deformación unitaria lateral* ϵ' en cualquier punto en una barra es proporcional a la *deformación unitaria axial* ϵ en el mismo punto si el material es linealmente elástico. La relación de esas deformaciones unitarias es una propiedad del material conocida como *relación de Poisson*. Esta relación adimensional, que en general se denota por la letra griega ν (nu), se puede expresar mediante la ecuación

$$\nu = - \frac{\text{Deformación unitaria lateral}}{\text{Deformación unitaria axial}} = - \frac{\epsilon'}{\epsilon} \quad (3.5)$$

El signo menos agregado en la ecuación es para compensar el hecho de que las deformaciones unitarias lateral y axial por lo general tienen signos opuestos. Por ejemplo, la deformación unitaria axial en una barra en tensión es positiva y la

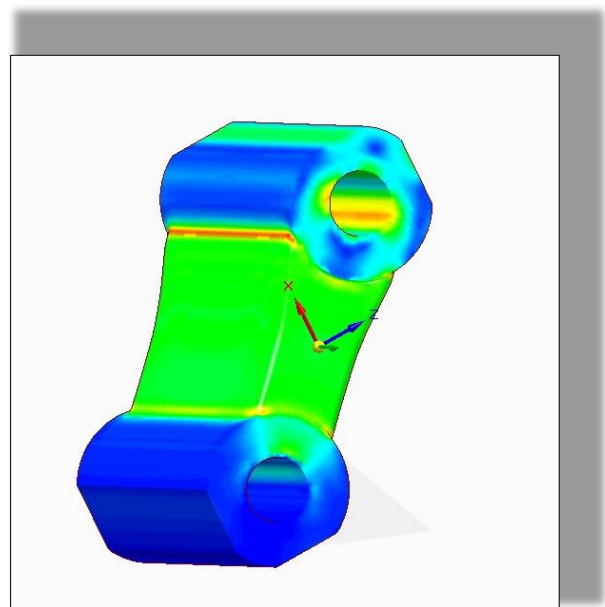
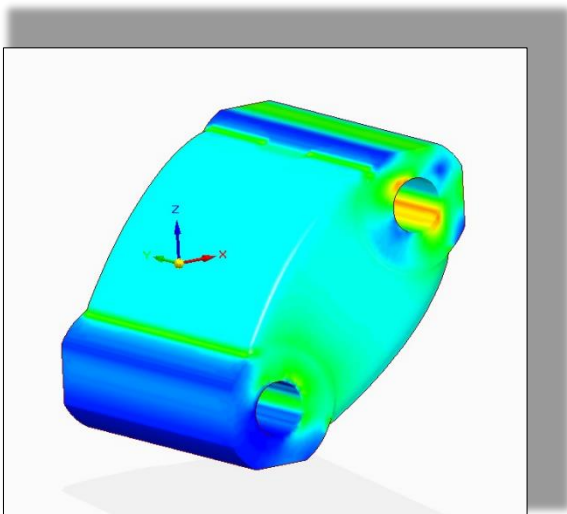
deformación unitaria lateral es negativa (debido a que el ancho de la barra disminuye). Para compresión tenemos la situación opuesta ya que la barra se acorta (deformación unitaria axial negativa) y se hace más ancha (deformación unitaria lateral positiva). Por tanto, para materiales ordinarios la relación de Poisson tendrá un valor positivo. Cuando se conoce la relación de Poisson para un material, podemos obtener la deformación unitaria lateral a partir de la deformación unitaria axial como sigue:

$$\epsilon' = - \nu \epsilon \quad (3.6)$$

La relación de Poisson recibe su nombre en honor del matemático francés Siméon Denis Poisson (1781-1840), quien intentó calcular esta relación mediante una teoría molecular de los materiales. Para materiales isotrópicos, Poisson determinó que $\nu=1/4$. Cálculos más recientes basados en mejores modelos de estructura atómica dan como resultado $\nu = 1/3$. Esas dos cifras están cercanas a los valores reales medidos, que están en el rango de 0.25 a 0.35 para la mayor parte de los metales y para muchos otros materiales. Entre los materiales con un valor extremadamente bajo de la relación de Poisson se incluyen el corcho, para el cual ν es prácticamente cero y el concreto, para el cual ν es aproximadamente 0.1 o 0.2. Un límite teórico superior para la relación de Poisson es 0.5. El caucho se acerca a este valor limitante. En el anexo 3 tabla B se da una tabla de relaciones de Poisson para varios materiales en el rango linealmente elástico. Para la mayor parte de los fines se supone que la relación de Poisson es la misma tanto en tensión como en compresión.

3.10 Tablas de propiedades mecánicas

Las propiedades de los materiales se listan en el Anexo 3 tabla A. Los datos de materiales en las tablas son los típicos, Sin embargo, las propiedades de los materiales y las curvas esfuerzo-deformación unitaria varían en gran medida, incluso para el mismo material, debido a los diferentes procesos de manufactura, a la composición química, a defectos internos, a la temperatura y a muchos otros factores. Por estas razones, los datos obtenidos en el anexo 3 tabla A (o de otras tablas de naturaleza similar) no se deben emplear para fines específicos de ingeniería o diseño. En cambio, se debe consultar los fabricantes o proveedores de materiales para obtener información sobre un producto particular.



CAPÍTULO 4.

Herramienta de análisis del Diseño Generativo

CAPÍTULO 4

Herramienta de Análisis del Diseño Generativo

4.1 introducción

Los componentes mecánicos en forma de vigas, barras simples, etc., se pueden analizar con bastante facilidad por medio de métodos básicos de la mecánica que proporcionan soluciones a los problemas más diversos. Sin embargo, los componentes reales rara vez son tan sencillos, y el diseñador se ve forzado a realizar aproximaciones menos eficaces mediante soluciones cercanas, experimentación o métodos numéricos. Existe un gran número de técnicas numéricas que se emplea en aplicaciones de ingeniería para las cuales la computadora digital es sumamente útil. En diseño mecánico, donde el software de diseño asistido por computadora (CAD) se utiliza de manera considerable, el método de análisis, que se integra perfectamente con el CAD, es el *análisis de elemento finito* (por practicidad, en esta tesis, utilizaremos su acrónimo, “FEA”). La teoría y aplicaciones matemáticas del método son enormes. Existe una diversidad de paquetes de software comerciales de FEA en que se encuentran disponibles, tal como SolidEdge, ANSYS, NASTRAN, Algor, etcétera. (Budynas & Nisbett, 2008)

El propósito de este capítulo es exponer algunos de los aspectos fundamentales del FEA, por lo cual la cobertura es simplemente introductoria. Para conocer detalles adicionales, se exhorta al lector a consultar la mayoría de referencias que se citan en este capítulo.

4.2 Aspectos Históricos del FEA

El desarrollo moderno de análisis de elementos finitos comenzó en la década de 1940 en el campo de la mecánica estructural con el trabajo de (Hrennikoff, 1941), (McHenry, 1943), y (Newmark, 1949), quienes emplearon una red o rejilla de elementos lineales (varillas y vigas) para solucionar esfuerzos en sólidos continuos. En 1943, a partir de un artículo de 1941, (Courant, 1943) sugirió una interpolación polinomial por pasos sobre regiones triangulares como el método para modelar problemas de torsión. Con el advenimiento de las computadoras digitales en la década de 1950, esta propuesta se pudo llevar a la práctica por los ingenieros para escribir y resolver las ecuaciones de rigidez en forma matricial (Levy, Julio 1953) (Argyris, Energy Theorems and Structural Analysis, 1955) (Argyris & Kelsey, Energy Theorems and Structural Analysis, 1960). Un artículo clásico de (Turner, Clough, Martin, & Topp, 1956), que se publicó en 1956, presentaba las ecuaciones matriciales de rigidez de los puntales, vigas y otros elementos. La expresión elemento finito se atribuye primero a (Clough, 1960).

El análisis de elementos finitos (FEA) se basa en dividir el modelo o geometría a validar en múltiples partes de pequeño tamaño denominadas “elementos”. La división del modelo 3D en pequeñas partes divide un problema complejo en muchos problemas de mayor simplicidad y que pueden ser resueltos de manera simultánea en menor tiempo. Los elementos comparten entre ellos puntos de intersección llamados “nodos”.

Este método emplea funciones polinomiales, en conjunto con operaciones matriciales, el comportamiento elástico continuo de cada elemento se desarrolla en términos del material y las propiedades geométricas del elemento. Las cargas se pueden aplicar

dentro del elemento (gravedad, dinámica, térmica, etc.), en la superficie del elemento o en los *nodos* del mismo. Estos nodos son las entidades fundamentales de gobierno del elemento, en la medida en que el nodo es donde se conecta un elemento con los otros, donde finalmente se establecen las propiedades elásticas de los mismos, donde se asignan las condiciones de frontera y donde, por último, se aplican las fuerzas (de contacto o cuerpo). Un nodo posee *grados de libertad* (dof, por sus siglas en inglés). Los grados de libertad son los movimientos independientes de rotación y traslación que pueden existir en un nodo. Como máximo, un nodo puede tener tres grados de libertad rotacionales y tres traslacionales. Una vez que cada nodo dentro de la estructura está definido *localmente* en forma matricial, entonces los elementos se ensamblan (unen) *globalmente* a través de sus nodos en común (dof) en una matriz global del sistema. Las cargas aplicadas y las condiciones de frontera se especifican entonces y mediante operaciones matriciales se determinan los valores de todos los grados de libertad de desplazamiento desconocidos. Una vez que se ha realizado este procedimiento, es algo simple hacer uso de estos desplazamientos para determinar las tensiones y esfuerzos por medio de las ecuaciones constitutivas de elasticidad (Budynas & Nisbett, 2008).

Los programas basados en FEA incluyen ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento de cada uno de los “elementos” teniendo en cuenta su conectividad con los demás elementos a través de los nodos. Las ecuaciones matemáticas empleadas en un estudio estático definen los desplazamientos de cada uno de los nodos en las direcciones X, Y y Z en función de la carga, las restricciones de movimiento y las propiedades mecánicas del material empleado, entre otros aspectos. El desplazamiento de cada uno de los nodos permite al programa calcular las

deformaciones unitarias en las diferentes direcciones y las tensiones resultantes (Gómez Gonzalez, 2013).

4.3 Posibles errores en el FEA

Con base en estos primeros antecedentes, se ha realizado una gran cantidad de trabajo para desarrollar el método del elemento finito en el área de las formulaciones de los elementos, así como en la instrumentación computacional del proceso de solución completo. Los mayores avances en tecnología computacional incluyen las capacidades del hardware que se extienden rápidamente, las rutinas de resolución de matrices eficientes, precisas y las gráficas por computadora que facilitan visualizar las etapas de procesamiento previo a la revisión de los resultados de la solución.

Puesto que el análisis de elementos finitos es una técnica numérica que convierte el dominio de una estructura continua en valores discretos, los errores son inevitables.

Estos errores son:

- **Errores computacionales.** Éstos se deben a errores de redondeo provenientes de los cálculos de punto flotante de la computadora y de las formulaciones de los esquemas de integración numérica que se utilizan. La mayoría de los códigos comerciales de elemento finito se concentran en reducir estos errores y, en consecuencia, el analista por lo regular se interesa en los factores relacionados con los valores discretos.

- **Errores de conversión discreta.** La geometría y distribución del desplazamiento de una estructura real varía continuamente. El uso de un número finito de elementos para modelar la estructura introduce errores al intentar igualar la geometría y distribución del desplazamiento debido a las limitaciones del ajuste de modelos matemáticos elegidos para los elementos.

Para apreciar un ejemplo de errores de conversión a valores discretos, considere la estructura de la placa delgada, de grosor o espesor constante, que se ilustra en la figura 4.2.

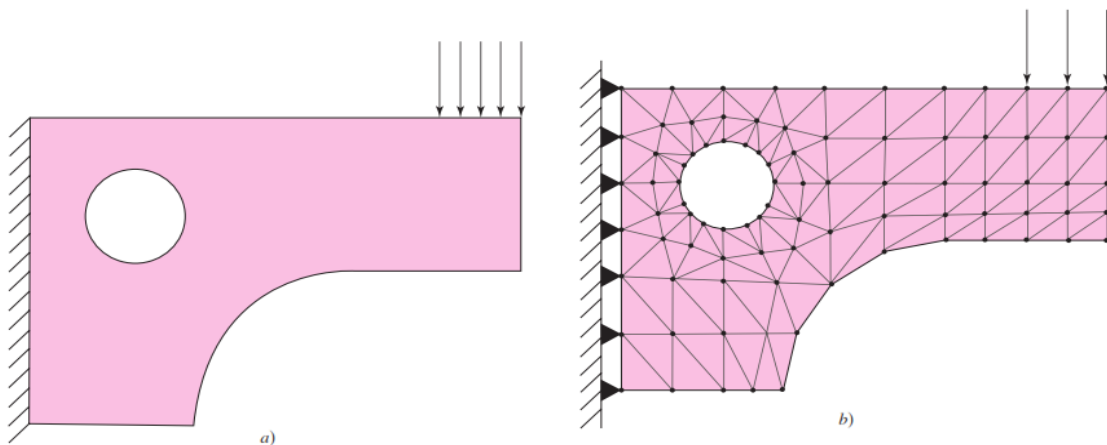


Figura 4.2 Problema estructural. a) Modelo idealizado b) Modelo de elemento finito.

La figura 4.2 b muestra un modelo de elemento finito de la estructura donde se emplean elementos triangulares simples de esfuerzo plano con tres nodos. Este tipo de elemento tiene un defecto que da origen a dos problemas básicos. El elemento tiene lados rectos que permanecen así después de la deformación. Las tensiones a través del elemento triangular de esfuerzo plano son constantes. El primer problema, de tipo geométrico, es el modelado de los bordes curvos. Observe que la superficie

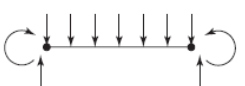
del modelo con una gran curvatura parece tener un modelado deficiente, mientras que la superficie del orificio tiene un modelado razonablemente bueno. El segundo problema, mucho más severo, es que las tensiones en diversas regiones de la estructura real cambian con rapidez, y el elemento de tensión constante proporcionará únicamente una aproximación de la tensión promedio en el centro del elemento. De este modo, en pocas palabras, los resultados predichos por este modelo serán en extremo deficientes. Los resultados pueden mejorarse si se aumenta de manera significativa el número de elementos (mediante el incremento de la densidad de la malla). De modo alternativo, si se emplea un elemento mejor, tal como un cuadrilátero de ocho nodos, que es más adecuado para la aplicación, y proporcionará mejores resultados. Debido a las funciones de interpolación de orden superior, el elemento cuadrilátero de ocho nodos puede modelar bordes curvos y mantener una función de orden superior para distribuir la tensión.

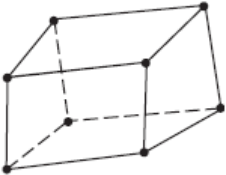
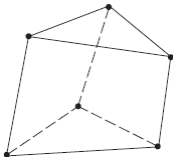
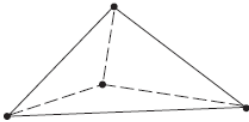
En la figura 4.2 los elementos triangulares se encuentran sombreados, mientras que los puntos negros representan los nodos de los elementos. Las fuerzas y las limitantes sólo se pueden colocar en los nodos. Los nodos de elementos de esfuerzo de un plano triangular simple tienen solamente dos grados de libertad, traslación en el plano. De este modo, los triángulos de soporte simple en el borde izquierdo, en negro sólido, representan el soporte fijo del modelo. Por otro lado, como se ilustra, la carga distribuida puede aplicarse sólo a tres nodos. La carga modelada tiene que ser estáticamente consistente con la carga real.

4.4 Geometría del Elemento

Se utilizan muchas formas geométricas de elementos en el análisis de elementos finitos para aplicaciones específicas. Los diversos elementos que emplean los códigos de software comercial FEA de propósito general constituyen los que se conoce como la *biblioteca de elementos* del código. Los elementos pueden ubicarse en las siguientes categorías: *elementos de línea*, *elementos de superficie*, *elementos sólidos* y *elementos de propósito específico*. La tabla 4.1 proporciona algunos, pero no todos, los tipos de elementos disponibles para el análisis de elementos finitos de problemas estructurales. No todos los elementos soportan todos los grados de libertad. Por ejemplo, el elemento de puntal en 3-D soporta únicamente tres grados de libertad traslacionales en cada nodo. Cuando se conectan elementos con grados de libertad diferentes, por lo general se requiere de alguna modificación manual. Por ejemplo, considere la conexión de un elemento de puntal a un elemento de la estructura. Este último soporta la totalidad de los seis grados de libertad en cada nodo. Un miembro de los puntales, cuando se conecta al anterior, puede girar libremente en la conexión.

Tabla 4.1 Bibliotecas de elementos de código (Budynas & Nisbett, 2008).

Tipo de elemento	Ninguno	Forma	Número de nodos	Aplicaciones
Línea	Puntal		2	Barra con extremos articulados en tensión o compresión.
Línea	Viga		2	Flexión.
Línea	Armazón		2	Axial, torsional o de flexión. Con o sin rigidez de carga.

Superficie	Cuadrilátero de 4 nodos		4	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, panel a cortante, placa plana delgada en flexión.
Superficie	Cuadrilátero de 8 nodos		8	Esfuerzo o deformación plana, placa plana o cascarón en flexión.
Superficie	Cuadrilátero de 3 nodos		3	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, panel a cortante, placa plana delgada en flexión. Preferible cuadriláteros donde sea posible. Usado para transiciones de cuadriláteros.
Superficie	Cuadrilátero de 6 nodos		6	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, placa plana o cascarón en flexión. Preferible cuadriláteros donde sea posible. Usado para transiciones de cuadriláteros.
Sólido	Hexagonal de 8 nodos (paralelepípedo o ladrillo)		8	Sólido, placa gruesa.
Sólido	Pentagonal de 6 nodos (cuña)		6	Sólido, placa gruesa. Usado para transiciones.
Sólido	Tetraedro de 4 nodos (tetra)		4	Sólido, placa gruesa. Usado para transiciones.

Propósito especial	Brecha		2	Desplazamientos libres para espacios preestablecidos.
Propósito especial	Gancho, conexión		2	Desplazamientos libres para espacios preestablecidos.
Propósito especial	Rígido		Variable	Restricción rígida entre nodos.

4.5 Generación de malla

La red de elementos y nodos que “discretizan” una región se conoce como *malla*. La *densidad de malla* se incrementa a medida que más elementos se colocan dentro de una región dada. El *refinamiento de malla* ocurre cuando la malla se modifica de un análisis de un modelo al siguiente análisis para producir resultados mejorados. Por lo general, los resultados mejoran cuando la densidad de malla se incrementa en áreas de gradientes de esfuerzo alto y/o cuando las zonas de transición geométrica se enmallan de manera uniforme. Generalmente, pero no siempre, los resultados del FEA convergen hacia resultados exactos a medida que el enmallado se refina continuamente. Para valorar la mejora, en las regiones donde aparecen gradientes de esfuerzo alto, la estructura puede volver a enmallarse con una densidad mayor. Si existe un mínimo cambio en el máximo valor de esfuerzo, es razonable presumir que la solución ha convergido. Existen tres formas básicas para generar una malla de elementos: manual, semiautomática o completamente automatizada.

1. **Generación manual de mallas.** Así es como se creaba la malla de elementos en los primeros días del método de elemento finito. Éste es un método intensivo

de mucha labor para crear una malla, y excepto por algunas modificaciones rápidas de un modelo se utiliza raras veces.

Nota: debe tenerse cuidado al editar el archivo de texto de entrada. Con cierto software FEA, otros archivos tales como el archivo de gráficos binario del preprocesador pueden no modificarse. Por consiguiente, los archivos pueden ya no ser compatibles entre sí.

2. **Generación semiautomática de malla.** A lo largo de los años, se han desarrollado algoritmos computacionales que le permiten al modelador enmallar de manera automática las regiones de la estructura que se está dividiendo, mediante el empleo de límites bien definidos. Puesto que el modelador tiene que definir estas regiones, la técnica se considera *semiautomática*. El desarrollo de los variados algoritmos computacionales para generar mallas proviene del campo de los gráficos por computadora.
3. **Generación completamente automatizada de mallas.** La mayor parte de los distribuidores de software han concentrado sus esfuerzos en desarrollar la generación completamente automática de mallas, y en algunos casos, un refinamiento para mallas automáticas *autoadaptables*. El objetivo obvio es reducir de manera significativa el tiempo de preprocesamiento del modelador, así como el esfuerzo para llegar a una malla de FEA final bien construida. Una vez que se han definido las fronteras o los límites completos de la estructura, sin subdivisiones como en la generación semiautomática de mallas y con un mínimo de intervención por parte del usuario, se tienen disponibles diversos esquemas para discretizar la región con *un tipo de elemento*. En el caso de problemas elásticos planos, los límites o fronteras se definen mediante una

serie de líneas geométricas internas y externas, y el tipo de elemento que formará la malla automáticamente será el elemento elástico plano. Para estructuras de paredes delgadas, la geometría se puede definir por medio de representaciones de superficie tridimensionales y el tipo de elemento que formará la malla automáticamente será el elemento de placa tridimensional. Para estructuras sólidas, las fronteras podrían construirse empleando técnicas de *geometría sólida constructiva (CSG)* o bien *representación de frontera*. Los tipos de elemento finito del enmallado automático serían el ladrillo (paralelepípedo) y/o el tetraedro.

Los programas de refinamiento automático auto adaptativo de mallas calculan el error de la solución FEA. Con base en ese error, la malla se revisa de manera automática y vuelve a analizarse. El proceso se repite hasta que se satisfacen alguna convergencia o bien un criterio de terminación (Budynas & Nisbett, 2008).

4.6 Aplicación de carga

Existen dos formas básicas de especificar cargas en una estructura: nodal y por carga de elementos. No obstante, la carga de elementos finalmente se aplica a los nodos empleando cargas nodales equivalentes. Un aspecto de la aplicación de cargas se relaciona con el principio de Saint-Venant, Principio que establece los efectos de un sistema de fuerzas sobre un sólido deformable son independientes de la distribución particular de fuerzas que conducen a esa resultante a partir de una distancia suficiente de los puntos de aplicación de dichas fuerzas (RAI, 2020). Si no se tiene interés acerca de los esfuerzos cercanos a los puntos de aplicación de carga, no es necesario intentar

distribuir la carga de manera muy precisa. La fuerza neta y/o momento puede aplicarse a un solo nodo, siempre que el elemento soporte los grados de libertad asociados con la fuerza y/o el momento en el nodo. Sin embargo, el diseñador no debe sorprenderse, o preocuparse, cuando revise los resultados y los esfuerzos en la vecindad del punto de aplicación de la carga y encuentre que son muy grandes. Los momentos concentrados pueden aplicarse a los nodos de vigas y la mayoría de los elementos de placas. No obstante, los momentos concentrados no pueden aplicarse a elementos de puntales, planos elásticos bidimensionales, axiales simétricos o de ladrillos, pues no soportan grados de libertad rotacionales. Un momento puro se puede aplicar a estos elementos solamente mediante el empleo de fuerzas en la forma de un par. De la mecánica de la estática se puede generar un par empleando dos o más fuerzas que actúen en un plano donde la fuerza neta de las mismas sea igual a cero. El momento neto de las fuerzas es un vector perpendicular al plano y es la sumatoria de los momentos de las fuerzas que se toman en cualquier punto común.

Las cargas de elementos incluyen cargas estáticas debidas a la gravedad (peso), efectos térmicos, cargas superficiales tales como la presión hidrostática y uniforme, y cargas dinámicas debidas a aceleración constante y rotación en estado estacionario (aceleración centrífuga). Como se estableció con anterioridad, las cargas de elementos se convierten por medio de software en las cargas nodales equivalentes y al final se tratan como cargas concentradas que se aplican a los nodos.

Para carga de gravedad, la gravedad constante en unidades adecuadas y la dirección de la misma deben ser suministradas por el diseñador.

Para carga térmica, el coeficiente de expansión térmica α debe proporcionarse para cada material, además de la temperatura inicial de la estructura y las temperaturas nodales finales. La mayoría de los paquetes de software tienen capacidad para efectuar primero un análisis de transferencia de calor de elemento finito sobre la estructura para determinar las temperaturas nodales finales. Los resultados de temperatura se guardan en un archivo, que pueden transferirse al análisis de esfuerzo estático. En este caso el modelo de transferencia térmica debería tener los mismos nodos y tipo de elemento que el correspondiente al modelo del análisis de esfuerzo estático.

Por lo general, la carga superficial puede aplicarse a la mayoría de los elementos. Por ejemplo, las cargas de línea transversal lineal o uniforme (fuerza/longitud) pueden especificarse en vigas. Por lo regular, la presión uniforme y lineal puede aplicarse en los bordes de elementos axiales simétricos y de plano bidimensional. La presión lateral se puede aplicar sobre elementos de placa y sobre la superficie de elementos de ladrillo sólidos. Cada paquete de software tiene su propia forma para especificar estas cargas superficiales, habitualmente en combinación de modos de texto y gráficos.

4.7 Condiciones de frontera

La simulación de las condiciones de frontera y otras formas de limitantes probablemente es la parte más difícil del modelado preciso de una estructura para un análisis de elemento finito. Con limitantes específicas, es relativamente sencillo cometer errores de omisión o distorsión. Para el analista puede ser necesario probar diferentes enfoques para modelar limitantes enigmáticas tales como uniones de

pernos, soldaduras, etc., que no son tan simples como las uniones fijas o pernos idealizados. La prueba debería confinarse a problemas simples y no a una estructura grande y compleja. En ocasiones, cuando la naturaleza exacta de una condición limítrofe o de frontera es incierta, sólo pueden ser posibles los límites de comportamiento. Por ejemplo, se han modelado ejes con cojinetes con soporte simple. Es más probable que el soporte sea algo entre soporte simple y fijo, y se podrían analizar ambas limitantes para establecer los límites. Sin embargo, al suponer un soporte simple, los resultados de la solución son conservadores para esfuerzos y deflexiones. Es decir, la solución pronosticaría esfuerzos y deflexiones mayores que las reales.

Las *ecuaciones de restricción de punto múltiple* se emplean con bastante frecuencia para modelar condiciones de frontera o conexiones rígidas entre miembros elásticos. Cuando se utilizan en esta última forma, las ecuaciones actúan como elementos y entonces se conocen como *elementos rígidos*. Los elementos rígidos pueden rotar o trasladarse únicamente de manera rígida.

Los *elementos de frontera* se utilizan para forzar desplazamientos específicos distintos de cero sobre una estructura. Los elementos de frontera también pueden ser útiles al modelar condiciones de frontera que son laterales del sistema coordinado global.

Nota: Con los actuales paquetes de CAD y generadores automáticos de mallas, es una tarea cómoda crear un modelo sólido y enmallar el volumen con elementos finitos. Con las velocidades de computación actuales y con sobrada memoria de trabajo computacional, es muy fácil crear un modelo con números extremadamente grandes de elementos y nodos. Las técnicas antiguas de modelado de elemento finito parecen

pasadas de moda e innecesarias. No obstante, puede gastarse mucho tiempo de manera innecesaria en un modelo sumamente complejo cuando uno mucho más sencillo funcionaría. El modelo complejo puede incluso no proporcionar una solución precisa, mientras que un modelo más simple lo hará.

Es importante mencionar que, el solucionador de elemento finito genera entonces, las deflexiones y esfuerzos de Von Mises

4.8 Esfuerzo de Von Mises

Es la tensión equivalente que actúa sobre los elementos diferenciales de un diseño y que es comparada con la tensión y límite elástico del material. Permite conocer si la tensión está dentro de la zona elástica óptima o por el contrario se encuentra en la zona plástica no deseada. En términos de las tensiones principales σ_1 , σ_2 y σ_3 la tensión de Von Mises se expresa de la siguiente manera:

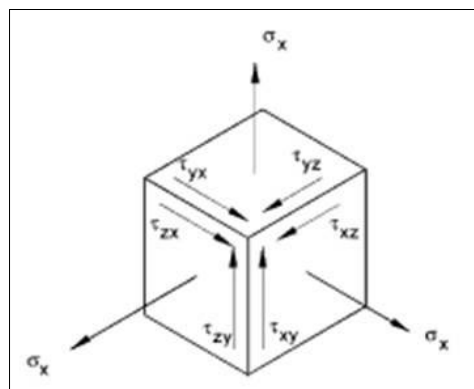


Figura 4.3 Tensión de Von Mises.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] / 2} \quad (4.1)$$

El criterio de máxima tensión de Von Mises se basa en la teoría de Von Mises-Hencky, también conocida como teoría de la energía de cortadura o teoría de la energía de distorsión máxima. La teoría expone que un material dúctil comienza a ceder en una ubicación cuando la tensión de Von Mises es igual al límite de tensión. En la mayoría de los casos, el límite elástico se utiliza como el límite de tensión.

4.9 Criterio de tensión normal máxima

El criterio de tensión normal máxima, también conocido como criterio de Coulomb, se basa en la teoría de tensión normal máxima. Según esta teoría, el fallo se produce cuando la tensión principal máxima alcanza el límite de ruptura del material ante una tensión simple. Este criterio se utiliza para materiales frágiles. Se supone que el límite de ruptura del material en tensión y compresión es la misma. Esta suposición no es válida en todos los casos. Por ejemplo, las grietas disminuyen considerablemente la resistencia del material a la tensión, mientras que su efecto es mucho menor en la compresión porque tienden a cerrarse. Los materiales frágiles no tienen un punto de flexibilidad específico, por lo que se recomienda no utilizar la resistencia elástica para definir la tensión límite para este criterio (Systemes, 2012).

Esta teoría predice el fallo cuando:

$$\sigma_1 \geq \sigma_{limite} \quad (4.2)$$

Donde σ_1 es la tensión principal máxima. Por lo tanto, si se selecciona este criterio en algún software, entonces para el cálculo de factor de seguridad de la pieza, la ecuación es:

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\sigma_{\text{límite}}}{\sigma_1} \quad (4.3)$$

4.10 Factor de seguridad

El factor de seguridad (FDS) es un número adimensional que permite visualizar como está cargada la pieza, y si puede llegar a soportar bien las cargas a las que está sometida. El FDS relaciona la máxima tensión resultante en un punto con la tensión máxima que teóricamente puede llegar a soportar el material. El valor teórico se obtiene experimentalmente mediante ensayos físicos de tracción con probetas normalizadas para cada uno de los materiales. Generalmente los valores del FDS oscilan entre 1 y 4, y esto permite sobredimensionar la pieza para evitar la rotura de la misma. La ecuación que expresa al factor de seguridad es la siguiente:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{L.E.}}{n} [n = 1,2,3,4,] \quad (4.5)$$

En donde, (σ_s) es la tensión de seguridad o tensión de trabajo y $(\sigma_{L.E.})$ es la tensión límite elástico.

4.11 Alcances del FEA

El uso de software de FEA permite estudiar el comportamiento mecánico de un modelo de pieza o ensamblaje bajo ciertas condiciones de servicio sin necesidad de crear un prototipo físico del mismo. Este tipo de validación permite evaluar el comportamiento de su modelo de forma rápida y económica sin tener que invertir recursos en ensayos destructivos (Gómez Gonzalez, 2013).

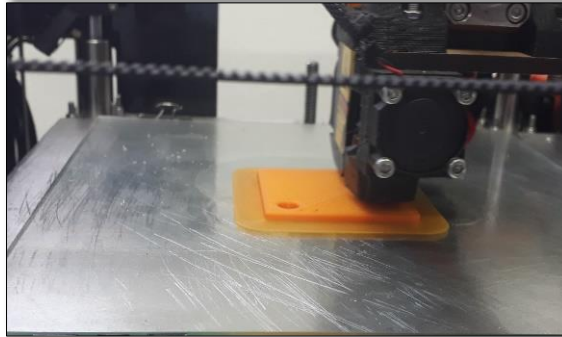
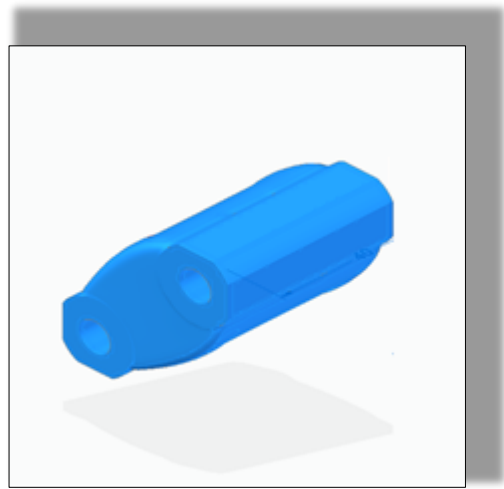
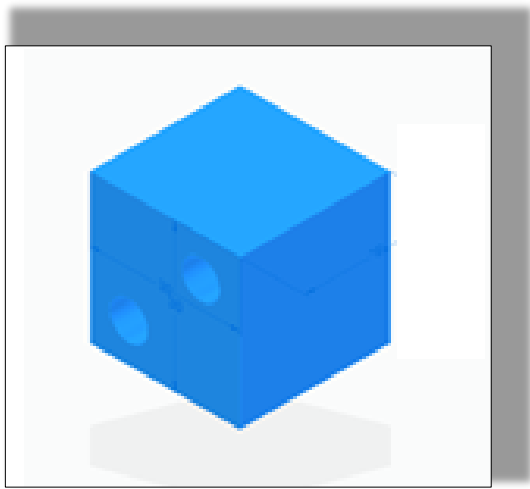
Generalmente estos software, se encuentran sus módulos de CAD y CAE perfectamente integrados por lo cual, se pueden modificar la geometría del modelo 3D y volver a ensayarlo bajo diferentes condiciones de contorno (distintos materiales, cargas, mallado, etc.) tantas veces como se crea necesario hasta encontrar el modelo que mejor se ajusta a las necesidades requeridas (Gómez Gonzalez, 2013).

NOTA: No fundamente sus decisiones de diseño únicamente en los resultados obtenidos en estos Software. Utilice esta información junto con datos experimentales y con la experiencia práctica. Las pruebas de campo son de obligado cumplimiento para validar su diseño definitivo. El software ayuda a reducir el tiempo de salida al mercado de sus productos, aunque sin llegar a eliminar las pruebas de campo por completo (*Dassault Systemes Corps*).

Resumen

En la actualidad los ingenieros en diseño mecánico tienen muchas herramientas computacionales poderosas. El análisis de elemento finito es una de las más importantes y se integra fácilmente dentro del ambiente de la ingeniería asistida por computadora. El software de modelado sólido CAD proporciona una excelente

plataforma para la creación fácil de modelos de FEA. En este capítulo se han descrito características importantes en los análisis, no obstante, el propósito de este capítulo fue exponer algunas consideraciones básicas acerca de configuraciones de elementos de FEA, parámetros, consideraciones de modelado y solucionadores, y no necesariamente la descripción de situaciones geométricas complejas. La teoría y la aplicación del elemento finito es un tema muy amplio, y tomará años de experiencia antes de que llegue a ser entendido y especializado mediante la técnica. Existen muchas fuentes de información acerca del tema en diversos libros de texto; distribuidores de software de FEA (tales como SolidEdge ANSYS, MSC/NASTRAN y Algor) suministran estudios de casos, guías de usuario, boletines de grupos de usuarios, guías tutoriales, etc.; y en internet se proporcionan muchas fuentes.



CAPÍTULO 5.

Simulaciones de los casos de estudio.

CAPÍTULO 5.

Simulación de los casos de estudio

5.1 Introducción

En este capítulo, se detalla cómo se realizó el diseño de manera clásica de 3 cubos, de diferentes dimensiones, mismas que se manufacturaron en el U. Fab. De la universidad con la ayuda de una impresora 3D Makermex, empleando como material base, ABS de alto impacto para posteriormente someterlos a pruebas mecánicas de tensión y conseguir los valor de esfuerzos a los que dichos cubos se fracturan, al obtener estos valores, nos transportamos a un ambiente virtual llamado SolidEdge® en donde se aplicó la técnica del diseño generativo de estos diseños, por supuesto, se validaron por FEA, en seguida se manufacturaron estos nuevos diseños optimizados, con la misma impresora y exactamente con las mismas configuraciones de impresión, y por supuesto, el mismo material. Finalmente se realizaron pruebas de tensión y se compararon los resultados.

5.2 Diseño y manufactura de los cubos.

En seguida, se muestran los planos desde las vistas de planta e isométricas, de las piezas que se manufacturaron en los laboratorios de ingeniería de la universidad. Dichas piezas consisten en unos cubos con unos barrenos en las esquinas, la idea fue la de elaborar unas piezas que cumplieran la función práctica para imprimirse en 3D, esto en cuanto a condiciones de tamaño, tomando en cuenta que la impresora es capaz de manufacturar piezas de hasta 20 cm x 20 cm x 20 cm, pero también, que estas piezas, posteriormente, se pudieran someter a esfuerzos de tensión,

precisamente por esto, se le agregaron dos barrenos para que de estos, se pudieran sujetar unos pernos que nos sirvieran para hacer las pruebas de tensión. Teniendo como objetivo principal que las propias geometrías cumplieran con estas necesidades, se tomó la decisión de elaborar las piezas a continuación mostradas.

Las piezas diseñadas de manera clásica fueron 3 cubos, que llamaremos cubo “A”, “B” y “C”. a continuación, se muestran sus dimensiones.

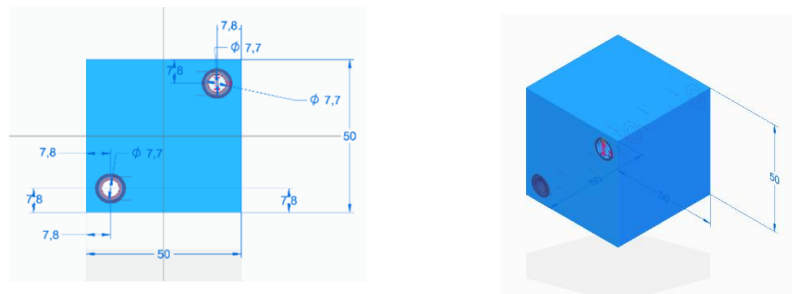


Figura 5.1. Cubo “A”- Dimensiones Alto: 50 mm Ancho: 50 mm profundo: 50 mm.

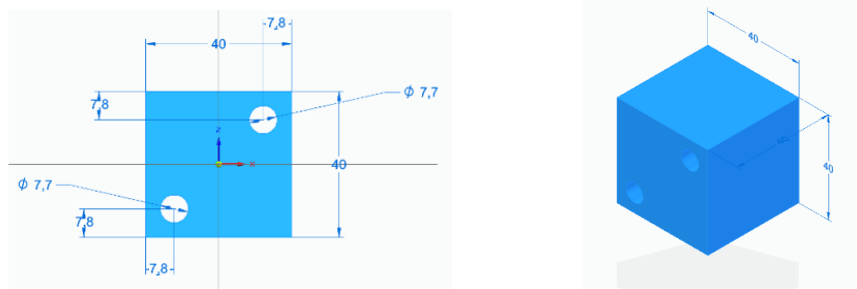


Figura 5.2. Cubo “B”- Dimensiones Alto: 40 mm Ancho: 40 mm profundo: 40 mm.

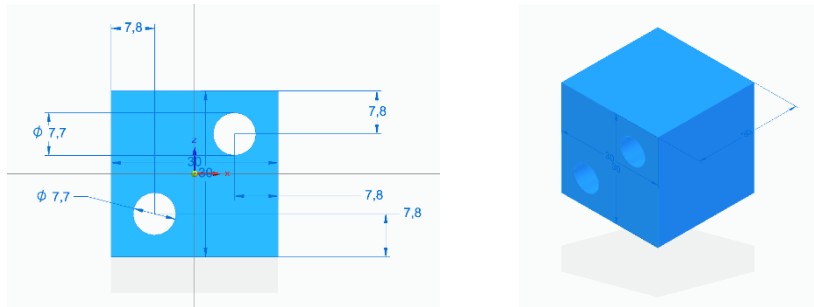


Figura 5.3. Cubo “C”- Dimensiones *Alto: 30 mm Ancho: 30 mm profundo: 30 mm.*

Posteriormente se manufacturaron en la impresora 3D Makermex (Makermex, 2014), como se muestran en la siguiente figura:

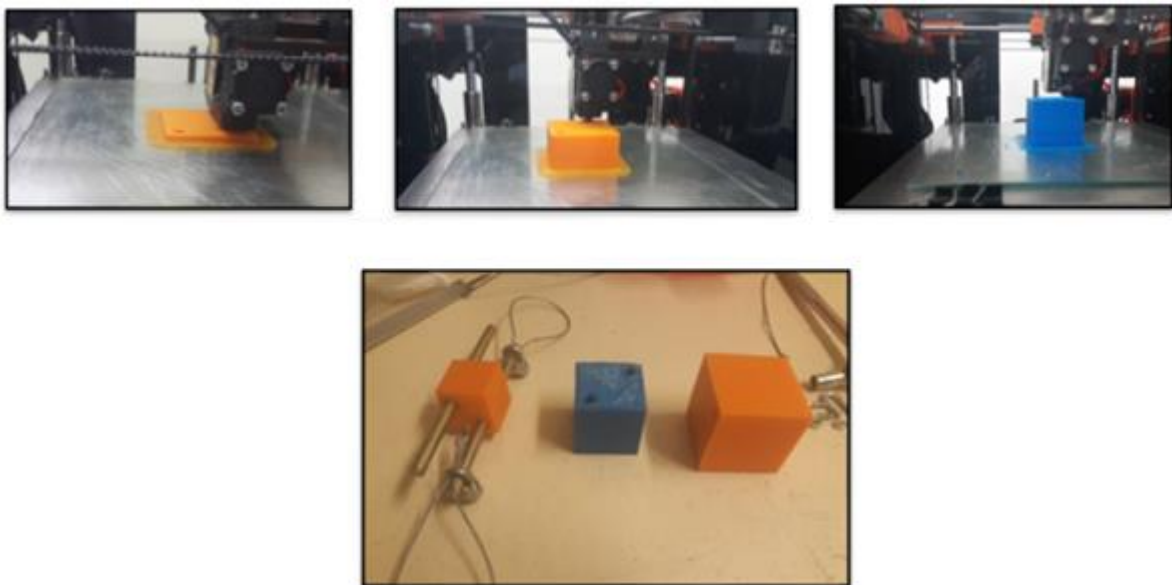
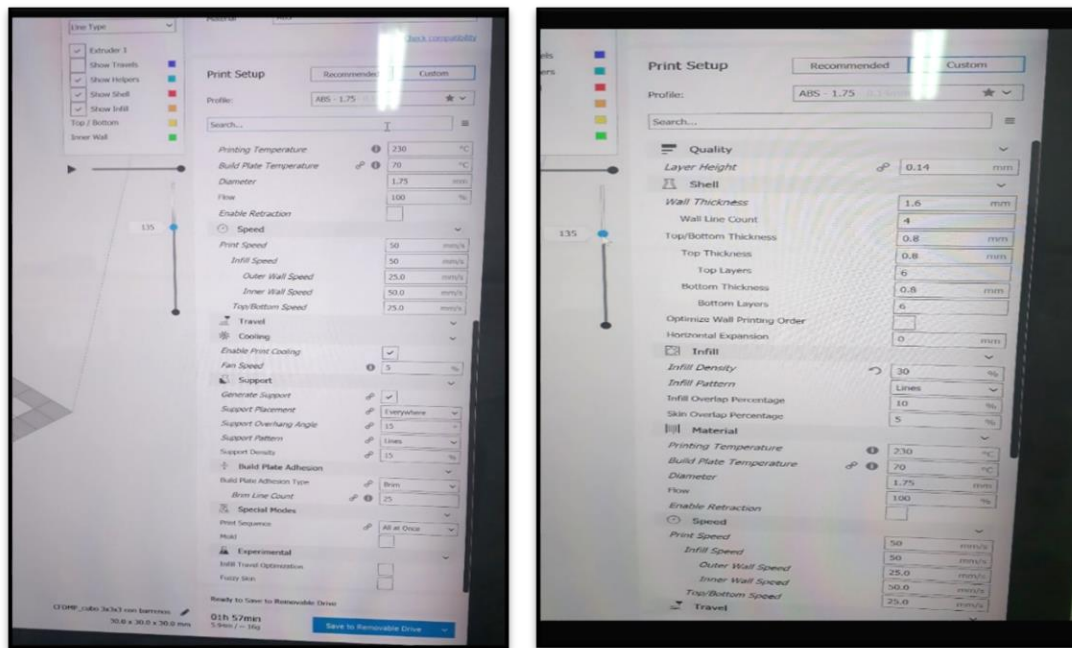


Figura 5.4 Cubos “A, B, y C”- Impresos.

En la figura 5.5 se muestran las configuraciones que se utilizaron para las impresiones 3D de los cubos A, B y C, estas configuraciones se realizan previamente en un software llama UltraMaker Cura 4.0.



**Figura 5.5 Configuraciones que se utilizaron para las impresiones 3 D en el Software
UltraMaker Cura 4.0. (Ultimaker, 2019)**

5.2.1. Pruebas de tensión

Una vez que las piezas fueron obtenidas, se procedió a hacerles pruebas mecánicas de tensión en el laboratorio de ingenieras de la universidad, utilizando la maquina LLOYD LR10K Plus la cual tiene una capacidad de prueba de hasta 10 kN (2248 lbf) y está diseñado para realizar pruebas complejas de múltiples etapas, la máquina utiliza celdas de carga intercambiables de alta precisión para mediciones de tensión, compresión y ciclo a través de fuerza cero. Los elementos de sujeción que se utilizaron fueron 2 pernos de acero aleado de 5" de longitud, 2 Ganchos para Cableado con Perno en U, de material Acero Forjado de 1/8" Diámetro y 2 metros de cable metálico de 1/8" Diámetro. A continuación, se muestran evidencias del proceso.



Figura 5.6. Realización de Pruebas mecánicas de tensión en laboratorios de la UPAEP.

Una vez obtenidos estos resultados (mostrados en el capítulo 6), se analizaron y se tomó la decisión de solo aplicar diseño Generativo al cubo “B” ya que los 3 cubos (A,

B y C), soportaron el mismo esfuerzo, por lo cual se consideró innecesario optimizar los 3.

5.3 Aplicación de Diseño generativo con base en datos obtenidos

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 (Lobos, 2019).

A continuación, se muestra cómo se realizó el diseño generativo, en el ambiente virtual SolidEdge, al cubo “B”, y se pudieron obtener 3 diferentes diseños optimizados a los cuales les llamaremos cubo “ B_1 ”, “ B_2 ”, y “ B_3 ”.

Cabe mencionar que al cubo B_1 , se le pudo reducir su masa en un 30 %, al cubo B_2 , se le pudo reducir su masa en un 40 %, al cubo B_3 , se le pudo reducir su masa en un 50 %. Dichos cubos se muestran en las siguientes figuras:

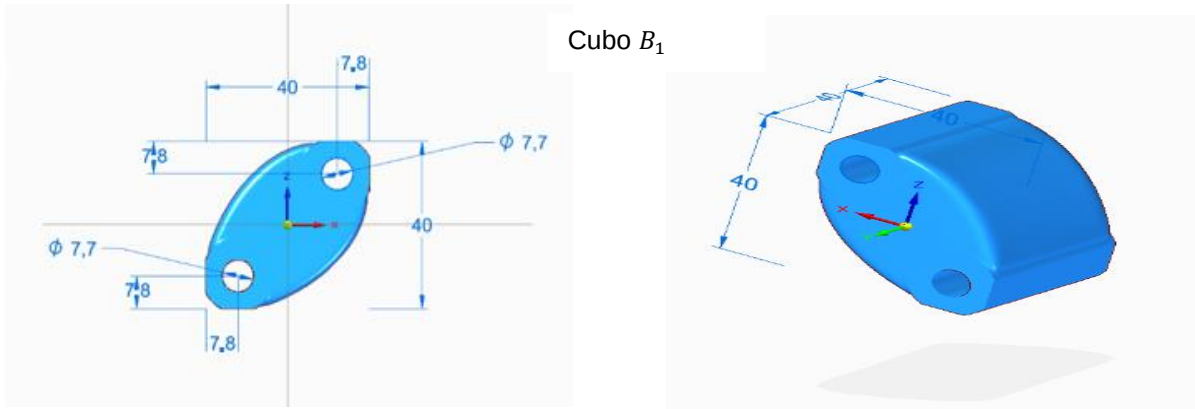


Figura 5.7 Diseño del Cubo B_1 .

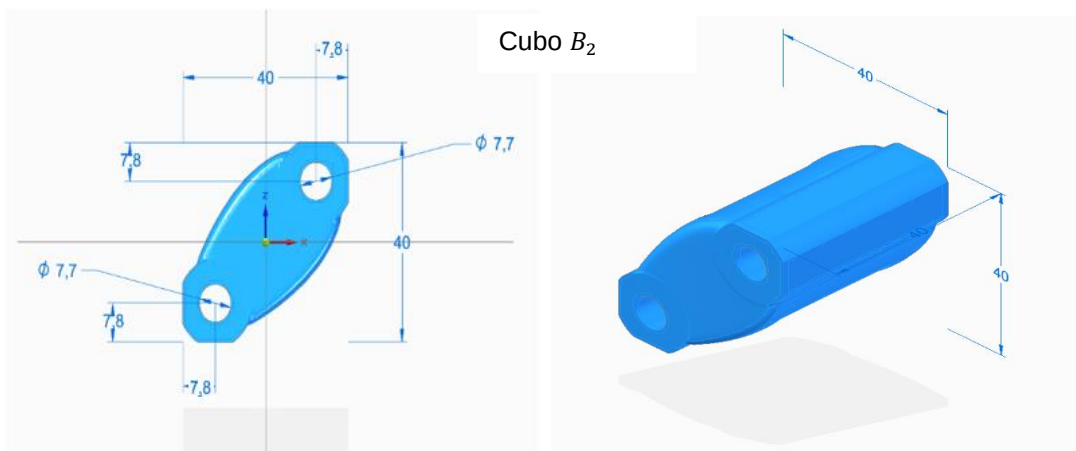


Figura 5.8 Diseño del Cubo B_2 .

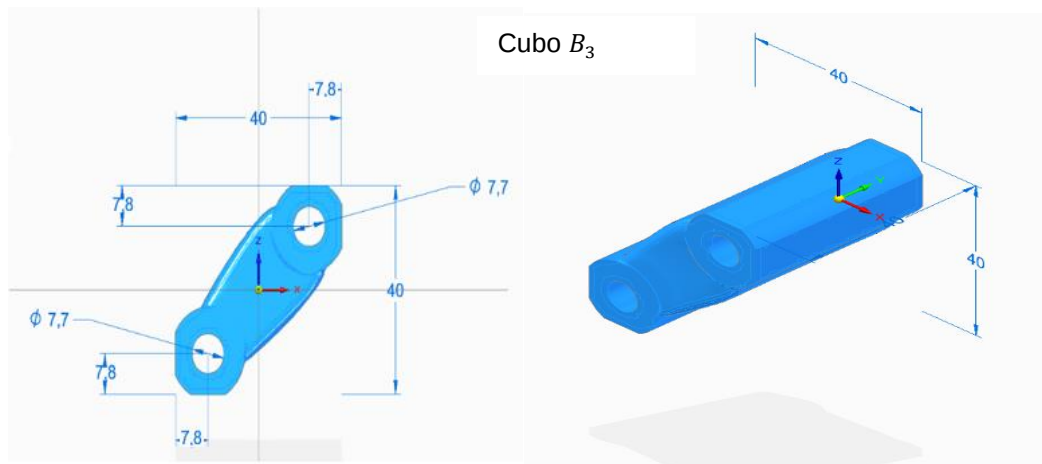


Figura 5.9 Diseño del Cubo B_3 .

5.3.1 Manufactura por Impresión 3D

Ya optimizadas las piezas " B_1 ", " B_2 ", y " B_3 " mediante la técnica de Diseño Generativo, se manufacturaron en la impresora 3D Makermex exactamente con los mismos parámetros de impresión que se muestran en la Figura 5. 5

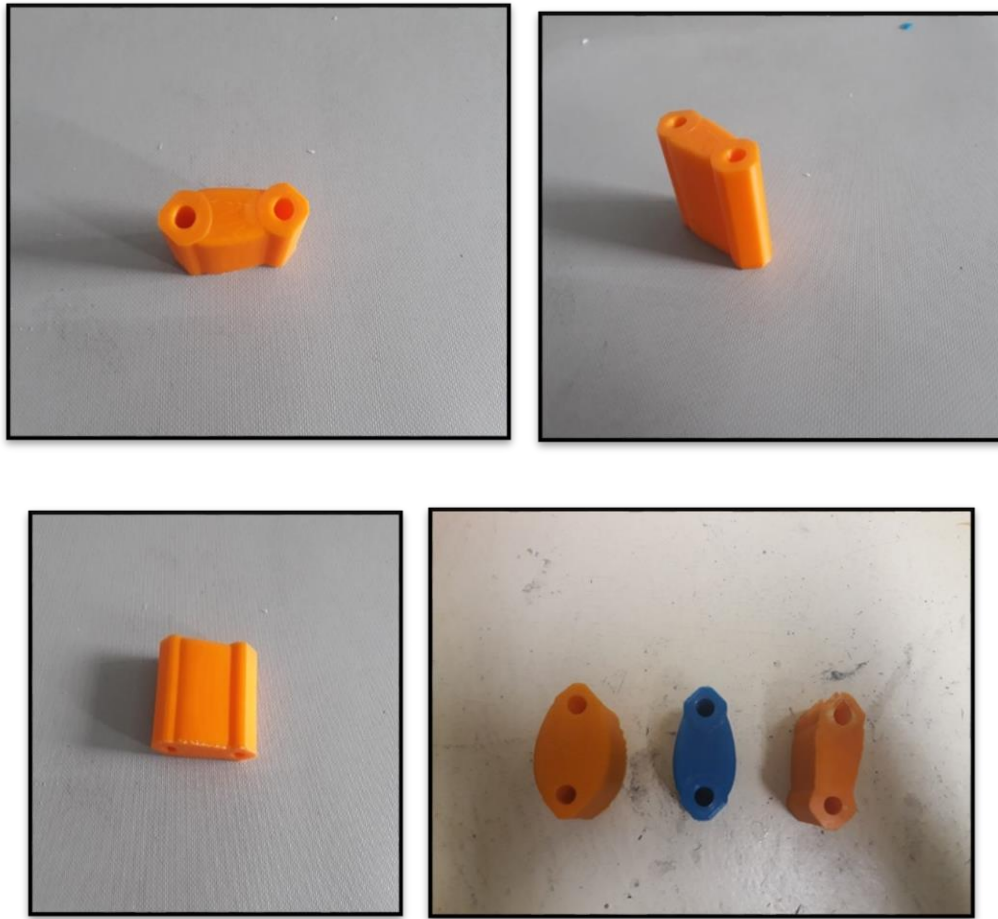


Figura 5.10 Cubos “ B_1 ”, “ B_2 ”, y “ B_3 ” Impresos.

5.3.2 Pruebas de tensión a prototipos 30% (B_1), 40% (B_2) y 50% (B_3) de ahorro de material

Obtenidas estas piezas, se procedió a hacerles las pruebas mecánicas de tensión como se muestra en la figura de abajo y posteriormente comparar los resultados con respecto a los cubos A; B y C.

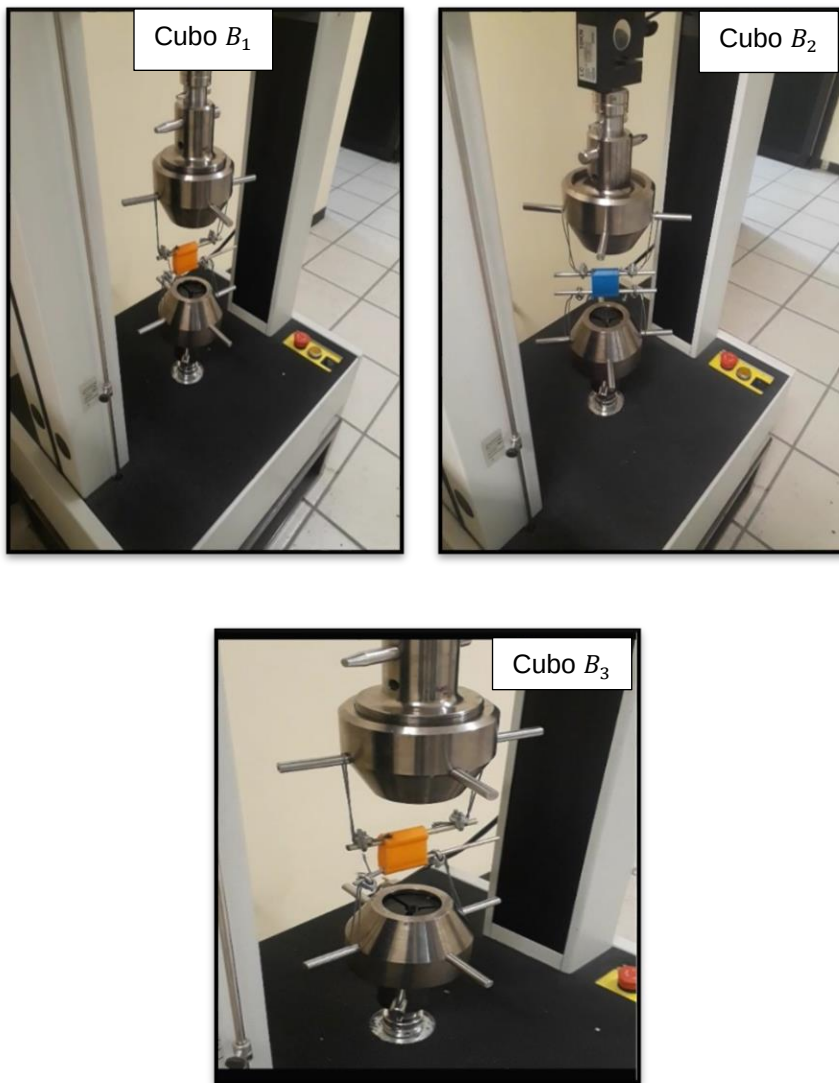


Figura 5.11. Realización de Pruebas mecánicas de tensión en laboratorios de la UPAEP.

5.4 Manufactura de probetas normalizadas por Impresión 3D y moldeo por compresión

El moldeo es el procedimiento más común para conformar los polímeros, 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 (William D., 2007).

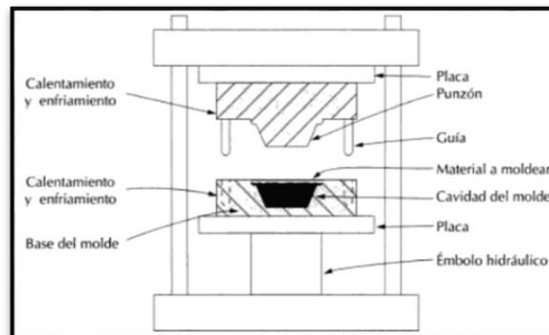


Figura 5.12. Esquema de un aparato de moldeo por compresión. (Bilmeyer W., 1984)

En la figura de abajo se muestran el molde que se utilizó y el plástico ABS granulado.



Figura 5. 13. Molde utilizado con el mismo diseño que el de impresión 3D y plástico granulado.

A continuación, se muestra una imagen manufacturando las probetas por moldeo de compresión, en los laboratorios de la universidad, dicho procedimiento controlando los parámetros de temperatura, presión y el tiempo.



Figura 5. 14. Manufacturando la probeta en laboratorios de la UPAEP.

El Diseño de probetas normalizadas (ISO, 2019) en el software SolidWorks fue el siguiente:

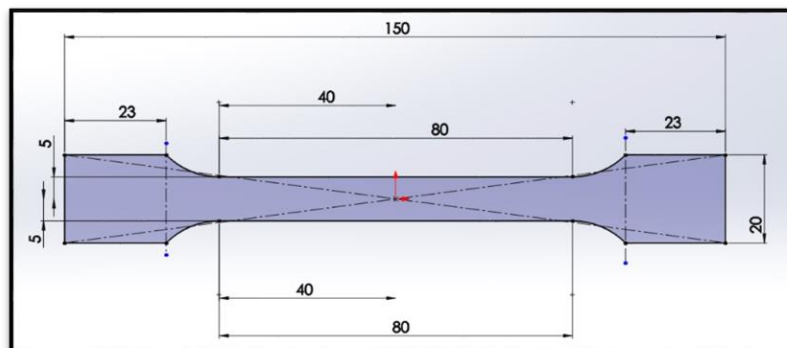


Figura 5. 15. Dimensiones de probeta normalizada.

En seguida se muestran las probetas listas para someterlas a pruebas de tensión.



Figura 5.16. Probetas manufacturadas, de color azul, por Impresión 3D y de color blanco, por moldeo de compresión.

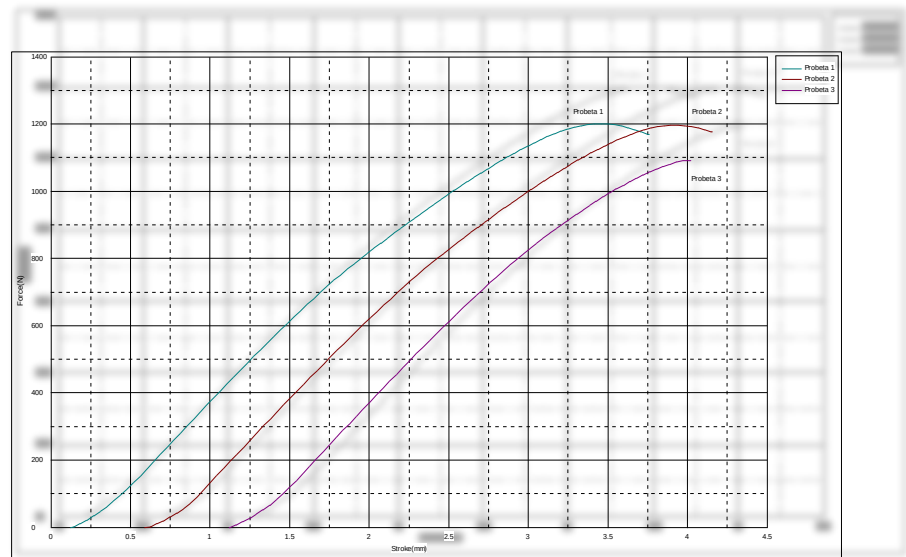
Una vez obtenidas se realizaron las pruebas de tensión en el Centro de Servicios de Alta Tecnología de la UPAEP (Bretón, 2020)



Figura 5. 17. Prueba de tensión a probeta impresa en 3D.



Figura 5. 18. Prueba de tensión a probeta manufacturada por moldeo de compresión.



CAPÍTULO 6

Resultados y conclusiones

CAPÍTULO 6

Resultados y Conclusiones

6.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de los análisis de tensión de los cubos A, B, C, así mismo, los cubos “ B_1 ”, “ B_2 ”, y “ B_3 ”. Además, se muestran los resultados de las probetas manufacturadas por impresión 3D y moldeo por compresión. Y se darán las conclusiones que se obtuvieron.

6.2 Resultados de las pruebas de tensión de los cubos A, B, y C.

Datos de las pruebas de tensión obtenidos del software Nexygen Plus (Technologies, 2019)

Tabla 6.1 Datos de prueba de tensión Tiempo-Carga del Cubo A.

Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)
0	0	30.44	1645.4	60.87	-74.367	91.31	-74.377
1.217	23.266	31.65	1528.6	62.09	-74.367	92.53	-74.377
2.435	51.59	32.87	298.61	63.31	-74.368	93.75	-74.378
3.652	108.55	34.09	203.01	64.53	-74.368	94.96	-74.378
4.87	196.11	35.31	137.34	65.74	-74.369	96.18	-74.378
6.087	313.46	36.52	115.22	66.96	-74.369	97.4	-74.379
7.305	519.49	37.74	67.045	68.18	-74.369	98.62	-74.379
8.522	699.44	38.96	68.955	69.4	-74.37	99.83	-74.38
9.74	864.78	40.18	81.712	70.61	-74.37	101.1	-74.38
10.96	974.9	41.39	-42.539	71.83	-74.371	102.3	-74.38
12.17	1069.1	42.61	-29.141	73.05	-74.371	103.5	-74.381
13.39	1157	43.83	-74.362	74.27	-74.371	104.7	-74.381
14.61	1246.6	45.05	-74.362	75.48	-74.372	105.9	-74.381
15.83	1300.8	46.26	-74.362	76.7	-74.372	107.1	-74.382
17.04	1396.9	47.48	-74.363	77.92	-74.373	108.4	-74.382
18.26	1493.7	48.7	-74.363	79.14	-74.373	109.6	-74.383
19.48	1585.4	49.92	-74.364	80.35	-74.373	110.8	-74.383
20.7	1646.1	51.13	-74.364	81.57	-74.374	112	-74.383

21.91	1645.7	52.35	-74.364	82.79	-74.374	113.2	-74.384
23.13	1644.7	53.57	-74.365	84.01	-74.374	114.4	-74.384
24.35	1675.4	54.79	-74.365	85.22	-74.375	115.7	-74.385
25.57	1654.4	56	-74.366	86.44	-74.375	116.9	-74.385
26.78	1639.8	57.22	-74.366	87.66	-74.376	118.1	-74.385
28	1659.6	58.44	-74.366	88.88	-74.376	119.3	-74.386
29.22	1643.9	59.66	-74.367	90.09	-74.376	120.5	0

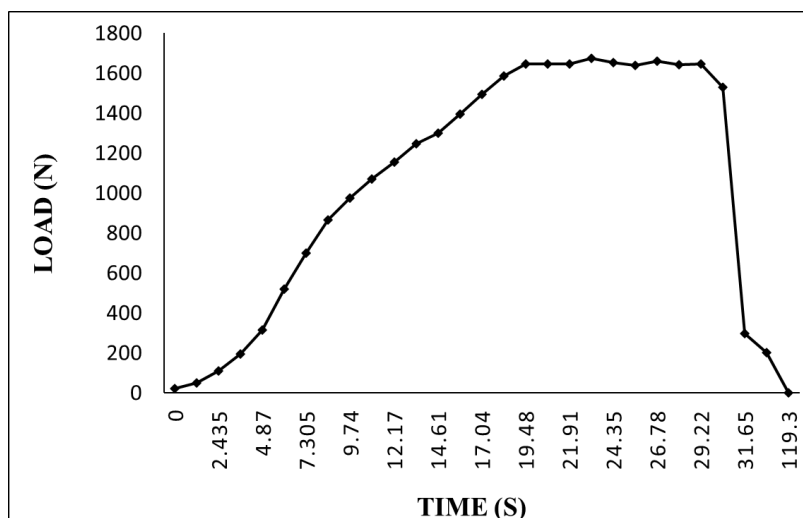


Figura 6.1. Load (N) - Time (S) del cubo A.

Tabla 6.2. Datos de prueba de tensión Tiempo-Carga del Cubo B.

Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)
0	0	30.48	1517.3	60.95	9.7639	91.43	-12.967
1.219	17.88	31.69	1566.2	62.17	9.4186	92.65	-12.967
2.438	22.576	32.91	1610.8	63.39	9.3438	93.87	-12.967
3.657	29.338	34.13	1363.7	64.61	9.2689	95.08	-12.967
4.876	38.313	35.35	1446.3	65.83	9.4075	96.3	-12.967
6.095	51.368	36.57	1214.4	67.05	11.924	97.52	-12.967
7.314	60.252	37.79	1239.6	68.27	14.441	98.74	-12.967
8.533	91.509	39.01	1285.5	69.49	18.301	99.96	-12.967
9.752	142.27	40.23	1299.5	70.7	23.657	101.2	-12.967
10.97	222.47	41.45	428.68	71.92	35.86	102.4	-12.967
12.19	358.92	42.67	51.627	73.14	54.407	103.6	-12.967
13.41	555.67	43.89	74.403	74.36	20.75	104.8	-12.967
14.63	754.74	45.1	67.957	75.58	23.669	106.1	-12.967
15.85	888.52	46.32	2.3124	76.8	30.403	107.3	-12.967
17.07	971.56	47.54	4.7654	78.02	35.441	108.5	-12.967
18.29	1033.2	48.76	7.2183	79.24	26.022	109.7	-12.967
19.5	1082.8	49.98	9.6713	80.46	-12.967	110.9	-12.967
20.72	1128.5	51.2	12.071	81.68	-12.967	112.2	-12.967
21.94	1174.2	52.42	7.9191	82.89	-12.967	113.4	-12.967
23.16	1219.8	53.64	10.019	84.11	-12.967	114.6	-12.967
24.38	1267.1	54.86	12.066	85.33	-12.967	115.8	-12.967

25.6	1315.8	56.08	14.101	86.55	-12.967	117	-12.967
26.82	1365.8	57.29	16.137	87.77	-12.967	118.2	-12.967
28.04	1416.5	58.51	14.904	88.99	-12.967	119.5	-12.967
29.26	1467	59.73	13.69	90.21	-12.967	120.7	0

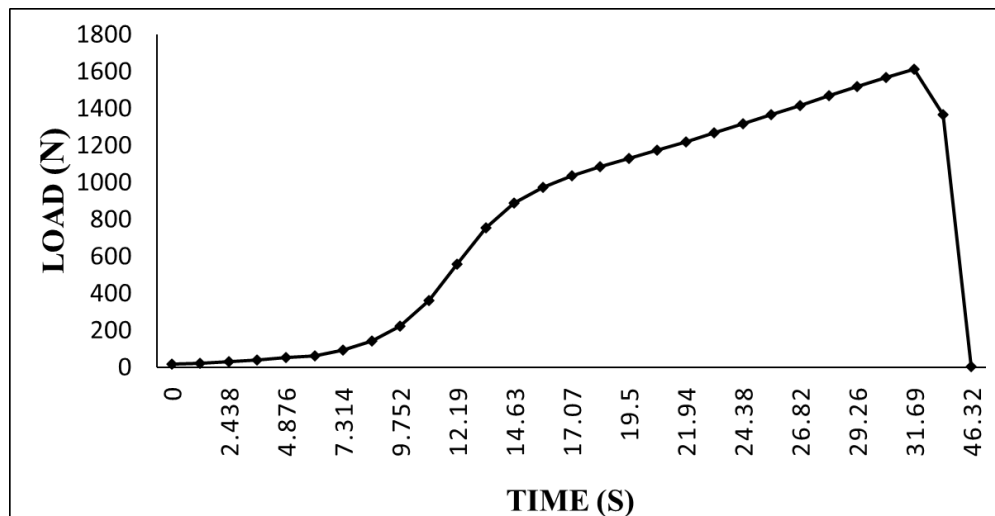


Figura 6.2. Load (N) - Time (S) del cubo B.

Tabla 6.3 Datos de prueba de tensión Tiempo-Carga del Cubo C.

Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)
0	0	30.43	186.88	60.87	-14.272	91.3	-14.399
1.217	22.608	31.65	241.88	62.09	-14.277	92.52	-14.404
2.435	31.773	32.87	308	63.3	-14.282	93.74	-14.41
3.652	41.378	34.09	383.68	64.52	-14.287	94.96	-14.415
4.87	56.178	35.3	449.53	65.74	-14.292	96.17	-14.42
6.087	47.049	36.52	471.94	66.96	-14.297	97.39	-14.425
7.304	32.115	37.74	489.34	68.17	-14.302	98.61	-14.43
8.522	27.893	38.96	613.13	69.39	-14.307	99.83	-14.435
9.739	29.013	40.17	856.34	70.61	-14.313	101	-14.44
10.96	21.75	41.39	1100	71.83	-14.318	102.3	-14.445
12.17	19.583	42.61	1309.2	73.04	-14.323	103.5	-14.45
13.39	18.686	43.83	1445.6	74.26	-14.328	104.7	-14.455
14.61	20.896	45.04	1505.3	75.48	-14.333	105.9	-14.461
15.83	22.793	46.26	1532.1	76.7	-14.338	107.1	-14.466
17.04	24.69	47.48	1547.7	77.91	-14.343	108.3	-14.471
18.26	29.746	48.7	1572.3	79.13	-14.348	109.6	-14.476
19.48	34.837	49.91	1591	80.35	-14.353	110.8	-14.481
20.7	39.928	51.13	1613.2	81.57	-14.359	112	-14.486
21.91	45.019	52.35	1651.2	82.78	-14.364	113.2	-14.491
23.13	54.366	53.57	1682	84	-14.369	114.4	-14.496
24.35	61.901	54.78	1701.5	85.22	-14.374	115.7	-14.501
25.57	73.139	56	1703.5	86.43	-14.379	116.9	-14.507
26.78	87.779	57.22	-13.297	87.65	-14.384	118.1	-14.512
28	108.45	58.43	-14.262	88.87	-14.389	119.3	-14.517

29.22	142.03	59.65	-14.267	90.09	-14.394	120.5	0
-------	--------	-------	---------	-------	---------	-------	---

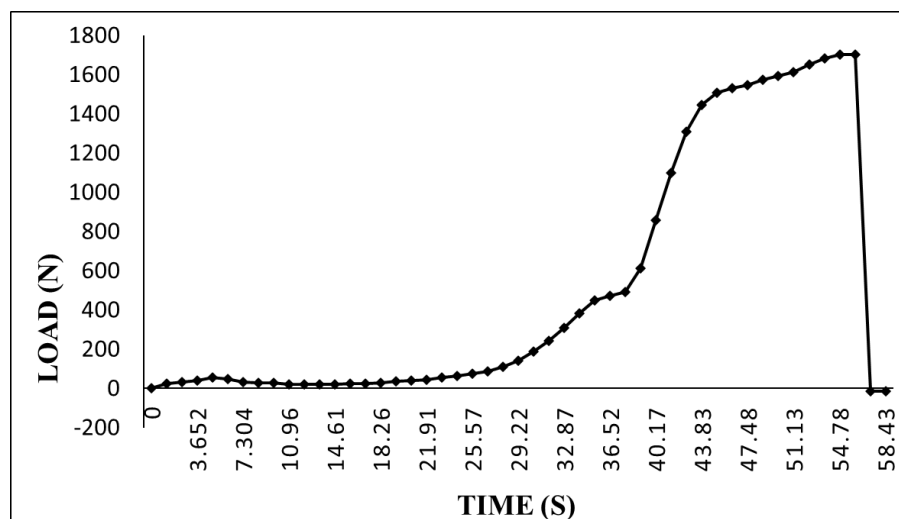


Figura 6.3 Load (N) - Time (S) del cubo C.

6.3 Datos de las pruebas de tensión obtenidos del software Nexygen Plus para los cubos B_1 , B_2 , y B_3 .

Tabla 6.4 Datos de prueba de tensión Tiempo-Carga del Cubo B_1 .

Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)
0	0	30.43	1072.5	60.86	130.75	91.3	103.33
1.217	1.0498	31.65	1433.6	62.08	121	92.51	118.26
2.435	2.1012	32.87	1575	63.3	122.64	93.73	133.96
3.652	3.1527	34.08	1578.6	64.52	124.93	94.95	172.54
4.869	4.2041	35.3	1414	65.73	126.97	96.17	240.22
6.086	5.2556	36.52	405.42	66.95	129.28	97.38	307.78
7.304	6.307	37.74	419.83	68.17	127.22	98.6	365.58
8.521	7.3585	38.95	162.47	69.39	124.08	99.82	-3.7345
9.738	8.4347	40.17	314.59	70.6	123.48	101	-3.7449
10.96	10.482	41.39	474.82	71.82	104.44	102.3	-3.7553
12.17	12.528	42.61	614.77	73.04	105.97	103.5	-3.7657
13.39	14.575	43.82	709.5	74.25	86.93	104.7	-3.7761
14.61	16.622	45.04	803.01	75.47	76.462	105.9	-3.7865
15.82	20.203	46.26	841.19	76.69	75.309	107.1	-3.7969
17.04	24.022	47.47	271.09	77.91	73.252	108.3	-3.8074
18.26	27.841	48.69	308.38	79.12	74.338	109.6	-3.8178
19.48	35.578	49.91	318.6	80.34	77.483	110.8	-3.8282
20.69	44.035	51.13	268.98	81.56	80.748	112	-3.8386
21.91	59.109	52.34	210.52	82.78	81.572	113.2	-3.849

23.13	68.602	53.56	219.74	83.99	59.442	114.4	-3.8594
24.35	97.041	54.78	224.16	85.21	58.476	115.6	-3.8698
25.56	145.07	56	225.89	86.43	55.805	116.9	-3.8802
26.78	234.72	57.21	231.5	87.64	47.079	118.1	-3.8907
28	406.02	58.43	227.52	88.86	49.851	119.3	-3.9011
29.21	695.59	59.65	129.91	90.08	80.021	120.5	-3.9011

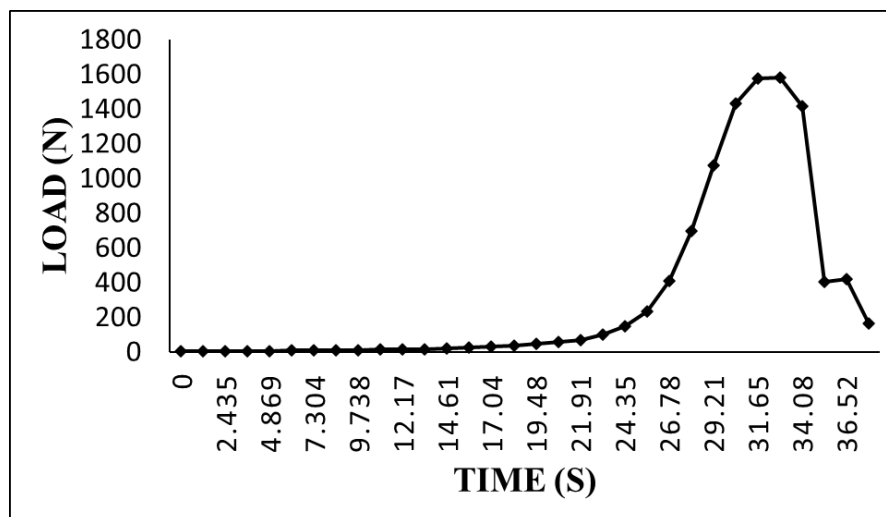


Figura 6.4 Load (N) - Time (S) del cubo B_1 con una reducción de material en un 30%.

Tabla 6.5 Datos de prueba de tensión Tiempo-Carga del Cubo B_2 .

Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)
0	0	11.8	16.458	23.59	103.69	35.39	1860.3
0.4719	5.1551	12.27	17.204	24.07	117.34	35.86	1888.5
0.9437	5.3519	12.74	17.951	24.54	132.92	36.33	1913.7
1.416	5.5487	13.21	18.89	25.01	152.31	36.81	1937.2
1.887	5.7456	13.68	20.191	25.48	175.79	37.28	1065
2.359	5.9424	14.16	21.491	25.95	206.04	37.75	1281.9
2.831	6.2489	14.63	22.792	26.42	242.73	38.22	944.06
3.303	6.6092	15.1	24.092	26.9	289.15	38.69	1127.9
3.775	6.9696	15.57	25.393	27.37	350.81	39.16	1285.7
4.247	7.33	16.04	26.694	27.84	426.59	39.64	675.78
4.719	7.6903	16.52	27.994	28.31	516.29	40.11	131.36
5.191	8.0507	16.99	31.357	28.78	623.54	40.58	176.93
5.662	8.411	17.46	33.763	29.26	748.75	41.05	238.98
6.134	8.7714	17.93	36.169	29.73	882.89	41.52	299.64
6.606	9.1317	18.4	38.575	30.2	1020	42	363.84
7.078	9.4921	18.87	40.981	30.67	1153.1	42.47	428.87
7.55	9.8524	19.35	45.072	31.14	1273.7	42.94	493.91

8.022	10.488	19.82	49.593	31.62	1379.9	43.41	558.98
8.494	11.235	20.29	54.114	32.09	1472.5	43.88	624.77
8.965	11.981	20.76	58.963	32.56	1556.5	44.36	690.56
9.437	12.727	21.23	65.908	33.03	1627.8	44.83	753.6
9.909	13.473	21.71	72.852	33.5	1691.7	45.3	812.68
10.38	14.22	22.18	78.955	33.97	1743.8	45.77	864.84
10.85	14.966	22.65	83.58	34.45	1784.5	46.24	906.52
11.32	15.712	23.12	92.726	34.92	1822.6	46.71	0

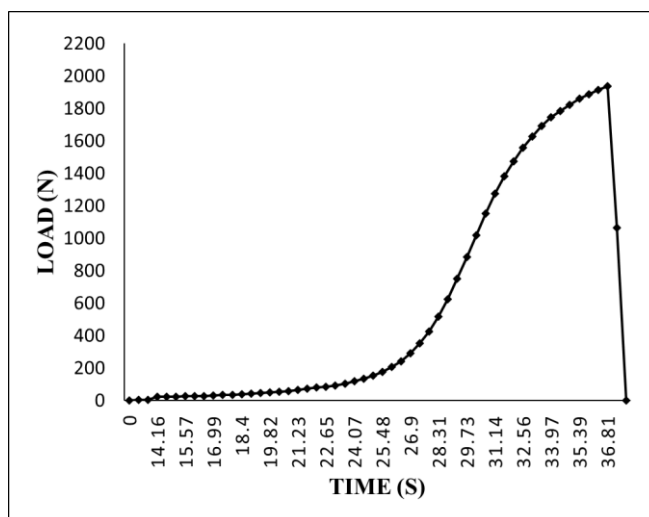


Figura 6.5 Load (N) - Time (S) del cubo B_2 con una reducción de material en un 40%.

Tabla 6.6 Datos de prueba de tensión Tiempo-Carga del Cubo B_3 .

Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)	Time (s)	Load (N)
0	0	30.44	1398.9	60.88	0.68121	91.33	-0.074726
1.218	26.588	31.66	1469.2	62.1	0.65097	92.54	-0.10496
2.435	36.423	32.88	1446.1	63.32	0.62073	93.76	-0.1352
3.653	47.286	34.1	1473.4	64.54	0.59049	94.98	-0.16544
4.871	60.719	35.31	1447.9	65.75	0.56026	96.2	-0.19568
6.088	83.984	36.53	1449.9	66.97	0.53002	97.41	-0.22591
7.306	113.07	37.75	1489.6	68.19	0.49978	98.63	-0.24391
8.524	156.1	38.97	1533.7	69.41	0.46954	99.85	-0.25671
9.741	226.93	40.18	1573.4	70.63	0.43931	101.1	-0.2695
10.96	318.35	41.4	1609.8	71.84	0.40907	102.3	-0.2823
12.18	422.56	42.62	1642.7	73.06	0.37883	103.5	-0.29509
13.39	553.83	43.84	1592.7	74.28	0.3486	104.7	-0.30789
14.61	699.19	45.05	1621.9	75.5	0.31836	105.9	-0.32068
15.83	847.24	46.27	1648.5	76.71	0.28812	107.2	-0.33348
17.05	919.31	47.49	1679.4	77.93	0.25788	108.4	-0.34627
18.27	961.74	48.71	1708.8	79.15	0.22765	109.6	-0.35907
19.48	976.62	49.93	1740.2	80.37	0.19741	110.8	-0.37186
20.7	972.95	51.14	1775.4	81.58	0.16717	112	-0.38465
21.92	1004.7	52.36	1749.9	82.8	0.13693	113.2	-0.39745

23.14	1069.5	53.58	36.909	84.02	0.1067	114.5	-0.41024
24.35	1144.3	54.8	47.178	85.24	0.07646	115.7	-0.42304
25.57	1219.4	56.01	63.486	86.46	0.046223	116.9	-0.43583
26.79	1292.8	57.23	1.464	87.67	0.015985	118.1	-0.44863
28.01	1231.3	58.45	0.76338	88.89	-0.014252	119.3	-0.46142
29.22	1322	59.67	0.71144	90.11	-0.044489	120.6	-0.47422

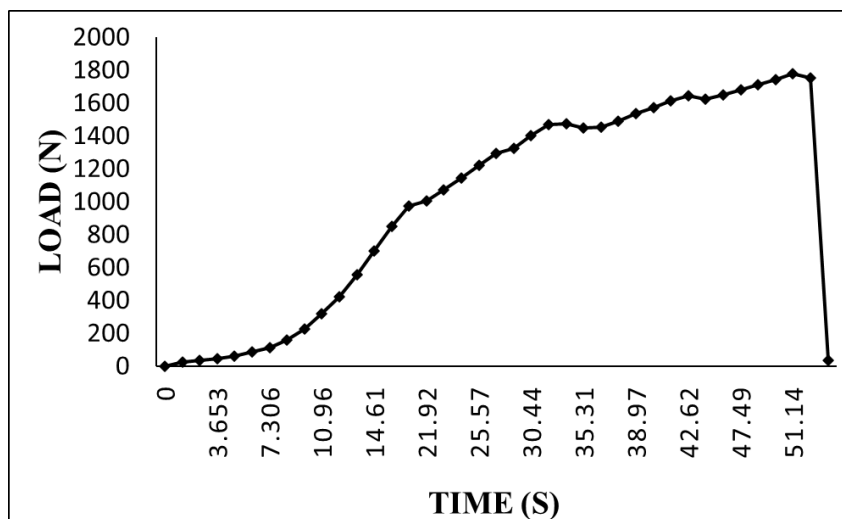


Figura 6.6 Load (N) - Time (S) del cubo B_3 con una reducción de material en un 50%.

6.4 Datos de las pruebas de tensión obtenidos del software Nexygen Plus para las probetas manufacturadas por moldeo de compresión

Tabla 6.7 Datos de prueba de tensión de probeta manufacturada por moldeo de compresión.

Prueba	Tensión	Espécimen	Espesor	Ancho	Longitud	De	Prueba			
ID Prueba	PMU.185.19	Probeta 1	4.58	10.06	50.00					
Fecha	2019.12.02	Probeta 2	4.63	10.11	50.00					
Temperatura										
Humedad	49									
Material										
Cotización										
Velocidad	50 mm/min									
	Name	Max_Force	Max_Stress	YP_Force	YP_Stress	YP_Strain	Break_Force	Break_Stress	Break_Strain	Elastic
	Parameter			3 Points	3 Points	3 Points				3 MPa - 20 MPa
Descartar	Pass/Fail Units	N	MPa	N	MPa	%	N	MPa	%	MPa
	Probeta 1	1253.2	27.2	--	--	--	1253.2	27.2	1.1	1766.3
	Probeta 2	1261.5	26.9	--	--	--	1261.5	26.9	1.7	1768.2
				--	--	--				
	Promedio	1257.3	27.1	--	--	--	1257.3	27.1	1.4	1767.2
	Desviación	5.90	0.18	--	--	--	5.90	0.18	0.42	1.31

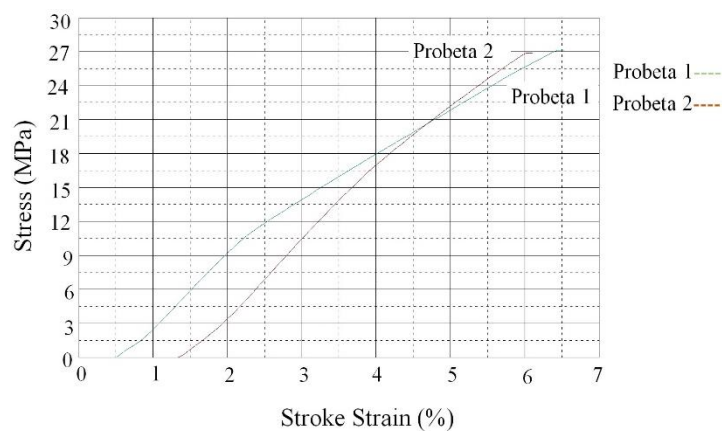


Figura 6.7 Load (N)- Stroke (mm) probeta manufacturada por moldeo de compresión.

6.5 Datos de las pruebas de tensión obtenidos del software Nexygen Plus para las probetas impresas en 3D

Tabla 6.8 Datos de prueba de tensión de probeta impresa en 3D.

Prueba	Tensión	Espéimen	Espesor	Ancho	Longitud	de	Prueba			
Prueba	PMU.184.19	Probeta 1	3.91	10.41	50.00					
ID Prueba	2019.12.02	Probeta 2	3.87	10.42	50.00					
Fecha	21.5	Probeta 3	3.75	10.75	50.00					
Temperatura	48									
Humedad										
Material										
Cotización	50 mm/min									
Velocidad										
	Name	Max_Force	Max_Str ess	YP_Force	YP_Stres s	YP_Str ain	Br ak_ For ce	Break_For ce	Break_S train	Elastic
	Parameter			3 Points	3 Points	3 Points				4 MPa - 20 MPa
	Pass/Fail Units	N	MPa	N	MPa	%	N	N	%	MPa
Descartar	Probeta 1	1201.5	29.5	1201.5	29.5	2.0	117 1.5	1253.2	2.7	1758.1
	Probeta 2	1198.0	29.7	1198.0	29.7	2.0	117 8.6	1261.5	1.4	1789.0
	Probeta 3	1093.1	27.1	-.-	-.-	-.-	109 3.1		1.9	1776.5
	Promedio	1164.2	28.8	1199.7	29.6	2.0	114 7.7	1257.3	2.0	1774.5
	Desviación	61.61	1.45	2.51	0.13	0.00	47. 46	5.9	0.66	15.54

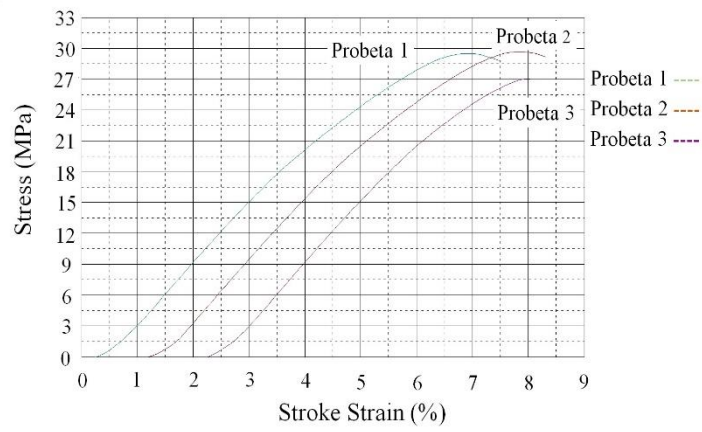


Figura 6.8. Load (N)- Stroke (mm) probeta impresas en 3D.

6.6 Conclusiones

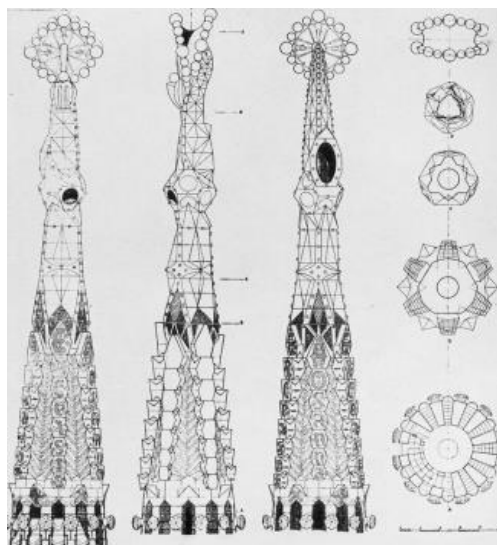
El diseño generativo se está convirtiendo en una herramienta clave para el diseño industrial, proporcionando un amplio número de beneficios, uno de los más importantes, es la gran capacidad que te ofrece para la automatización en los procesos de diseño, pero además te ofrece un estilo estético único 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 (Lobos, 2018).

En base a los resultados obtenidos, mismos que se observan en la tabla de abajo, 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 estos cubos, con la ventaja que se obtiene un ahorro del 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..

Diseño Clásico	Resultado
CUBO A	1645.4 N
CUBO B	1610.8 N
CUBO C	1703..5 N
Diseño Generativo	
CUBO B_1	1578.6 N
CUBO B_2	1937.2 N
CUBO B_3	1749.9 N

Por otra parte, en base a los resultados obtenidos, el promedio de esfuerzos máximos que soportaron las probetas manufacturadas por moldeo de compresión fue de 27.1 Mpa, mientras que el promedio de esfuerzos máximos de las probetas manufacturadas por impresión 3D fue de 29.7 Mpa. Por lo tanto, si lo que se busca es resistencia a la ruptura en esfuerzos de tensión, las probetas manufacturadas por impresión 3D ofrecerán mayor resistencia.



Arte generativo. El templo de la sagrada Familia por A. Gaudí
(Colabella , 2018)

Anexos

Anexo 1. Carta de aceptación del artículo.



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

"2020, Año de Leonor Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Orizaba, Veracruz, **18 / SEPTIEMBRE / 2020**

ASUNTO: **CARTA DE ACEPTACIÓN** (284)

**CRISTIAN ELIUD ROBLES GINES, PRUDENCIO FIDEL PACHECO GARCÍA AND SAMANTHA SAN BASILIO GUILLÉN
PRESENTE:**

Por este conducto le informamos que el comité de arbitraje ha aceptado su artículo titulado "Optimización de piezas mecánicas mediante el análisis de componentes por técnicas de Diseño Generativo" para ser publicado en la revista electrónica "Coloquio de investigación multidisciplinaria" (ISSN 2007-8102), indexada en Latindex <https://www.latindex.org/latindex/ficha?folio=25414>

Para que su trabajo in extenso sea publicado en la revista electrónica del Coloquio de Investigación Multidisciplinaria CIM-Orizaba-2020, evento internacional, será necesario el envío, al coordinador de facturación, de una carta de responsabilidad firmada por todos los autores del artículo y el pago de la cuota de recuperación, a más tardar el 1 de octubre de 2020, enviando su ficha de pago, con sus datos al correo electrónico que se notificara en breve.

ATENTAMENTE
*Experiencia en Educación Tecnológica -
CIENCIA - TECNOLOGÍA - CULTURA*

DR. OSCAR AGUILAR SANDOVAL SANDOVAL
RESPONSABLE DEL ÁREA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA
COLOQUIO DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA
Evento Internacional CIM-Orizaba-2020



Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320
Orizaba, Veracruz, México.
Tel. 01 (272) 7 24 40 96, Fax. 01 (272) 7 25 17 28
e-mail: cyd_orizaba@tecnm.mx
www.orizaba.tecnm.mx



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

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 geoméricamente 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.

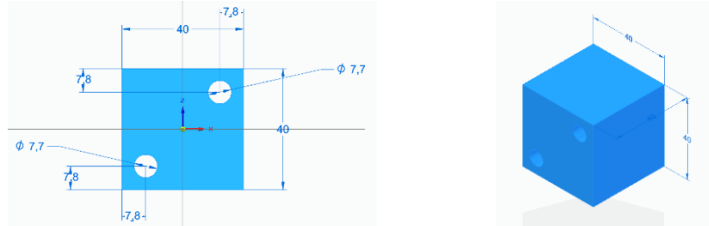


Figura 2. Cubo “B”- Dimensiones Alto: 40 mm Ancho: 40 mm Profundo: 40 mm.

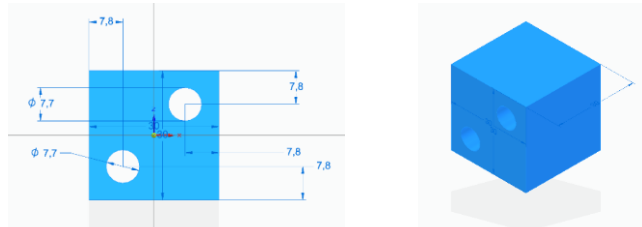


Figura 3. Cubo “C”- Dimensiones Alto: 30 mm Ancho: 30 mm Profundo: 30 mm.

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

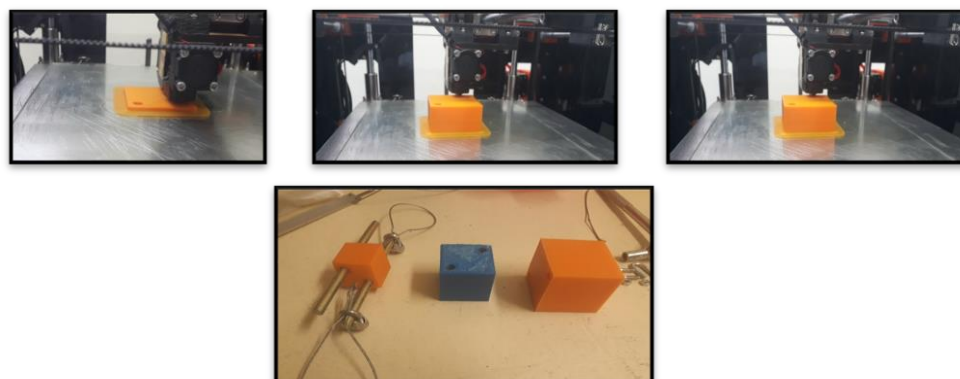


Figura 4. Cubos “A, B, y C”- Impresos.

Pruebas de Tensión a cubos iniciales

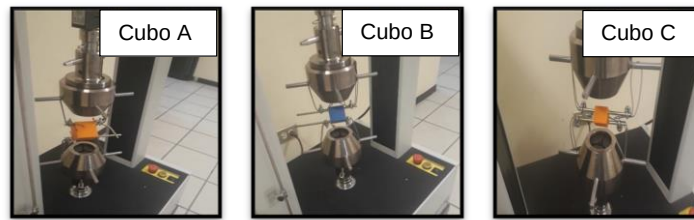


Figura 5. Realización de Pruebas mecánicas de tensión en laboratorios de la UPAEP.

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:

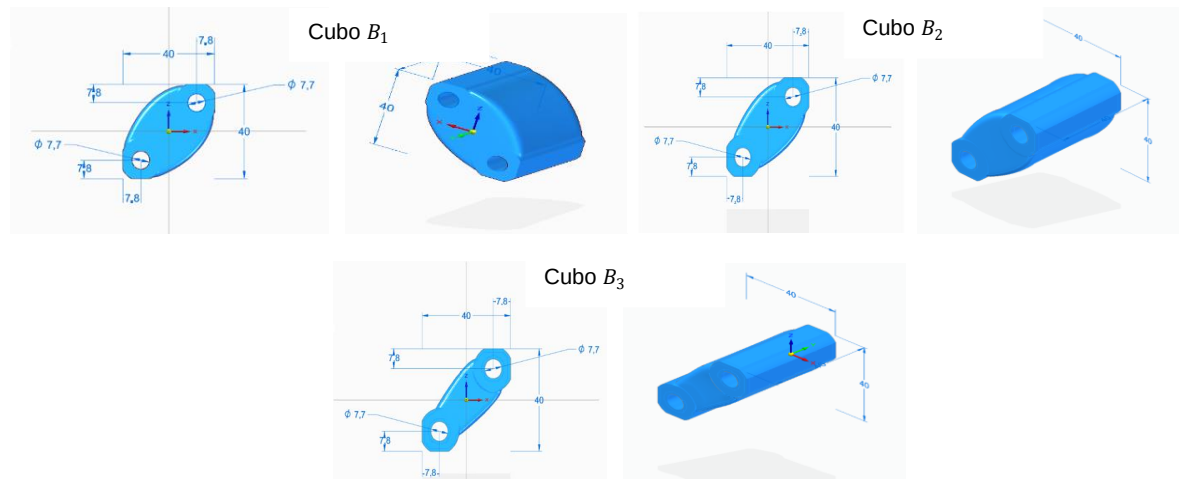


Figura 6. Diseño de Cubos B_1 , B_2 y B_3 .

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.

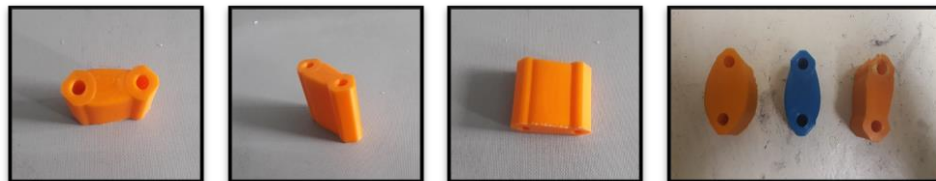


Figura 7. Cubos B_1 , B_2 y B_3 impresos.

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:

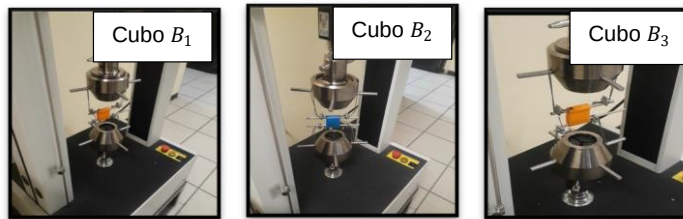


Figura 8. Realización de Pruebas mecánicas de tensión en laboratorios de la UPAEP.

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]

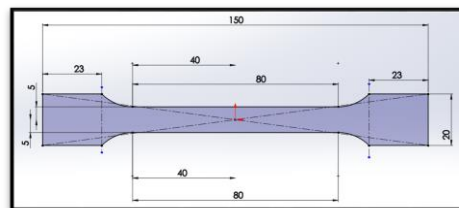


Figura 10. Dimensiones de probeta normalizada [13].

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

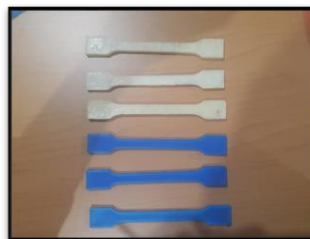


Figura 11. Probetas manufacturadas de color azul, por Impresión 3D y de color blanco, por moldeo de compresión. Una vez obtenidas se les realizaron las pruebas de tensión en el laboratorio del CESAT (Centro de Servicios de Alta Tecnología) de la UPAEP.

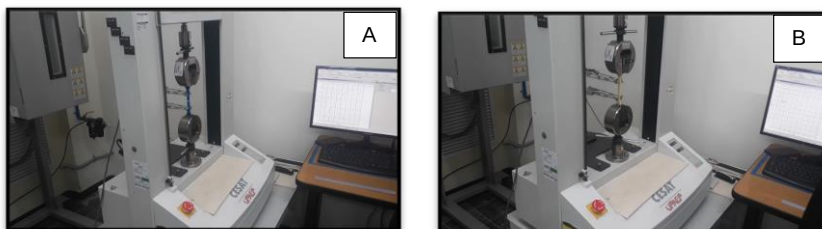


Figura 12. (A) Prueba de tensión a probeta impresa en 3D y (B). Prueba de tensión a probeta manufacturado por moldeo de compresión.

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

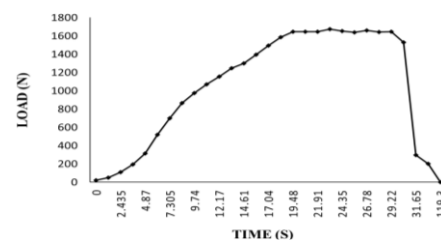
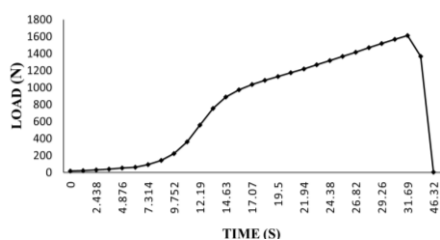


Figura 13. Load (N) - Time (S) del cubo A.



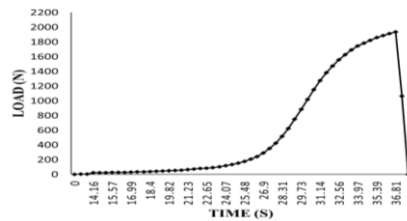


Figura 17. Load (N) - Time (S) del cubo B_2 con una reducción de material en un 40 %.

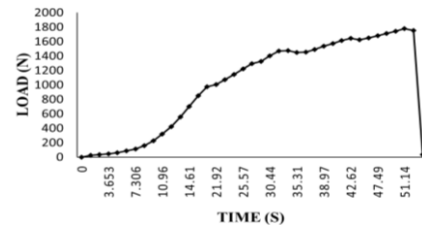


Figura 18. Load (N) - Time (S) del cubo B_3 con una reducción de material en un 50 %.

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

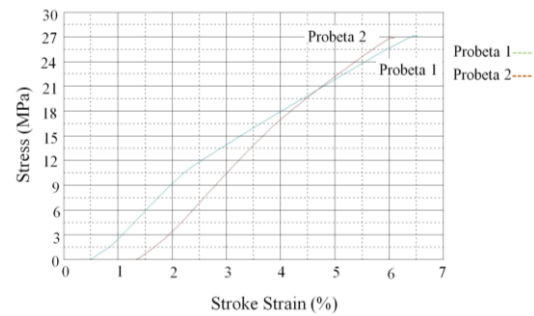


Figura 19. Load (N)- Stroke Strain (%) probeta manufacturada por moldeo de compresión.

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

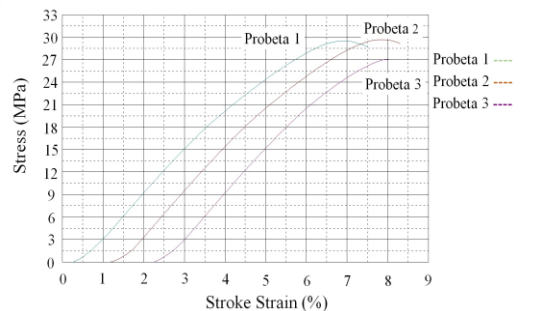


Figura 20. Load (N)- Stroke Strain (%) probeta impresas en 3D.

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*, nº 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] S.-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/>.

Anexo 3. Tablas de propiedades de materiales.

Tabla A. Pesos y Densidad Específica.

Material	Peso específico γ		Densidad específica ρ	
	lb/ft ³	kN/m ³	slugs/ft ³	kg/m ³
Acero	490	77.0	15.2	7850
Agua, dulce de mar	62.4 63.8	9.81 10.0	1.94 1.98	1000 1020
Aleaciones de aluminio 2014-T6, 7075-T6 6061-T6	160–180 175 170	26–28 28 26	5.2–5.4 5.4 5.2	2 600–2 800 2800 2700
Aleaciones de magnesio	75–135	12–21	2.3–4.2	1 200–2 200
Arena, suelo, grava	110–114	17–18	3.4–3.5	1 760–1 830
Bronce	510–550	80–86	16–17	8 200–8 800
Caucho	60–80	9–13	1.9–2.5	960–1 300
Cobre	556	87	17	8 900
Concreto Simple Reforzado De peso ligero	145 150 70–115	23 24 11–18	4.5 4.7 2.2–3.6	2 300 2 400 1 100–1 800
Fundición gris	435–460	68–72	13–14	7 000–7 400
Latón	520–540	82–85	16–17	8 400–8 600
Madera (secada al aire) Abeto Douglas Roble Pino del sur	30–35 40–45 35–40	4.7–5.5 6.3–7.1 5.5–6.3	0.9–1.1 1.2–1.4 1.1–1.2	480–560 640–720 560–640
Monel (67% Ni, 30% Cu)	550	87	17	8 800
Níquel	550	87	17	8 800
Plásticos Nailon Polietileno	55–70 60–90	8.6–11 9.4–14	1.7–2.2 1.9–2.8	880–1 100 960–1 400
Roca Granito, mármol, cuarzo Caliza, arenisca	165–180 125–180	26–28 20–28	5.1–5.6 3.9–5.6	2 600–2 900 2 000–2 900
Titanio	280	44	8.7	4 500
Tungsteno	1 200	190	37	1 900
Vidrio	150–180	24–28	4.7–5.4	2 400–2 800

Tabla B Módulos de elasticidad y relaciones de Poisson.

Material	Módulo de elasticidad E		Módulo de elasticidad G		Relación de Poisson ν
	ksi	GPa	ksi	GPa	
Acero	28,000–30,000	190–210	10,800–11,800	75–80	0.27–0.30
Aleaciones de aluminio	10,000–1,400	70–79	3800–4300	26–30	0.33
2014-T6	10,600	73	4000	28	0.33
6061-T6	10,000	70	3800	26	0.33
7075-T6	10,400	72	3900	27	0.33
Aleaciones de magnesio	15,000–17,000	100–120	5600–6400	39–44	0.33
Aleaciones de titanio	6000–6500	41–45	2200–2400	15–17	0.35
Bronce	14,000–17,000	96–120	5200–6300	36–44	0.34
Concreto (compresión)	2500–4500	17–31			0.1–0.2
Cobre y aleaciones de cobre	16,000–18,000	110–120	5800–6800	40–47	0.33–0.36
Caucho	0.1–0.6	0.0007–0.004	0.03–0.2	0.0002–0.001	0.45–0.50
Fundición gris	12,000–25,000	83–170	4600–10,000	32–69	0.2–0.3
Latón	14,000–16,000	96–110	5200–6000	36–41	0.34
Madera (flexión)					
Abeto Douglas	1600–1900	11–13			
Roble	1600–1800	11–12			
Pino del sur	1600–2000	11–14			
Monel (67% Ni, 30% Cu)	25,000	170	9500	66	0.32
Níquel	30,000	210	11,400	80	0.31
Plástico					
Nailon	300–500	2.1–3.4			0.4
Polietileno	100–200	0.7–1.4			0.4
Roca (compresión)					
Granito, mármol, cuarzo	6000–14,000	40–100			0.2–0.3
Caliza, arenisca	3000–10,000	20–70			0.2–0.3
Tungsteno	50,000–55,000	340–380	21,000–23,000	140–160	0.2
Vidrio	7000–12,000	48–83	2700–5100	19–35	0.17–0.27

Tabla C. Propiedades cuantitativas del ABS.

Propiedades	Método ASTM	Unidad	Grados de ABS			
			Alto impacto	Impacto medio	Bajo Impacto	Resistente al calor
Mecánicas a 23°C						
Resistencia al impacto, prueba Izod	D2546	J / m	375-640	215-375	105-215	105-320
Resistencia a la tensión	D638	Kg. / mm²	3,3 – 4,2	4,2-4,9	4,2-5,3	4,2-5,3
elongación	D638	%	15-70	10-50	5-30	5-20
Módulo de tensión	D638		173-214	214-255	214-265	214-265
Dureza	D785	HRC (Rockwell)	88-90	95-105	105-110	105-110
Peso específico	D792		1,02-1,04	1,04-1,05	1,05-1,07	1,04-1,06
Térmicas						
Coeficiente de expansión térmica	D696	X 10 ⁵ cm / cm* °C	9,5 –11,0	7,0-8,8	7,0-8,2	6,5-9,3
Distorsión por calor	D648	°C a 18,4 Kg /cm²	93-99	96-102	96-104	102-112

Fuente: (textos-científicos, 2005)

Bibliografía

- Argyris, J. H. (1955). *Energy Theorems and Structural Analysis*. Aircraft Engineering.
- Argyris, J. H., & Kelsey, S. (1960). *Energy Theorems and Structural Analysis*. Londres: Butterworths.
- Bretón, F. (3 de 10 de 2020). *El Centro de Servicios de Alta Tecnología de la UPAEP (CESAT)*. Obtenido de <https://upress.mx/index.php/opinion/reportajes-especiales/118-el-centro-de-servicios-de-alta-tecnologia-de-la-upaep-cesat>
- Flake, G. W. (2001). The Computational Beauty of Nature. *Artificial Intelligence*, 128(1-2):243-244.
- Kelzer, K. (23 de 05 de 2018). *Autodesk*. Obtenido de Cómo GM y Autodesk están utilizando diseño generativo para vehículos del futuro: <https://blogs.autodesk.com/latam/2018/05/23/como-gm-y-autodesk-estan-utilizando-diseno-generativo-para-vehiculos-del-futuro/>
- Rodriguez , D. (2001). *Obtención de capas de nitruro de titanio mediante tratamiento termoquímico en titanio y Ti6Al4V y caracterización de sus propiedades para aplicaciones biomédicas*. Barcelona: Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, R. H., & Topp, L. J. (1956). *Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures*. Journal of Aeronautical Sciences, vol. 23, núm. 9, pp. 805-824.
- Agkathidis, A. (2016). Generative Design: Form-finding techniques in Architecture. *Laurence King Publishing*, 10-14.
- Baudrillard, J. (1996). *il delitto perfetto. La televisione ha ucciso la realtà?* . Milán : Raffaello Cortina Editore.
- Bilmeyer W., F. (1984). *Text book of Polymer Science*. New York: Wiley Interscience.
- Boden, M., & Edmonds, E. (2009). What is Generative Art? *Digital Creativity*, 20 (1-2): 21-46.
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de shigley*. México, D. F.: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Clough, R. W. (1960). *The Finite Element Method in Plane Stress Analysis*. Pittsburgh, PA,: Proceedings of the Second Conference on Electronic Computation, American Society of Civil Engineers.
- Colabella , E. (2018). Generative Art MetaLanguage. *GA2018 – XXI Generative Art Conference*, 139.
- Courant, R. (1943). *Variational Methods for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibrations*. Bulletin of the American Mathematical Society vol. 49, pp. 1-23,.
- Cristopher, A. (1964). *Notes on the Synthesis of Form*. Cambridge: Harvard University Press.
- D'Arcy Wentworth , T. (1917). *On Growth and Form*. London: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.
- Forrai, M. (2016). 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*, 147-150.
- Frazer , J., Liu , X., Tang , M., & Janssen, P. (11-13 de December de 2002). Generative and Evolutionary Techniques for Building Envelope Design In: Soddu, C. (ed) *Generative Art 2002: 5th International Generative Art Conference*.
- Gere, J., & Goodno, B. (2009). *MECÁNICA DE MATERIALES*. México D.F.: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.
- Gómez Gonzalez , S. (2013). *Solidworks Simulation*. Mexico D.F.: Alfaomega Grupo Editor.

- Gómez Gonzalez, S. (2013). *Solidworks Simulation*. Mexico D.F.: Alfaomega Grupo Editor.
- González, R. J., & et al. (2008). Caracterización mediante FTIR y DSC de la interacción Colágeno Hidroxiapatita. *IFMBE Proceedings*, vol 18, part 20, pp 1246-1249.
- Hrennikoff, A. (1941). *Solution of Problems in Elasticity by the Frame Work Method*. Journal of Applied Mechanics, vol. 8, núm. 4, pp. 169-175.
- ISO, 5.-1. (2019). *Plastics — Determination of tensile properties— Part 1: General principles*. ISO/TC 61/SC 2 Mechanical behavior.
- Krish, S. (2011). A practical generative design method. *Computer-Aided Design* 43, 88-100.
- Krish, S. (2011). A practical generative design method. *Computer-Aided Design* (43), 88-100.
- Kurowsky, P. (1994). *Avoding pitfalls in FEA*. MACHINE DESIGN.
- Kurzweil, R. (2005). *The Singularity is near*. New York: Viking Books.
- Levy, S. (Julio 1953). *Structural Analysis and Influence Coefficients for Delta Wings*. Journal of Aeronautical Sciences, vol.20, núm. 7, pp. 449-454,.
- Lobos, A. (August de 2018). Finding Balance in Generative Product Design. *In Proceedings of Norddesign Conference: Design in the era of digitalization*, 14-17.
- Lobos, A. (2019). Applying Generative Systems to Product Design. *XXII Generative Art Conference - GA2019*, 1-9.
- MakerMex. (01 de 01 de 2014). *Impresora 3D modular MM1*. Obtenido de <http://makerMex.com/shop/product/impresora-3d-modular-mm1-1?category=1>
- Marbledarts. (17 de 07 de 2017). *Il tempo e la sua Arte...L'Arte e la sua libertà...* Obtenido de <https://www.marbledarts.com/>
- McHenry, D. (1943). *A Lattice Analogy for the Solution of Plane Stress Problems*. Journal of Institution of Civil Engineers, vol.21, pp. 59-82,.
- Newmark, N. M. (1949). *Numerical Methods of Analysis in Bars, Plates, and Elastic Bodies*. Macmillan: Numerical Methods in Analysis in Engineering (ed. L. E. Grinter).
- RAI. (28 de 04 de 2020). *Principio de Saint Venant*. Obtenido de Real Academia de Ingeniería: <http://diccionario.raing.es/es/lema/principio-de-saint-venant>
- Raja, V., & Fernandez, K. (2008). *Reverse Engineering*. London: Springer.
- Roncoroni, U. (2016). *Manual del Diseño Generativo*. Lima: Universidad de Lima.
- Salingaros, N. A. (2002). *Charles Jencks y el nuevo paradigma en Arquitectura*. San Antonio, TX, EE. UU.: Departamento de Matemáticas Aplicadas, Universidad de Texas.
- Siemens. (16 de 04 de 2020). *El diseño generativo aporta optimización topológica a Solid Edge*. Obtenido de <https://solidedge.siemens.com/es/solutions/products/3d-design/next-generation-design/generative-design/>
- Smith, W., & Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. México, D.F.: MCGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S. A. DE C.V.
- Systemes, D. (2012). *AYUDA DE SOLIDWORKS*. Obtenido de http://help.solidworks.com/2012/spanish/SolidWorks/cworks/prot_norm.htm

- Technologies, I. (23 de 10 de 2019). *NEXYGEN Plus 3.0*. Obtenido de <https://nexygen-plus.software.informer.com/3.0/>
- textos-cientificos. (12 de 08 de 2005). *ABS*. Obtenido de [textoscientificos: https://www.textoscientificos.com/polimeros/abs](https://www.textoscientificos.com/polimeros/abs)
- Ultimaker. (18 de 03 de 2019). *Simplify 3D printing with Ultimaker Cura 4.0*. Obtenido de <https://ultimaker.com/es/learn/simplify-3d-printing-with-ultimaker-cura-4-0>
- UNEA. (11 de 02 de 2020). *INDUSTRIA MANUFACTURERA EN MÉXICO: LO QUE DEBES SABER*. Obtenido de <https://www.unea.edu.mx/blog/index.php/industria-manufacturera-en-mexico/>
- Velasco P., M., Rodríguez Suárez, J., & Restrepo Ardilla, D. (2016). Caracterización de Propiedades Mecánicas en ABS en función de parámetros de Procesos de Manufactura Aditiva FDM. *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, 716 - 722.
- Webb, N., & Buchanan, A. (2019). Digitally aided analysis of medieval vaults in an English cathedral, using generative design tools. *International Journal of Architectural Computing*, 17(3), 241–259. doi:10.1177/1478077119866126
- William D., C. (2007). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales 2*. Barcelona: Editorial Reverté.