



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

**Estudio del consumo energético en procesos de manufactura aditiva
y su relación con propiedades mecánicas**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:
ASCENCIÓN HORACIO GUTIÉRREZ OSORIO

TUTORES:
Principal: DR. LEOPOLDO RUIZ HUERTA: Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva y Digital, Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (MADiT, ICAT, UNAM)

Cotutor: DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ: Facultad de ingeniería, Centro de Ingeniería Avanzada (FI, CIA, UNAM)

COMITÉ TUTOR:
DR. MARCELO LÓPEZ PARRA: Facultad de ingeniería, Unidad de Alta Tecnología (FI, CIA, UNAM)
DR. HÉCTOR RAFAEL SILLER CARRILLO: University of North Texas
DR. ALEX ELÍAS ZÚÑIGA: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM, Campus Monterrey)

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

El uso de imágenes, 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 donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. MARCELO LÓPEZ PARRA
Secretario: DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ
1er. Vocal: DR. LEOPOLDO RUIZ HUERTA
2do. Vocal: DR. ALEX ELÍAS ZÚÑIGA
3er. Vocal: DR. HÉCTOR RAFAEL SILLER CARRILLO

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: LABORATORIO NACIONAL DE MANUFACTURA ADITIVA Y DIGITAL (MADiT) UBICADO EN EL INSTITUTO DE CIENCIAS APLICADAS Y TECNOLOGÍA (ICAT) DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM)

TUTORES DE TESIS:



PRINCIPAL: DR. LEOPOLDO RUIZ HUERTA



COTUTOR: DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado por medio del proyecto CONACYT LN-232719, LN-271897, LN 280867, LN294415 e INFR-294752. También mediante el soporte financiero DGAPA-UNAM a través del proyecto PAPIME IN106410. Reconozco y agradezco sustancialmente el apoyo brindado para lograrlo.

AGRADECIMIENTOS

... a Dios...

... agradezco y dedico este trabajo. A Ti Creador del universo, Alfa y Omega, Principio y Fin eminentísimo de todo cuanto existe. Gracias Dios amoroso. La gloria es tuya.

... A mis padres...

... Por su infinito e incondicional amor hacia mí, confianza y cariño. Con reconocimiento, amor y respeto, gracias mamá Angelita, gracias papá Isaac.

... A mi amada esposa Arianna...

... Por tu gran amor y compañía, apoyo y dedicación, esfuerzo y carácter, tolerancia y comprensión. ¡Juntos lo hemos logrado! ¡Gracias! ¡Te amo!

... A mis hijitos...

... Arianna, Horacio y Juan Pablo, por su paciencia y tolerancia, cariño y alegría; a pesar de que en múltiples ocasiones no me dejaban concentrar para estudiar... Son el motor de mi corazón. Los amo.

... A mis hermanos...

... Porque en ustedes tengo un apoyo, en las buenas en las malas, sé que cuento con ustedes y con su cariño, en especial: Raymundo Isaac y Marcos (gracias por pasarme el Internet). También a Claudia, Lucy, Silvia, Alejandro, Feliciano, y a Héctor. Los quiero.

... A la familia de mi esposa...

... Sra. Rosa Ma. Maldonado, por confianza, respeto y cariño. Por el apoyo brindado. También a Juan, Analí y Bernardo, por su amistad sincera.

... Al Sr. Juan Palafox †, *in memomoriám*, hasta el cielo llegue mi agradecimiento sincero y respetuoso para usted.

... A los divinos doctores...

... San Agustín de Hipona y Santo Tomás de Aquino, que me han acompañado desde siempre en el estudio. Por ser mi inspiración y custodia.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente al Dr. Leopoldo Ruiz Huerta, por haberme permitido participar en sus proyectos de investigación, por su invaluable tutoría, sus clases y asesorías, rigurosas pero divertidísimas, por su tolerancia y por aportarme significativos conocimientos; pero también por ser un ser humano estupendo, de un magnífico sentido del humor, de calidad humana indiscutible y de valor inestimablemente grande. Con aprecio agradezco su invaluable apoyo en los momentos más difíciles que tuve de manera personal durante el doctorado. Siempre recordaré que “no hay viento favorable para un barco sin rumbo”. Gracias por haber sido usted en todo momento ese viento favorable aun cuando en múltiples ocasiones mi barco iba sin rumbo. Que Dios lo bendiga. De igual modo, agradezco de manera especial al Dr. Vicente Borja Ramírez, por haberme apoyado siempre, por su comprensión y enorme calidad humana, por sus conocimientos y personalidad ejemplar, y por haber brindado invaluable aportaciones en el proyecto doctoral. Mil gracias.

Agradezco al Dr. Alberto Caballero Ruiz, que me transmitió siempre ese ánimo y buena vibra para sacar adelante el doctorado, siempre sus consejos fueron atinados y aportaron mucho en el proyecto.

A la Dra. Yara Cecilia Almanza, por haberme tendido siempre una mano amiga y por sus amables comentarios y sabios consejos, por su carácter siempre alegre, gracias. También a las doctoras Yareli Rojas, Rosaura Aparicio y Karla Karina Gómez, que son un ejemplo de trabajo y calidad humana. Gracias por su amabilidad y ánimo hacia mi persona.

A mis amigos de generación, *cuasi* doctores, Luis Eduardo Sánchez y Adriana Hernández, que juntos pasamos grandiosos momentos de alegría, de tristeza, de compañía, de esfuerzo y de trabajo. Además de compañeros y amigos, somos hermanos académicos. Gracias por su apoyo siempre incondicional, por alegrarse conmigo y por entristecerse conmigo, su enorme calidad humana y sinceridad la llevaré siempre a mi lado.

A Homero Castro, también *cuasi* doctor, amigo y compañero sincero que siempre me brindó su ayuda. Por haberme aportado conocimientos que fueron detonantes en mi crecimiento profesional, por las chelas y mezcales que nos tomamos y porque contagia siempre buena vibra y alegría. Gracias.

Agradezco a todos los compañeros y amigos del MADiT - UNAM, “Rockdrigo” Córdova, Erick alias “El Chumy”, Gío, Emmanuel, Dr. Octavio, Lic. Nora, Dra. Rocío, Marcos, Arturo, Leo, Donis, Pablo, Alan, Monse alias “La Patrona”, Roger, Rodolfo, Uriel, etc., que por motivo de espacio ofrezco disculpas por no mencionarlos a todos; no obstante, han sido un importante pilar en mi desarrollo profesional. También al Ing. Carlos Hernández Ávalos por su siempre amable ayuda en las cuestiones de soporte técnico.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento profundo a los demás doctores de mi comité de tutoría: Dr. Marcelo López Parra, Dr. Héctor R. Siller Carrillo y Dr. Alex Zúñiga; ya que, sus consejos, ideas, regaños y ánimo, siempre aportaron frutos al proyecto. Ustedes han sido una columna fuerte por la que hemos llegado a la meta. Gracias doctores, Dios los bendiga.

Agradecimiento y reconocimiento también para el Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich, por haberme brindado todas las facilidades y el apoyo desde el inicio hasta el final del programa de posgrado; por sus conocimientos, consejos y amables atenciones para mi persona.

Y finalmente, mi especial agradecimiento a nuestra máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México, estandarte perínclito de nuestro espíritu universal.

“Por mi raza hablará el espíritu”
Ciudad Universitaria. Ciudad de México. 2020.

Un recuerdo que dejo. No acabarán mis flores
(Poema náhuatl. El rey poeta, Netzahualcóyotl)

“¿Con qué he de irme?
¿Nada dejaré en pos de mí sobre la tierra?
¿Cómo ha de actuar mi corazón?
¿Acaso en vano venimos a vivir,
a brotar sobre la tierra?
Dejemos al menos flores,
dejemos al menos cantos.”

“No acabarán mis flores,
no cesarán mis cantos.
Yo cantor los elevo,
se reparten, se esparcen.
Aun cuando las flores
se marchitan y amarillean,
serán llevadas allá,
al interior de la casa
del ave de plumas de oro.”

“SI SAPIENTIA DEUS EST [...] VERUS PHILOSOPHUS EST AMATOR DEI”
“CREDE UT INTELLIGAS; INTELLIGE UT CREDAS”
(Dr. San Agustín de Hipona)

“CREATOR INEFFABILIS,
QUI DE THESAUROS SAPIENTIAE TUAE
TRES ANGELORUM HIERARCHIAS DESIGNASTI,
ET EAS SUPER CAELUM EMPYREUM
MIRO ORDINE COLLOCASTI
ATQUE UNIVERSI PARTES
ELEGANTISSIME DISTRIBUISTI:
TU, INQUAM, QUI VERUS FONDS LUMINIS
ET SAPIENTIAE DICERIS
AC SUPEREMINENS PRINCIPIUM,
INFUNDERE DIGNERIS
SUPER INTELLECTUS MEI TENEBRAS
TUAE RADIUM CLARITATIS, DUPLICES,
IN QUIBUS NATUS SUM, A ME REMOVENS TENEBRAS:
PECCATUM SCILICET ET IGNORANTIAM.
TU, QUI LINGUAS INFANTIUM FACIS DISERTAS,
LINGUAM MEAM ERUDIAS
ATQUE IN LABIIS MEIS
GRATIAM TUAE BENEDICTIONIS INFUNDAS.
DA MIHI INTELLIGENDI ACUMEN,
RETINENDI CAPACITATEM,
ADDISCENDI MODUM ET FACILITATEM,
INTERPRETANDI SUBTILITATEM,
LOQUENDI GRATIAM COPIOSAM.
INGRESSUM INSTRUAS,
PROGRESSUM DIRIGAS,
EGRESSUM COMPLEAS.
TU, QUI ES VERUS DEUS ET HOMO,
QUI VIVIS ET REGNAS IN SAECULA SAECULORUM.
AMEN.”

(Dr. Santo Tomás de Aquino)

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES SOBRE MANUFACTURA ADITIVA	3
1.1. Concepto de manufactura aditiva.....	3
1.2. Crecimiento de la industria de la manufactura aditiva	3
1.3. Ventajas de la manufactura aditiva.....	4
1.4. Retos y oportunidades de la manufactura aditiva.....	4
1.5. El proceso genérico de la manufactura aditiva.....	6
1.6. Clasificación general de los procesos de manufactura aditiva.....	8
1.6.1. Fotopolimerización en tina.....	9
1.6.2. Rociado de material	10
1.6.3. Extrusión de material.....	11
1.6.4. Rociado de aglutinante.....	11
1.6.5. Fusión de cama en polvo	12
1.6.6. Deposición por energía dirigida.....	13
1.6.7. Laminación de hojas	14
1.6.8. Procesos híbridos	15
2. TEMA DE INVESTIGACIÓN	16
2.1. El consumo de energía eléctrica global y nacional.....	16
2.2. El estudio del consumo energético en la manufactura aditiva	17
2.3. El consumo energético como tema de estudio.....	18
2.4. Revisión de la literatura sobre consumo energético en MA.....	19
2.5. Planteamiento del problema.....	20
2.6. Hipótesis.....	21
2.7. Objetivo general	22
2.7.1. Objetivos específicos.....	22
2.8. Alcance	22
3. MODELOS MATEMÁTICOS DE CONSUMO ENERGÉTICO Y TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN.....	24
3.1. Modelos matemáticos del consumo energético y del tiempo de construcción en extrusión de material	24
3.2. Modelos matemáticos del consumo energético y del tiempo de construcción en fotopolimerización en tina con láser	27

3.3.	Modelos matemáticos del consumo energético y del tiempo de construcción en rociado de material	30
3.4.	Síntesis de las ecuaciones de energía de proceso y tiempo de construcción para los procesos de MA: ME, VP y MJ.....	31
4.	VERIFICACIÓN DE LA SIMILITUD DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS	33
4.1.	Materiales y métodos para ensayo de tensión.....	33
4.2.	Resultados de los ensayos de tensión.....	34
5.	EVALUACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DEL TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN	35
5.1.	Experimentación en el proceso de extrusión de material.....	35
5.1.1.	Métodos y materiales para el proceso de extrusión de material	35
5.1.2.	Resultados del consumo energético y del tiempo de construcción en el proceso de extrusión de material.....	37
5.2.	Experimentación en el proceso de fotopolimerización en tina con láser	37
5.2.1.	Métodos y materiales para el proceso de fotopolimerización en tina con láser	37
5.2.2.	Resultados del consumo energético y del tiempo de construcción en el proceso de fotopolimerización en tina con láser.....	39
5.3.	Experimentación en el proceso de rociado de material.....	39
5.3.1.	Métodos y materiales para el proceso de rociado de material	40
5.3.2.	Resultados del consumo energético y del tiempo de construcción en el proceso de rociado de material.....	41
6.	ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DEL TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN..	42
6.1.	Aplicación de los modelos matemáticos de consumo energético y tiempo de construcción	42
6.1.1.	Resultados del consumo energético y del tiempo de construcción mediante la aplicación de los modelos matemáticos.....	44
6.2.	Comparativo entre los resultados teórico-experimentales.....	44
6.3.	Intervalos de las regiones de consumo energético y de tasa específica de tiempo de construcción	46
6.4.	Discusión sobre la evaluación de las propiedades mecánicas, sobre el consumo energético y sobre el tiempo de construcción.....	47
6.4.1.	Sobre la similitud de las propiedades mecánicas	47
6.4.2.	Sobre el proceso de extrusión de material	48
6.4.2.1.	El consumo energético en ME.....	48
6.4.2.2.	El tiempo de construcción en ME.....	48
6.4.2.3.	Prospectiva tecnológica para el proceso de ME.....	49

6.4.3.	Sobre el proceso de fotopolimerización en tina con láser	49
6.4.3.1.	El consumo energético en VP	50
6.4.3.2.	El tiempo de construcción en VP	50
6.4.3.3.	Prospectiva tecnológica para el proceso de VP	51
6.4.4.	Sobre el proceso de rociado de material	51
6.4.4.1.	El consumo energético en MJ	51
6.4.4.2.	El tiempo de construcción en MJ	52
6.4.4.3.	Prospectiva tecnológica para el proceso de MJ	53
6.4.5.	Sobre los resultados teórico-experimentales.....	53
6.4.6.	Sobre las regiones de consumo energético específico y de tasa específica de tiempo de construcción	54
7.	RELACIÓN ENTRE CONSUMO ENERGÉTICO Y PROPIEDADES MECÁNICAS	57
7.1.	Formulación de la hipótesis para el estudio consumo energético vs propiedades mecánicas	57
7.2.	Métodos y materiales para el estudio consumo energético vs propiedades mecánicas	58
7.2.1.	Consideraciones para el proceso de extrusión de material.....	58
7.2.2.	Consideraciones para el proceso de fotopolimerización en tina con láser	59
7.2.3.	Consideraciones para el proceso de rociado de material.....	60
7.3.	Resultados de consumo energético vs. propiedades mecánicas	61
7.4.	Análisis de los resultados de consumo energético vs. resistencia a la tensión y módulo de Young	62
	CONCLUSIONES	65
	REFERENCIAS.....	67
	ANEXOS	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Crecimiento del valor estimado de MA y tasa anual compuesta de crecimiento de ingresos mundiales (CARG) [4].....	3
Fig. 2 Proceso genérico de MA (imagen adaptada de [2]).....	7
Fig. 3 Proceso de fotopolimerización en tina (imagen adaptada de [17]).	9
Fig. 4 Proceso de rociado de material (imagen adaptada de [17]).....	10
Fig. 5 Proceso de extrusión de material (imagen adaptada de [17]).....	11
Fig. 6 Proceso de rociado de aglutinante (imagen adaptada de [17]).....	12
Fig. 7 Proceso de fusión de cama en polvo (imagen adaptada de [17]).	13
Fig. 8 Proceso de deposición por energía dirigida (imagen adaptada de [19]).	14
Fig. 9 Proceso de laminación de hojas (imagen adaptada de [20]).....	15
Fig. 10 Proceso de fabricación híbrido, deposición por energía dirigida y torneado (imagen adaptada de [22]).	15
Fig. 11 Consumo energético eléctrico total (en azul) y del sector industrial en México (en naranja). Las líneas punteadas representan las tendencias de consumo en cada caso; imagen adaptada de [25]).	16
Fig. 12 Precio de la electricidad del sector industrial en México. La línea punteada representa la tendencia (imagen adaptada de [25]).	16
Fig. 13 El estudio del consumo energético en MA dentro de las oportunidades y retos considerados como prioritarios para la sostenibilidad en la manufactura aditiva de los próximos años [28].	17
Fig. 14 Mapa de ruta para la normalización en manufactura aditiva [27].	18
Fig. 15 Consumo energético total expresado como la suma del consumo energético del proceso más el de los elementos periféricos y accesorios.	20
Fig. 16 Formación de capas en extrusión de material.....	26
Fig. 17 Escaneado del rayo láser en VP.....	29
Fig. 18 Formación de capas en rociado de material.....	30
Fig. 19 Ensayo de tensión de las probetas.....	33
Fig. 20 Resultados del ensayo de tensión para la verificación de la similitud de las propiedades mecánicas.	34
Fig. 21 Instrumentación para la energía de proceso en ME. Izquierda, detalle del conector eléctrico de la boquilla de material de modelo. Derecha, cabezal instrumentado y listo para la medición.....	35
Fig. 22 Medición y registro mediante aparato analizador de la calidad de energía (izquierda) durante la construcción de los especímenes (derecha).....	36
Fig. 23 Espécimen construido mediante el proceso de ME.....	36
Fig. 24 Máquina empleada para la medición de la energía de proceso en VP.	38
Fig. 25 Medición de la potencia del láser con el sensor (izquierda) y el medidor (derecha).	38
Fig. 26 Espécimen construido mediante el proceso de VP.....	39
Fig. 27 Máquina empleada para la medición del consumo energético en MJ (izquierda). Detalle del cabezal de rociado de material (derecha).....	40
Fig. 28 Radiómetro utilizado para la medición de la exposición de luz UV.	40
Fig. 29 Espécimen construido mediante el proceso de MJ.....	41

Fig. 30 Comparativa teórico-experimental del consumo energético específico y porcentaje de diferencia.	45
Fig. 31 Comparativa teórico-experimental de la tasa específica del tiempo de construcción y porcentaje de diferencia del tiempo de construcción.....	45
Fig. 32 Regiones de consumo energético específico (SEC) para los tres procesos de MA.	46
Fig. 33 Regiones de tasa específica de tiempo de construcción (T) para los tres procesos de MA.....	47
Fig. 34 Geometría de estudio para el proceso de extrusión de material.....	59
Fig. 35 Geometría de estudio para el proceso de fotopolimerización en tina con láser.	60
Fig. 36 Geometría de estudio para el proceso de rociado de material.....	61
Fig. 37 Resultados de consumo energético vs. resistencia a la tensión.....	61
Fig. 38 Resultados de consumo energético vs. módulo de Young.....	62
Fig. 39 Resistencia a la tensión de diferentes materiales y procesos de MA.....	64
Fig. 40 Módulo de Young de diferentes materiales y procesos de MA.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ventajas, retos y oportunidades de la manufactura aditiva.....	6
Tabla 2 Ecuaciones de energía de proceso y tiempo de construcción para ME, VP y MJ y nomenclatura de los parámetros.....	32
Tabla 3 Materiales y máquinas usados para la fabricación de las probetas sometidas a ensayo de tensión.....	34
Tabla 4 Resultados de la medición del consumo energético y del tiempo de construcción en ME.....	37
Tabla 5 Resultados de la medición del consumo energético y del tiempo de construcción en VP.....	39
Tabla 6 Resultados de la medición del consumo energético y del tiempo de construcción en MJ.....	41
Tabla 7 Valores de los parámetros empleados en los modelos matemáticos propuestos.....	43
Tabla 8 Resultados de energía específica de proceso y tasa específica de tiempo de construcción.....	44
Tabla 9 Comparativa de resultados teórico-experimentales.....	44
Tabla 10 Otras propiedades mecánicas.....	55

INTRODUCCIÓN

El consumo energético es uno de los principales temas de investigación en el campo de la ingeniería de diseño y de manufactura, ya que es uno de los factores que, junto con otros (como por ejemplo el factor de emisiones tóxicas, el factor de efectos cancerígenos, el factor de potencial de calentamiento global, entre otros), impacta de manera directa en el medio ambiente. Por esta razón, el estudio del consumo energético en la manufactura aditiva es un tema de especial atención que tiene, como una de sus metas prioritarias, identificar los aspectos científico-tecnológicos que puedan contribuir con la reducción del impacto medioambiental para que la manufactura aditiva sea una alternativa más en los procesos de manufactura sostenible.

Esta tesis versa sobre el consumo energético en los procesos de manufactura aditiva y su relación con las propiedades mecánicas de resistencia a la tensión y módulo de Young, resultantes de piezas fabricadas por tecnologías aditivas. En específico, se estudian tres procesos de manufactura aditiva: extrusión de material, fotopolimerización con láser en tina y rociado de material. Estos procesos se estudiaron debido a que con ellos es posible construir piezas con propiedades mecánicas similares y esto permite realizar una comparativa que hace posible determinar qué proceso pudiese ser más sostenible en términos de consumo energético. La energía que se analiza en este trabajo es la del proceso *per se*; esto significa que no se considera la energía relacionada con los periféricos y accesorios relacionados con los sistemas de manufactura, sino únicamente la energía que corresponde al proceso de depósito y unión de material capa por capa para obtener el modelo sólido, y que se relaciona con los cambios de estado de agregación del material (parámetros del material) y los parámetros de manufactura.

En el primer capítulo de este trabajo se exponen los conceptos básicos de la manufactura aditiva, su definición, su estado actual, ventajas y desventajas, retos y oportunidades, así como la clasificación de los procesos aditivos y su descripción general.

En el capítulo segundo se describe la contextualización del tema, el estado del arte, así como la hipótesis que de la revisión de la literatura emana. Adicionalmente, se enuncia el objetivo y se establece el alcance de la investigación.

En el tercer capítulo se expone el marco teórico del que emanan la deducción y propuesta de los modelos matemáticos de consumo energético y tiempo de construcción para los tres procesos de manufactura aditiva estudiados, a partir de la combinación de las ecuaciones generales de energía, en función de los parámetros de proceso de manufactura, así como de los que corresponden a las propiedades del material.

El capítulo cuarto trata sobre la experimentación realizada para la verificación de la relación de las propiedades mecánicas de las piezas manufacturadas con los materiales seleccionados para cada uno de los tres procesos. Se explica la metodología llevada a cabo en cuanto a materiales, especímenes, norma y equipo empleado.

En el quinto capítulo se describe cómo se ha desarrollado la evaluación del consumo energético. Se expone la metodología seguida para efectuar la experimentación (materiales empleados, geometrías de los especímenes, e instrumentación de las máquinas empleadas) y se detallan los resultados obtenidos.

Se procede en el capítulo sexto a exponer la aplicación de los modelos matemáticos propuestos para obtener el consumo energético y la tasa específica de tiempo de construcción. También se realiza un análisis comparativo entre los resultados obtenidos a través del modelo matemático y los obtenidos mediante experimentación. En este capítulo se incluye, adicionalmente, una discusión de los resultados obtenidos: sobre la similitud de las propiedades mecánicas, sobre los modelos matemáticos propuestos, sobre los resultados teórico-experimentales y sobre los intervalos de las regiones de consumo energético y tasa específica de tiempo de construcción. Adicionalmente, se expone la prospectiva tecnológica que se identifica para cada uno de los procesos.

En el capítulo séptimo se expone un análisis sobre la relación entre el consumo energético y las propiedades mecánicas. El objetivo de dicho análisis es identificar si existe una correlación entre la cantidad de energía que se requiere por cada unidad cúbica de construcción y la cantidad de resistencia a la tensión y módulo de Young en las piezas fabricadas mediante diferentes materiales de los tres procesos. Asimismo, se identifican los intervalos de valores de consumo energético específico que se corresponden con los intervalos de valores de propiedades mecánicas posibles de obtener en las piezas manufacturadas a través de dichos procesos de manufactura aditiva.

Finalmente, se exponen las conclusiones como resultado de este trabajo.

En la sección de anexos se adjuntan los artículos científicos elaborados a partir los resultados obtenidos.

1. GENERALIDADES SOBRE MANUFACTURA ADITIVA

1.1. Concepto de manufactura aditiva

La manufactura aditiva (MA) se define como el proceso de unión de materiales para fabricar (construir) piezas a partir de modelos digitales tridimensionales (3D), capa sobre capa, en contraste con procesos de manufactura tradicionales sustractivos o de formado [1, 2, 3].

1.2. Crecimiento de la industria de la manufactura aditiva

No obstante que fueron sus inicios por la década de los ochenta, la MA llegó a ser una realidad sólo hasta después de que de los avances tecnológicos sustanciales, tales como la mejora de los elementos de precisión y de control de las máquinas así como el crecimiento de la gama de materiales, fueran realizados y los costos reducidos. Desde entonces, la MA ha llegado a ser una popular y ampliamente adoptada herramienta para el prototipado y fabricación de piezas de uso fina [4].

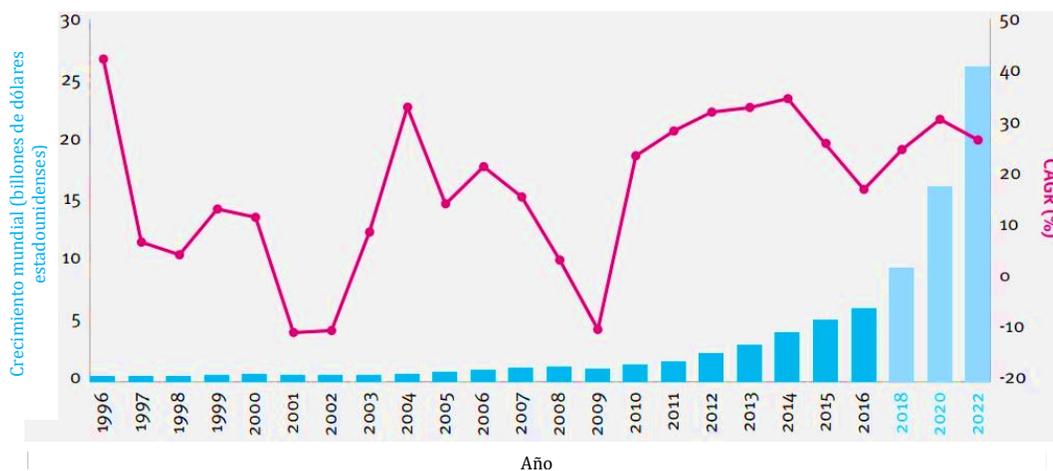


Fig. 1 Crecimiento del valor estimado de MA y tasa anual compuesta de crecimiento de ingresos mundiales (CARG) [4].

Más aún, en la década pasada, la MA ha sido implementada en muchos sectores por su alto valor en aplicaciones de fabricación, incluyendo el aeroespacial, el médico, la industria automotriz, etc. El mercado mundial también continúa creciendo a una tasa acelerada (véase Fig. 1). El tamaño mundial total de la industria de la MA (consistiendo en todos los productos y servicios de MA) se estimó en cerca de 6 billones de dólares estadounidenses en el año 2016 (creciendo cerca de 0,4 billones desde el año 1996) y se espera un crecimiento de más de 26 millones para el año 2022 [4, 5].

Este fenómeno de crecimiento se debe a que la MA ofrece múltiples ventajas de potencial económico, así como de carácter técnico y medioambiental sobre los procesos de fabricación tradicional tales como el sustractivo, el de remoción o el de conformado

de material [4]; desde luego, debe entenderse que la MA no sustituye a otros métodos, sino que los complementa.

1.3. Ventajas de la manufactura aditiva

La adopción de la MA y otras tecnologías avanzadas de fabricación parece anunciar un futuro en el que las cadenas de valor son más cortas, más pequeñas, más localizadas, más colaborativas y ofrecen importantes beneficios de sostenibilidad. La MA imita los procesos biológicos al crear productos capa por capa. Propicia inherentemente menos desperdicio más allá de los métodos de sustracción tradicionales y tiene el potencial de desvincular la creación de valor social y económico del impacto ambiental de las actividades comerciales. Múltiples beneficios se pueden enunciar respecto a este proceso de manufactura, siendo los más importantes las que se mencionan en la Tabla 1 [4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

1.4. Retos y oportunidades de la manufactura aditiva

A pesar de su continuo crecimiento y de sus ventajas, la aceptación o adopción de las tecnologías de MA en varios de los sectores de la industria aún es limitada. Actualmente, existen varias barreras que impiden una adopción más generalizada de la MA en la industria manufacturera [4].

En la Tabla 1 se enlistan algunos de los principales retos y oportunidades de la MA, para los cuales la comunidad científica y de ingeniería mundial está considerando la implementación de mecanismos para superar las barreras tecnológicas que se plantean en torno estas dificultades [4, 6, 7, 9, 14].

ASPECTO	VENTAJAS	RETOS Y OPORTUNIDADES
Sobre el diseño de productos	<p>Libertad de diseño (complejidad de forma). Diseño y manufactura personalizada. Uso de los conceptos de biomimetismo. Geometrías optimizadas y desempeño para cumplir con los requisitos funcionales. Capacidad para rediseñar radicalmente productos y crear materiales con propiedades mejoradas (por ejemplo, materiales graduados). Desmaterialización del producto (reducción de su masa y/o tamaño). Montajes simplificados, productos y componentes. Reducción de problemas de costo, tiempo y calidad a través de ensamblajes simplificados. Reducción del tiempo entre diseño y fabricación. Funcionalidad mejorada del producto.</p>	<p>Educar a los ingenieros de diseño y usuarios en general sobre los posibles usos y beneficios de la MA apoyándolos en el desarrollo de habilidades. Integración de las consideraciones de sostenibilidad utilizando el diseño para el medio ambiente o los principios de diseño ecológico. Certificación de nuevos componentes. Capturar y replicar el aprendizaje en futuras aplicaciones. Se requiere la mejora del <i>software</i> (programa informático) de MA como herramienta de diseño, cálculo y simulación. No se conoce completamente el comportamiento del desempeño final de las piezas fabricadas bajo diferentes condiciones de parámetros de construcción de cargas de trabajo, dada la anisotropía, heterogeneidad y discontinuidad que se presenta en las piezas finales.</p>

Sobre el procesamiento del material	<p>Mejora en la eficiencia de los recursos en el procesamiento de materia prima, ya que la MA requiere diferentes formas de insumos materiales.</p> <p>Reducida toxicidad en el procesamiento de materiales.</p> <p>Reciclaje de material.</p> <p>Reciclado de materiales de desecho en nuevas aplicaciones.</p>	<p>Falta de conocimiento y comprensión del desempeño ambiental en las técnicas de procesamiento de materiales.</p> <p>Se requiere validar las propiedades del material.</p> <p>Se requiere la normalización y certificación de materiales y procesos.</p> <p>Se requiere el aumento del porcentaje de contenido reciclado en insumos de material.</p> <p>Existe un reciclaje limitado de productos al final de su vida útil debido a materiales mezclados.</p> <p>Se debe evitar la contaminación del material.</p>
Sobre la manufactura	<p>Reducción de la generación de residuos.</p> <p>Calidad mejorada y menores tasas de rechazo.</p> <p>La eficiencia de recursos mejorada reduce los costos.</p> <p>Fabricación a pedido en el punto de uso en espacio y tiempo para las especificaciones exactas requeridas.</p> <p>El mejor acceso a los diseños digitales y los sistemas de fabricación permite la fabricación simultánea de componentes y productos.</p> <p>Flexibilidad en la fabricación a medida.</p> <p>Fabricación mejor distribuida.</p> <p>Reducido costo de fabricación personalizada.</p> <p>Mejora de la eficiencia del proceso de fabricación a través de herramientas producidas por MA y moldes.</p> <p>La reducción de insumos de material y su manejo reducen costos.</p> <p>Reducción del desperdicio de inventario incluyendo productos no vendidos y obsoletos.</p> <p>Fabricación localizada por proximidad de productores y clientes.</p> <p>Los ensamblajes simplificados conducen a cadenas de suministro más simples y planas.</p> <p>Cadenas de suministro simplificadas a través del transporte de materiales básicos.</p> <p>Sensibilización sobre el proceso de fabricación y sus impactos.</p> <p>Mayor utilización de equipos.</p> <p>Mejora de la productividad, la calidad, el costo y la eficiencia de los recursos utilizando tecnologías híbridas.</p> <p>Potencialidad para integrarse a la revolución digital (es decir, el "Internet de las cosas" o "Industria 4.0").</p>	<p>Calidad y estética limitadas de los productos.</p> <p>Se requiere mejora de la capacidad de fabricación de MA para integrar materiales funcionales.</p> <p>Altos costos de la maquinaria.</p> <p>Se requiere conocer la eficiencia energética a volúmenes pequeños y altos de producción en los sistemas de MA.</p> <p>Existe una falta de conocimiento y comprensión del desempeño ambiental de las tecnologías de MA, las cadenas de suministro y los productos creados a través de la MA.</p> <p>Se requiere educar a los ingenieros de diseño y manufactura, así como a los usuarios en general, sobre los beneficios de integrar la MA en tecnologías híbridas.</p> <p>Es necesaria una mayor integración de la MA con tecnologías híbridas en diseño y producción.</p> <p>Existe una automatización limitada.</p> <p>Se requiere la certificación de procesos de fabricación.</p> <p>Se requiere establecer los requisitos para normas y reglamentos.</p> <p>Se necesita control de calidad en redes distribuidas.</p> <p>Se requiere la maximización del uso de la máquina dentro de redes distribuidas.</p> <p>Se requiere la maximización del uso de la máquina en el hogar por parte de los consumidores.</p> <p>Se requiere la optimización del proceso de construcción de MA, en cuanto a desempeño y consumo energético.</p> <p>Hace falta la regulación del costo de adquisición de nuevos diseños digitales.</p> <p>Existe una fragmentación y distribución desigual de los servicios actuales de MA.</p> <p>Hay un riesgo potencial para que la MA contribuya a una sociedad materialista y consumista.</p> <p>Los consumidores individuales pueden producir en exceso y consumir en exceso, lo que conduce a un consumo irresponsable.</p> <p>Es necesario el registro y la réplica del aprendizaje en futuras aplicaciones.</p>

		Alto costo de maquinaria, compras, operación, mantenimiento, y depreciación de máquinas y materiales de MA. Se requieren conocer las implicaciones técnico-científicas de fabricación para integrarse a la revolución digital (es decir, el "Internet de las cosas" o "Industria 4.0").
Sobre el uso del producto	Productos ligeros. Eficiencia operacional mejorada. Funcionalidad y durabilidad mejoradas. Actualización de componentes para la extensión de la vida del producto.	Desempeño incierto de los productos y componentes debido a la baja madurez de la tecnología. Desempeño incierto de los productos y componentes a lo largo de la vida útil prolongada.
Sobre la reparación y la remanufactura	Reducción de la generación de residuos durante el proceso de reparación. Reducción del tiempo de proceso para la reparación. Mejora de la utilización del producto a través de la reparación y remanufactura. Reparación in situ y remanufactura habilitada por la disponibilidad de diseños digitales o de ingeniería inversa. La reparación <i>in situ</i> prolonga la vida del producto. Actualización de componentes durante el proceso de reparación. Los modelos comerciales de productos y servicios para reparación y remanufactura alinean los intereses comerciales y de sostenibilidad.	Es necesaria la réplica de modelos de negocio en otros sectores. Se requiere la implementación de sistemas de mantenimiento distribuidos. Se requiere la certificación de procesos de reparación y remanufactura. Se requiere la certificación de repuestos para superar problemas de confiabilidad. Aún no se han demostrado los beneficios del modelo de negocio de servicio de productos basado en MA.
Sobre el reciclaje	Mejora de la eficiencia del material a través del reciclaje. Uso de materiales reciclados y residuos derivados como insumos. Los ensamblajes simplificados con menos diversidad de materiales mejoran las oportunidades para el reciclaje Sistemas de reciclaje localizados. Sensibilización sobre el reciclaje de materiales. Mayor aceptación del contenido de material reciclado. Reciclaje de material de manera más homogénea.	Reciclaje limitado de plásticos debido a pérdidas de calidad. No está definido el reciclaje de productos multimaterial producidos por MA. Es necesario educar a los consumidores sobre el reciclaje de plásticos de MA. Existe incompatibilidad entre materiales no normalizados y no reciclables.

Tabla 1 Ventajas, retos y oportunidades de la manufactura aditiva.

Con base en lo expuesto previamente, se identifica un tema de oportunidad, el cual, tiene que ver con la sostenibilidad, particularmente en su pilar relacionado con el consumo energético, tema esencial en esta tesis de investigación.

1.5. El proceso genérico de la manufactura aditiva

La MA es un proceso revolucionario que se ha desarrollado y caracterizado partiendo del principio de deposición de capas de material a partir de datos digitales típicamente obtenidos por diseño asistido por computadora (CAD) o bien mediante técnicas de digitalización. Independientemente de cómo hayan sido obtenidos los datos digitales que forman el modelo 3D, éste se divide en múltiples "rebanadas" mediante el uso de

un *software* (programa informático) especial, y como resultado se obtiene un conjunto de entidades virtuales que tiene un número discreto de ellas con contorno y espesor determinados que se denominan “capas” [3]. Posteriormente, este conjunto de entidades es cargado a la máquina de MA que se encargará de generar los movimientos necesarios para lograr materializar cada capa, una tras otra hasta conseguir el modelo sólido programado.

En general, el proceso de MA se divide en los siguientes pasos [2], mismos que se ilustran en la Fig. 2 y se describen a continuación:

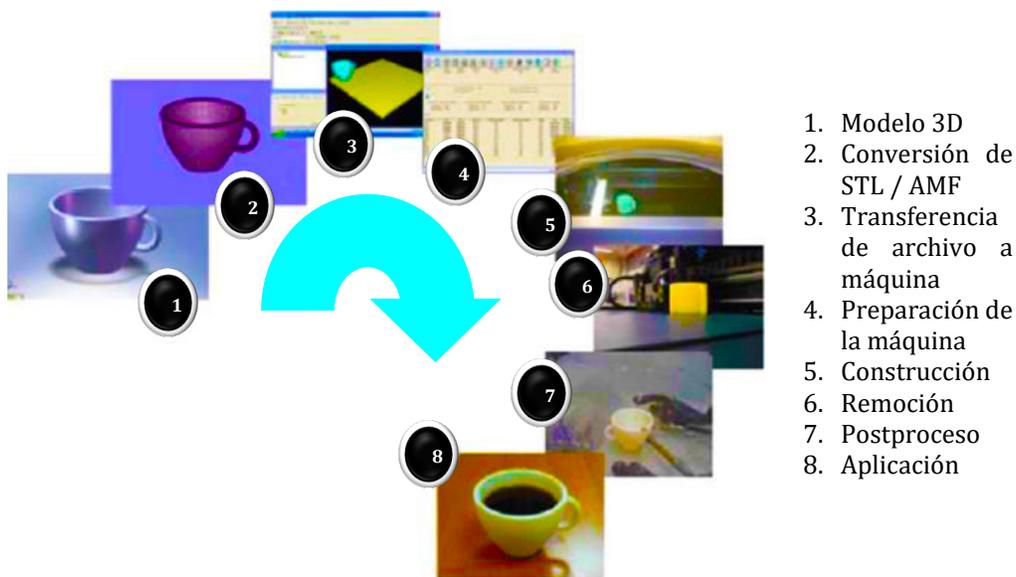


Fig. 2 Proceso genérico de MA (imagen adaptada de [2]).

Paso 1. Obtención del modelo 3D. Éste es obtenido mediante un *software* de CAD o bien a través de ingeniería inversa mediante técnicas de digitalización.

Paso 2. Conversión a STL/AMF. El archivo 3D se convierte a un archivo STL (siglas del inglés *Standard Triangle Language*) o a un archivo AMF (siglas del inglés *Additive Manufacturing File*). Dichos archivos definen la geometría de los objetos excluyendo la información relacionada con sus propiedades. La selección de a qué archivo se debe convertir, dependerá de la compatibilidad con el *software* de la máquina para su posterior preparación.

Paso 3. Transferencia de STL/AMF a *software* de la máquina. En el *software* de la máquina de MA se efectúa el “rebanado” del modelo 3D dando origen a la formación de capas. Adicionalmente, se efectúan operaciones como la correcta posición, orientación y tamaño de la pieza a construir.

Paso 4. Preparación de la máquina. En este paso se prepara la máquina para la construcción de la pieza mediante algunas operaciones como: establecimiento de los

parámetros de construcción y de material, fuentes de energía, programación del tiempo, etc.

Paso 5. Construcción. La construcción en MA se refiere a la materialización de las capas, una por una, empezando por los contornos y rellenando su área interna para formar el modelo sólido tridimensional completo.

Paso 6. Remoción. Completada la construcción, en algunas máquinas se requiere la interacción con ellas para que la remoción sea segura, por ejemplo, la verificación manual o automática de que la temperatura sea adecuada, de que no haya mecanismos en movimiento, etc., teniendo así, los accionamientos de seguridad correspondientes, listos para remover la pieza construida.

Paso 7. Postproceso. Una vez removida la pieza, quizá requiera de limpieza, de algún proceso de acabado superficial, tratamientos térmicos, aplicación de pintura, barnices, etc., para su acabado final.

Paso 8. Aplicación. La pieza manufacturada será empleada según el fin para el cual ha sido creada, de acuerdo con los requerimientos y especificaciones. El uso de las piezas de MA dependerá del nivel de aplicación, ya sea prototipado de concepto, prototipado funcional, herramental o de uso final [3].

1.6. Clasificación general de los procesos de manufactura aditiva

Existen diversas formas para clasificar los procesos de MA [2, 3, 5]. Se ha empleado la materia prima o la forma inicial de ésta para diferenciarlos; por ejemplo, los que procesan plásticos, metales, cerámicos, etc.; y la forma: en sólido, polvo, líquido, filamentos, papel o láminas [2]. No obstante que las clasificaciones permiten comprender el principio funcional de los procesos aditivos capa por capa, para una descripción específica, de acuerdo con la norma ISO-ASTM-52900, éstos se separan en 7 categorías, agrupadas así tomando en consideración el mecanismo físico de transformación de la materia prima y el tipo de arquitectura de la máquina; considerándose adicionalmente a ellas, una octava, la cual consiste en el proceso híbrido. En virtud de ello, los procesos de MA son: fotopolimerización en tina (*vat photopolymerization, VP*) fusión de cama en polvo (*powder bed fusion, PBF*), extrusión de material (*material extrusion, ME*), rociado de material (*material jetting, MJ*), rociado de aglutinante (*binder jetting, BJ*), laminación de hojas (*sheet lamination or laminated object manufacturing, LOM*) y deposición por energía dirigida (*directed energy deposition, DED*) [1]. En algunos de estos procesos, la adición de una capa sobre otra se efectúa mediante curado, pegado, sinterizado, fusionado, etc. Independientemente del mecanismo de adición de las capas, para su formación, la mayoría de los sistemas de MA llevan a cabo un contorneado en el plano *XY* de acuerdo con la geometría programada de cada capa, y el relleno o entramado en el área interna de dicho contorno; una vez construida la primera capa sobre una base o platina; ésta se mueve mediante algún mecanismo, en la dirección *Z*, una distancia equivalente al espesor de capa y de

nueva cuenta se efectúa, sobre la primera capa, la segunda, y así sucesivamente hasta terminar todas las capas. Cabe decir que algunos de los procesos utilizan para la construcción de piezas, materiales de modelo y materiales de soporte. El material de modelo es la materia prima con la cual se ha de fabricar la totalidad del volumen de la pieza, según la geometría requerida; el material de soporte es el que se ha de emplear como material de sustentación en aquellos espacios donde la geometría presente voladizos. Se requiere de material de soporte en voladizos con ángulos aproximadamente menores a 45 grados con respecto al plano horizontal [15]. La naturaleza del material de soporte es la misma para algunos procesos mientras que para otros, se emplea el mismo material que el de modelo [3].

1.6.1. Fotopolimerización en tina

La fotopolimerización en tina emplea como materiales primarios, resinas líquidas que solidifican con la radiación, llamados fotopolímeros. La mayoría de éstos reaccionan en el intervalo de longitud de onda de la radiación ultravioleta (UV, de 100-480 nm [16]). Este proceso consiste en una tina que contiene resina líquida fotosensible, una platina o plataforma sobre la que se efectúa la construcción modelo, y una unidad de láser UV. Un sistema de escaneo o barrido de luz por medio de espejos en un arreglo galvanométrico controlado por computadora se usa para enfocar un rayo láser sobre la superficie de la resina, que efectúa el contorno y relleno geométricos sobre el plano XY, curando la resina inmediatamente al incidir el rayo de luz sobre ella, generándose así, la primera capa con el espesor programado sobre la platina. Luego, ésta se mueve una distancia equivalente al espesor de capa programado y se realiza de nuevo el barrido con el láser para formar la segunda capa sobre la primera y así sucesivamente hasta formar la pieza [3, 2, 17, 18]. Véase Fig. 3. Algunas máquinas integran un rodillo o una cuchilla que funcionan como niveladores de superficie y como removedores de material sobrante; estos elementos actúan inmediatamente después de construirse una capa para que la consecuente se adhiera sobre una capa con superficie regular, procurando así la obtención de capas con el mismo espesor.

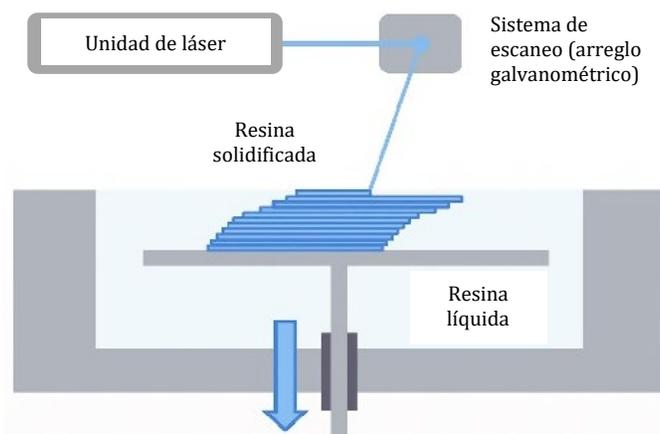


Fig. 3 Proceso de fotopolimerización en tina (imagen adaptada de [17]).

En este proceso la pieza entera se construye utilizando únicamente material de modelo, incluyendo los soportes, que se realizan con geometrías apropiadas para facilitar su remoción.

Las tecnologías asociadas a este proceso elementalmente incluyen fotopolimerización en tina con láser (escaneo vectorial por láser), procesamiento digital de luz (tecnología DLP, *Digital Light Processing*) también conocida como proyección de máscara (*Mask Projection*), y de dos fotones [2].

1.6.2. Rociado de material

En este proceso también se emplean, como en el proceso de fotopolimerización en tina, resinas fotosensibles (fotopolímeros), ya sea para material de modelo o para material de soporte. De un cabezal que efectúa una carrera a lo largo del eje X, se rocían ambos materiales simultáneamente, sobre la platina de construcción, en forma de pequeñas gotas que, en su conjunto, forman el contorno y relleno geométricos de la primera capa. A los costados del cabezal se encuentra una o dos lámparas que emiten luz UV, misma que incide sobre la resina depositada y la solidifica inmediatamente. En caso de que el ancho de la capa a construir sea mayor que el ancho del elemento de rociado del cabezal, entonces éste se mueve en dirección Y para efectuar el proceso de rociado y así hasta completar la capa entera. Un rodillo o cuchilla integrados en el mismo cabezal nivela y retira el material en exceso en cada carrera, según el espesor de capa programado. Para realizar la siguiente capa, la platina se mueve en dirección al eje Z una distancia igual al espesor de capa y se inicia nuevamente el rociado de material repitiéndose dicho proceso hasta terminar todas las capas y obtener el sólido [3]. Véase Fig. 4.

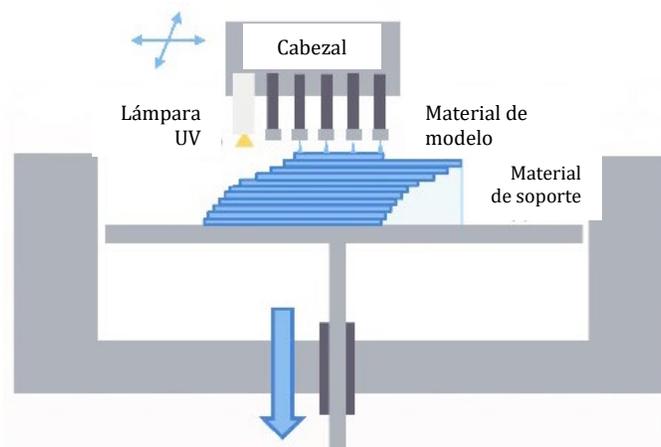


Fig. 4 Proceso de rociado de material (imagen adaptada de [17]).

Con este proceso es posible construir modelos multicolor simultáneamente, toda vez que algunas tecnologías permiten usar múltiples resinas de distintos colores y propiedades.

1.6.3. Extrusión de material

En este proceso el material (de modelo y de soporte, polímeros sólidos en forma de filamento) es conducido hasta una boquilla que hace las veces de extrusor. Dicho filamento es conducido por medio de unos rodillos, los cuales, a la vez que traccionan el material para conducirlo a la boquilla, también ejercen presión sobre ésta para empujar el material que, dentro de la boquilla caliente, se está convirtiendo en polímero pastoso o líquido, obteniéndose, de este modo, la extrusión del material en forma de filamento fino a la salida de la boquilla. La boquilla está fija a un cabezal que se mueve en el plano XY . A la vez que va siendo extrudido el material, también se va depositando en forma de filamento de acuerdo con las trayectorias programadas para construir el contorno y el relleno de la capa. Efectuada ésta, la plataforma o platina de construcción se mueve a lo largo del eje Z una distancia igual al espesor de capa (definido por el tamaño de la boquilla), y sobre la capa previamente construida se inicia de nueva cuenta el proceso de extrusión, y así sucesivamente hasta finalizar el número de capas que han de formar el modelo [2, 3]. Véase Fig. 5.

Este proceso no sólo incluye, como materiales primarios, a aquellos materiales poliméricos que se encuentran en un tambor enrollados cual filamento, sino también una amplia variedad de otros materiales incluyendo los biomateriales. El principio es el mismo; el material se dirige hacia una boquilla o extrusor y sale por medio de presión en forma de filamento fino efectuándose la correspondiente construcción de las capas. Dependiendo del tipo de material, los sistemas emplean diferentes procesos de endurecimiento tales como precipitación, cambio de fase (líquido a sólido) o reacción de dos componentes [3].

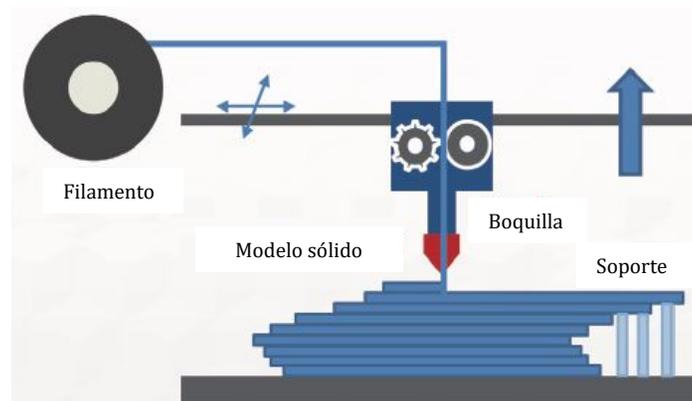


Fig. 5 Proceso de extrusión de material (imagen adaptada de [17]).

1.6.4. Rociado de aglutinante

En este proceso se tiene un cabezal por el que se rocía material aglutinante sobre una cama de polvo formando aglomerados esféricos que se pegan entre sí para formar la capa. Un rodillo se encarga de comprimir todo el aglomerado que forma la capa, así como de remover el material en exceso nivelando el espesor de la capa, obteniendo

capas con espesor regular. Construida la capa, la bandeja o plataforma de construcción se mueve a lo largo del eje Z una distancia igual al espesor de capa, el rodillo se encarga de formar la nueva cama de polvo y se inicia nuevamente el proceso de rociado de aglutinante, capa sobre capa hasta formar la pieza [2], véase Fig. 6. Este proceso permite la fabricación de piezas en diferentes colores y materiales en polvo tales como plásticos, cerámicos y metálicos. No es necesario usar un material de soporte dado que el polvo en la bandeja de construcción funge como tal.

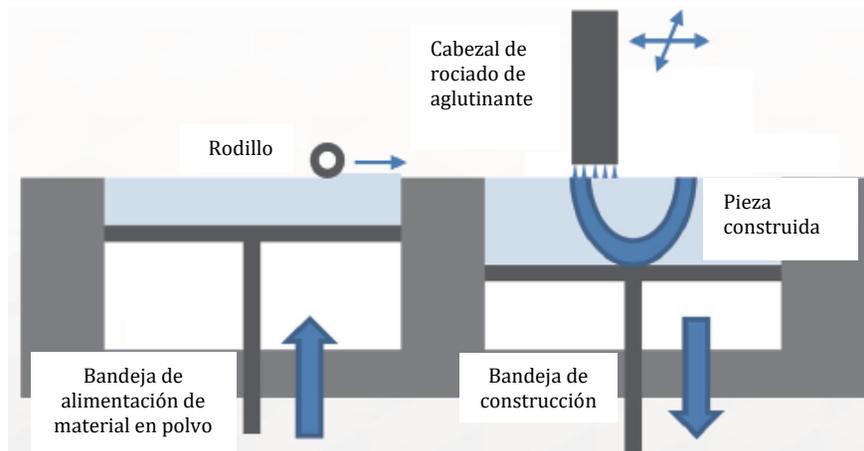


Fig. 6 Proceso de rociado de aglutinante (imagen adaptada de [17]).

1.6.5. Fusión de cama en polvo

Una fuente puntual de energía (un rayo láser o un haz de electrones) incide con la suficiente cantidad de energía sobre una delgada cama de material en polvo realizando el barrido en el plano XY para construir el contorno y el relleno geométricos de la capa. El láser calienta las partículas de polvo fusionándolas para formar la capa, la cual, una vez construida, se mueve la bandeja o plataforma de construcción una distancia igual al espesor de capa, a lo largo del eje Z, para que un rodillo o cuchilla alimente y nivele el material en polvo con el fin de tener espesores de capa regulares. El proceso se repite hasta obtener el total de capas que forman la pieza [2, 17], véase Fig. 7. En este proceso no se requiere material de soporte porque el mismo material en polvo de la bandeja de construcción sirve como tal.

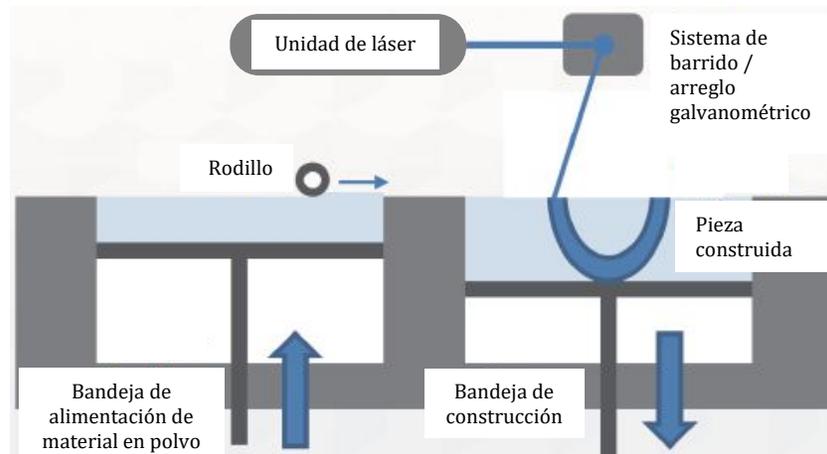


Fig. 7 Proceso de fusión de cama en polvo (imagen adaptada de [17]).

Los materiales para este proceso comúnmente incluyen plásticos, cerámicos, materiales compuestos y metales en polvo.

Las tecnologías asociadas a este proceso incluyen: Fusión Láser Selectiva de Metal Directa (*Selective Laser Melting, SLM*), Sinterizado Láser Selectivo (*Selective Laser Sintering, SLS*), Sinterizado Láser de Metal Directo (*Direct Metal Laser Sintering, DMLS*), Fusión por Rayo de Electrones (*Electron Beam Melting, EBM*), Sinterizado de Calor Selectivo (*Selective Heat Sintering, SHS*), y Sinterizado Selectivo de Máscara (*Selective Mask Sintering, SMS*).

1.6.6. Deposición por energía dirigida

El proceso consiste en un rayo o un haz de electrones que se dirige de manera controlada hacia el sustrato o pieza donde se ha de depositar el material; dicho rayo funde y fusiona simultáneamente el sustrato y el material que ha de ser depositado sobre el sustrato formando así la “piscina de fusión”. A diferencia del proceso de fusión de cama en polvo, este proceso funde el material en polvo cuando éste se va depositando sobre el sustrato para formar las capas [2]. Véase Fig. 8.

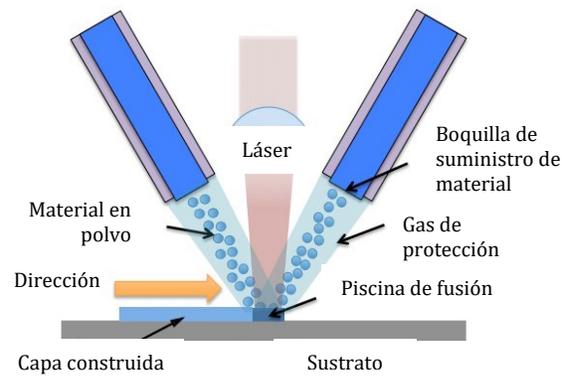


Fig. 8 Proceso de deposición por energía dirigida (imagen adaptada de [19]).

Para este proceso se emplean plásticos, cerámicos y materiales compuestos en polvo, siendo lo más común el uso de metales. Algunos sistemas usan microalambre como material de aporte. El proceso es mayormente empleado para la reparación de piezas rotodinámicas, aunque su uso no se limita a ello.

Las tecnologías asociadas a este proceso son las siguientes: Red conformada por láser (*Laser Engineered Net Shaping, LENS*), Deposición Directa de Metal (*Direct Metal Deposition, DMD*), Manufactura Directa por Rayo de Electrones (*Electron Beam Direct Manufacturing, EBDM*) y Formación por Fusión Iónica (*Ion Fusion Formation, IFF*).

1.6.7. Laminación de hojas

Este proceso consiste en un corte de hojas de acuerdo con la geometría perimetral de cada capa (hoja) y la adhesión sobre ésta de la subsecuente para obtener un producto sólido laminado. Las hojas pueden ser de papel, plástico, metal o cerámicos. Un láser, una cuchilla o una máquina de corte, por ejemplo, una fresadora, pueden emplearse como elementos de corte de contorno. La adhesión entre capas se realiza mediante algún pegamento químico, por ultrasonido, por soldadura, etc. La principal ventaja de este proceso de MA es su rápida construcción cuando se requiere una producción masiva. La principal desventaja es una gran cantidad de desperdicio de material en función de la geometría del material [3, 20]. Véase Fig. 9.

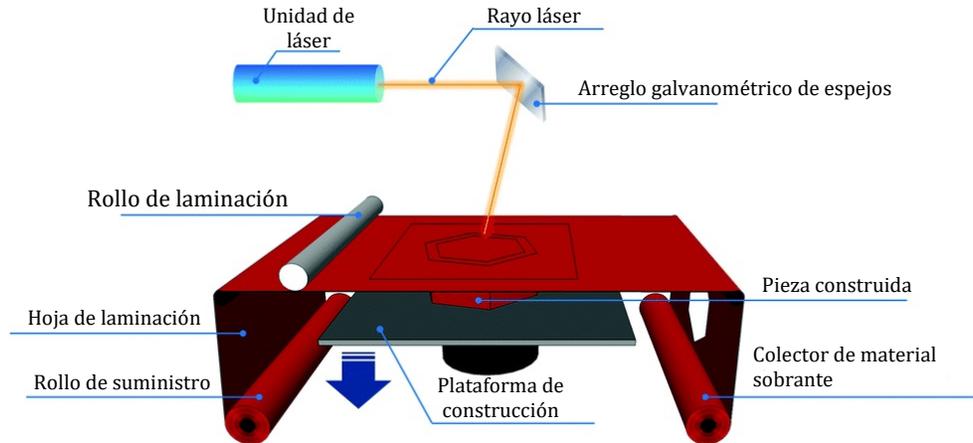


Fig. 9 Proceso de laminación de hojas (imagen adaptada de [20]).

1.6.8. Procesos híbridos

Los procesos híbridos consisten en la combinación de algún proceso de MA con uno o más procesos secundarios o fuentes de energía que están totalmente acoplados y afectan o mejoran sinérgicamente a la calidad de la pieza, su funcionalidad y/o desempeño. El objetivo de unir dos procesos, por ejemplo, de mecanizado y de adición de material es el de evitar o reducir los efectos adversos de los procesos constituyentes producidos cuando se aplican individualmente [21]. En la Fig. 10 se expone un ejemplo de un proceso híbrido, en el cual, se combina el proceso de deposición por energía dirigida y el de torneado. Se aplica la deposición de material mediante el primer proceso y se efectúa el acabado mediante el segundo.

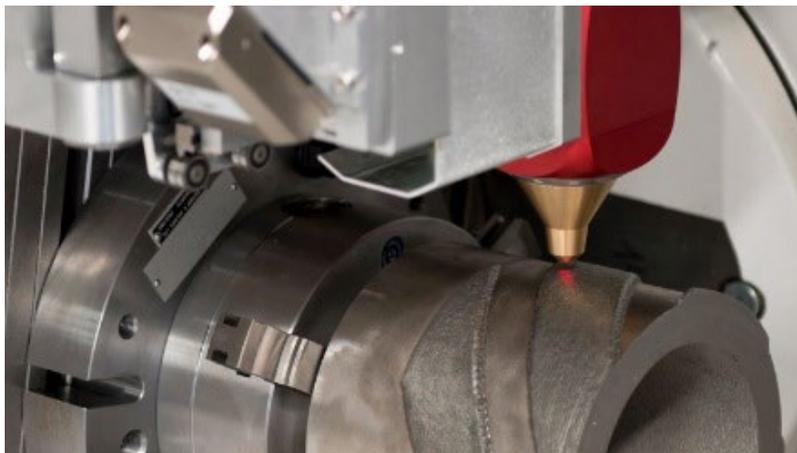


Fig. 10 Proceso de fabricación híbrido, deposición por energía dirigida y torneado (imagen adaptada de [22]).

2. TEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1. El consumo de energía eléctrica global y nacional

En el reporte de la *International Energy Agency 2018*, se menciona que la tasa de crecimiento de consumo de energía eléctrica promedio en el mundo es de 3,3% desde el año 1974 hasta el año 2016 [23]. El sector industrial reporta un 41,6%, el más alto porcentaje de consumo de electricidad, teniendo dicho sector, una tendencia de crecimiento en los años venideros [24].

En México, el consumo de energía eléctrica presenta una tendencia de crecimiento para los próximos años. Análogamente el sector industrial representa un 61% del consumo eléctrico total [25]. Véase Fig. 11.

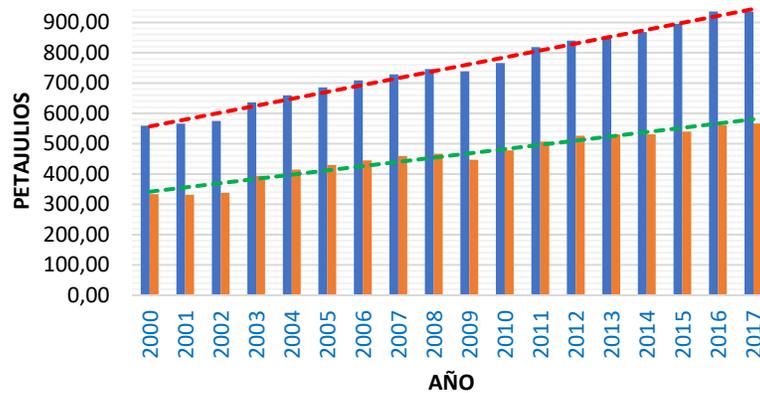


Fig. 11 Consumo energético eléctrico total (en azul) y del sector industrial en México (en naranja). Las líneas punteadas representan las tendencias de consumo en cada caso; imagen adaptada de [25].

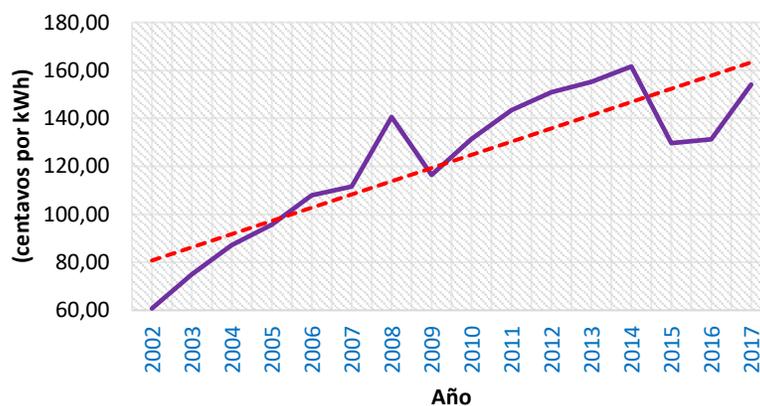


Fig. 12 Precio de la electricidad del sector industrial en México. La línea punteada representa la tendencia (imagen adaptada de [25]).

También, el precio de la energía eléctrica del sector industrial presenta una tendencia de crecimiento medido a partir del año 2002 hasta el 2017. La tasa de crecimiento en el precio de la energía eléctrica en este sector fue del 17% en el último período registrado, del 2016 al 2017 [25]. Véase Fig. 12.

2.2. El estudio del consumo energético en la manufactura aditiva

La manufactura aditiva es un proceso de fabricación que está en continuo crecimiento en lo referente a máquinas, materiales, tecnologías, y esto implica también un crecimiento en la demanda de energía eléctrica [26].

Entre las múltiples áreas de oportunidad y retos que enfrenta el sector de ingeniería de manufactura aditiva se encuentra la reducción del consumo energético de los sistemas de tecnologías aditivas e híbridas [4, 6, 7, 9, 14, 27]. De hecho, el estudio de los procesos energéticos en las tecnologías de manufactura aditiva está contemplado entre los aspectos prioritarios para ser desarrollado en los años actuales y próximos [27, 28]; todo ello con los objetivos de lograr una manufactura aditiva más sustentable [28], desarrollar los métodos para lograr la certificación de aplicaciones de ahorro energético así como validar y certificar las propiedades de los materiales (propiedades mecánicas, eléctricas, etc.) y métodos de aplicaciones mecánicas en general [27], sólo por mencionar algunos. En el panorama de la Fig. 13 y en el mapa de ruta de la Fig. 14 se identifican con línea roja los aspectos prioritarios en el estudio de la MA relacionados con el consumo energético; en la medida en que se aborden estos aspectos desde sus fundamentos, se podrá tener un mejor entendimiento y optimización de los procesos y tecnologías de MA [27, 28].

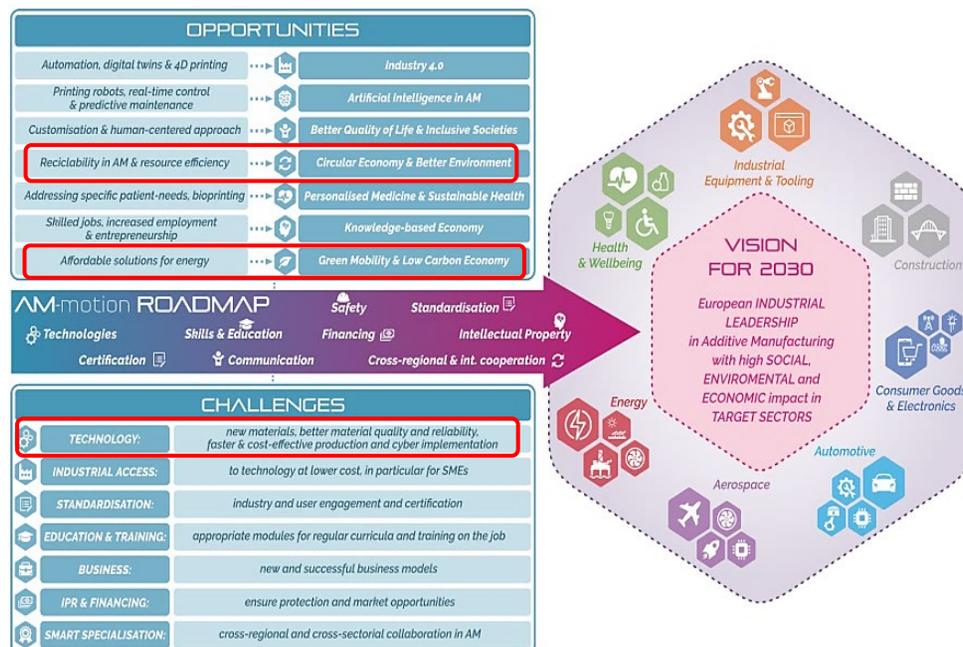


Fig. 13 El estudio del consumo energético en MA dentro de las oportunidades y retos considerados como prioritarios para la sostenibilidad en la manufactura aditiva de los próximos años [28].

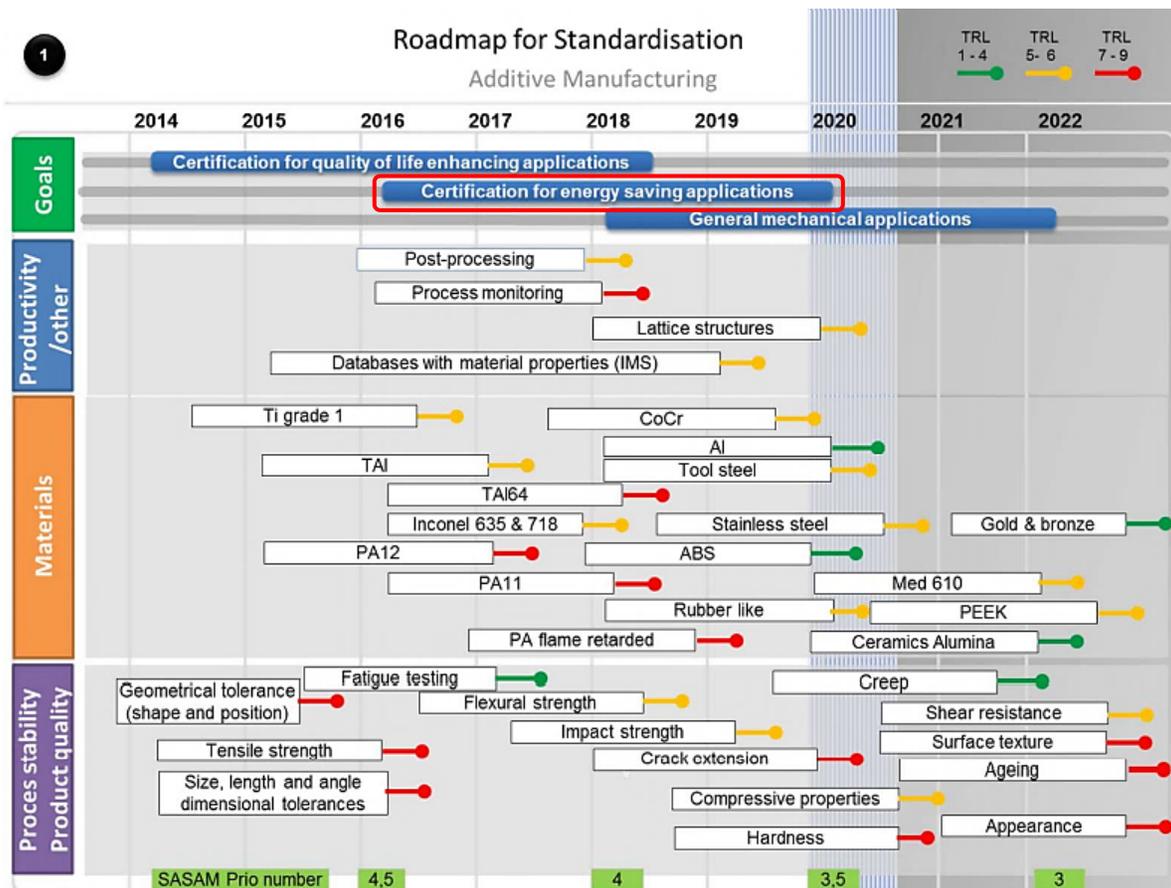


Fig. 14 Mapa de ruta para la normalización en manufactura aditiva [27].

2.3. El consumo energético como tema de estudio

Como se ha dicho en las secciones 1.3 y 1.4, en la manufactura aditiva es posible encontrar beneficios clave sobre otros procesos de fabricación, tales como: calidad, innovación, transformación y reducción del impacto del costo y el tiempo involucrados en el desarrollo del producto y de piezas de repuesto, la reparación, eliminación de herramientas, producción rentable y eficiente de lotes pequeños de piezas, fabricación de piezas personalizadas, forma libre que permite producir piezas muy complejas a bajo costo y tiempo, la eliminación del exceso de materiales, reducción de inventario y reducción de cadena de suministro [10, 18, 29, 30]. Además, la MA tiene el potencial de reducir los recursos, las demandas de consumo de energía y las emisiones de CO₂ [31, 32, 33, 34, 35, 36, 37]. Esto ha motivado a múltiples sectores consumidores y productores de energía a plantear acciones en todos los ámbitos (diseño, reingeniería, optimización, etc.), encaminadas al incremento de la eficiencia en las actividades productivas, con el fin de frenar el consumo energético y contribuir favorablemente en el consecuente impacto ambiental que dichas actividades conllevan. La manufactura aditiva es un método de fabricación con alto potencial de aplicación, es también, uno de los sectores industriales en vía de crecimiento productivo y, por consiguiente, de

demanda energética. Esto implica que sus procesos deban ser estudiados persiguiendo el objetivo de tener una cadena productiva más eficiente [38].

El tema de estudio que se aborda en esta tesis es el estudio del consumo energético de los procesos de manufactura aditiva. Se contribuye, de este modo, a cubrir una parte de las prioridades relacionadas con esta materia a través de la investigación científica. La importancia del estudio de este tema recae en el hecho de que, mediante el conocimiento que emana del desarrollo de esta investigación y que se especifica en la sección del planteamiento del problema de esta tesis, se tendrá un entendimiento detallado del consumo energético y de los aspectos tecnológicos circundantes alrededor de los procesos de manufactura que se estudiarán.

2.4. Revisión de la literatura sobre consumo energético en MA

En MA se involucran diversos fenómenos físicos y químicos para obtener prototipos o piezas funcionales. Para lograrlo, los procesos y los materiales involucrados requieren de energía que, dependiendo de cada caso, debe ser aplicada mediante diversos mecanismos: térmico, luminoso, etc. La cantidad de energía requerida para el procesamiento del material (denominada en este trabajo consumo energético) es uno de los términos que definen la suma total de consumo energético de los sistemas de manufactura. Dicho consumo energético (energía requerida o energía de proceso) es estudiado por su relación con los aspectos económico, social y medioambiental de la sostenibilidad en la industria de la MA [8, 31, 39].

El tiempo y el consumo energético en MA, así como en cualquier proceso de fabricación, son factores críticos a considerar en los sistemas de producción porque definen eficiencia, productividad y costo. Una de las prioridades relacionada con la normalización de métodos, terminología, materiales, etc., referente a la MA en el mundo, está centrada en el tema de la sostenibilidad en MA [27, 28]. Por esta razón, varios investigadores [32, 33, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47] han estado realizando estudios para construir las bases de la ciencia y tecnología de los procesos de MA relacionados con los temas de consumo energético [27, 48].

Con respecto al consumo energético en la MA, algunos autores han estudiado el consumo de energía eléctrica en las etapas de precalentamiento, producción, enfriamiento, etc., en algunos sistemas tecnológicos como: SLS (sinterizado láser selectivo) [40, 41, 42, 43], aglutinado de material [44], y FDM (modelado por deposición fundida) [45]. También se ha comparado el consumo energético entre SLS e IM (inyección de material) [41, 37], y entre procesos sustractivos y aditivos [46]. Otros autores han desarrollado una metodología para calcular el tiempo de construcción (tiempo de manufactura) y la utilización de la capacidad volumétrica de construcción, estimando así, el costo de piezas manufacturadas por los siguientes sistemas: PBF (fusión de cama en polvo) con láser y haz de electrones, y FDM [32, 33]. También, se han probado diferentes máquinas para medir el consumo de energía en las tecnologías FDM y *Polyjet* [47]. Los intervalos de valores de consumo energético específico que se

han medido (en kWh kg⁻¹) para las diferentes tecnologías de MA comprenden lo siguiente [46]: SLS, de 14.5 a 66.02; FDM, de 23.08 a 346.4; SLA, de 20.7 a 41.38; Rociado de aglutinante, de 14.7 a 17.4; DMLS, de 24.2 a 94.17; SLM, de 27 a 163.33; EBM de 17 a 49.17.

También, se han efectuado estudios que revelan la existencia de materiales y tecnologías de MA, las cuales producen piezas con similares módulos de Young, resistencia a la tensión y resistencia al impacto [49, 50].

En la presente investigación, como parte de la revisión de la literatura, se ha elaborado una matriz de materiales, tecnologías y propiedades mecánicas a partir de las fichas técnicas reportadas por los fabricantes de las máquinas de MA [26, 51], identificando materiales que al ser convertidos en piezas mediante diferentes tecnologías de MA, se obtienen propiedades mecánicas similares (resistencia a la tensión y módulo de Young). El estudio de estas dos propiedades mecánicas es vital en el diseño en ingeniería mecánica porque ellas definen el grado de rigidez, resistencia y deformación que tiene un material, sometido a diferentes condiciones de carga [52, 53, 54].

2.5. Planteamiento del problema

En los estudios sobre consumo energético en manufactura aditiva mencionados, los investigadores han medido el consumo de energía eléctrica en diferentes tecnologías por medio de instrumentos de medición o analizadores de energía directamente conectados a las máquinas, de esta forma, determinan la energía eléctrica consumida en cada etapa del proceso (calentamiento, enfriamiento, trabajo, tiempo de espera, etc.). Como resultado, los valores de cantidad de consumo energético total difieren debido a las diferencias de tecnologías, materiales y procesos. La cantidad de consumo energético medido de esta manera es igual a la suma de la energía requerida por el proceso de formación de capa sobre capa (energía de proceso, en lo subsecuente llamada simplemente consumo energético), más la energía consumida por los elementos periféricos y accesorios (véase Fig. 15). Tal medición no distingue el consumo energético del proceso en sí mismo de aquél de los elementos periféricos y accesorios de la máquina.

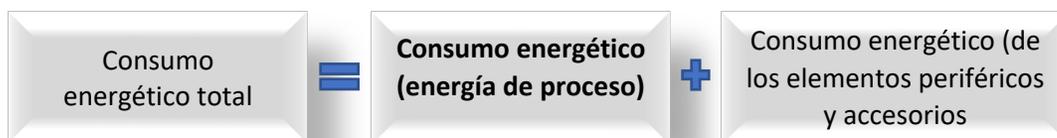


Fig. 15 Consumo energético total expresado como la suma del consumo energético del proceso más el de los elementos periféricos y accesorios.

El desempeño mecánico de las piezas manufacturadas es una de las principales preocupaciones [54] para los diseñadores y fabricantes, y es obligatorio cumplir con los requisitos y las regulaciones de diseño y fabricación. Por esa razón, generalmente, el

desempeño mecánico previsto es el factor clave para seleccionar un material, y los procesos de fabricación son una consecuencia de ello, pero diferentes materiales y procesos podrían cumplir con estos requisitos con diferentes valores de consumo energético.

Adicionalmente, existen modelos generales de expresiones que definen el consumo energético total [55] y aunque éste se ha medido conectando directamente los medidores o analizadores de energía eléctrica a las máquinas de MA, se ha identificado que dichas expresiones no particularizan la relación que existe entre la energía de proceso y las diferentes condiciones de manufactura (parámetros del proceso — espesor de capa, ancho de filamento, velocidad de deposición, velocidad de escaneo, etc. —, y del material — exposición crítica, densidad, capacidad calorífica, etc. —) para cada uno de los procesos estudiados

A partir de dicha situación, se identifica como un área de estudio, a los parámetros del proceso (es decir, sin considerar los elementos periféricos y accesorios) relacionados con el consumo energético cuando se fabrican piezas con propiedades mecánicas similares mediante diferentes tecnologías, materiales y procesos de MA. El proceso es constante independientemente de los elementos periféricos y accesorios, y lo que se busca, es conocer el consumo energético relacionado con dicho proceso constante para comparar y determinar, desde una perspectiva de sostenibilidad, cuál de los procesos de MA es energéticamente más eficiente.

En este contexto, el vocablo “proceso” se define como la etapa en la cual la forma geométrica y las propiedades básicas del producto deseado se alcanzan simultáneamente, esto es, la conversión del material, de un estado de agregación a otro para ser depositado, seleccionado, pegado, curado, etc., obteniendo la formación de la geometría de una capa definida por un área con un cierto espesor y la adhesión de las subsiguientes capas para formar un volumen, es decir la pieza [1]. El estudio expuesto en esta tesis es precisamente la “energía de proceso”, relacionada con los procesos de manufactura aditiva. Como se ha dicho previamente, esta energía de proceso se denomina en lo subsecuente, consumo energético.

En este trabajo se plantea el estudio de tres diferentes procesos de MA para definir la relación entre los parámetros o variables que repercuten en la energía que se requiere para convertir los materiales en piezas y poder comparar qué procesos demandan mayor o menor energía a igualdad de propiedades mecánicas. La Fig. 15 muestra el término del consumo energético (en letra resaltada) identificado para la formulación de la hipótesis de este estudio. Adicionalmente al consumo energético se estudia el tiempo de construcción asociado al proceso de manufactura.

2.6. Hipótesis

Dado que diferentes procesos y materiales para manufactura aditiva permiten producir piezas con propiedades mecánicas similares, el desarrollo de un modelo matemático

que considere los parámetros de construcción y la evaluación del consumo energético, permitirá comparar los consumos energéticos y tiempos de construcción asociados a cada combinación de material, proceso y sus parámetros.

2.7. Objetivo general

Identificar los parámetros que afectan al consumo energético y al tiempo de construcción relacionándolos mediante un modelo matemático, así como evaluar y comparar el consumo energético y el tiempo de construcción que corresponden al proceso de adición de material, capa sobre capa, para los siguientes procesos de manufactura aditiva: extrusión de material (ME), fotopolimerización en tina con láser (VP) y rociado de material (MJ), empleando como herramientas sus respectivas tecnologías FDM, SLA (estereolitografía) y *Polyjet*; considerando la similitud de las propiedades mecánicas de las piezas manufacturadas (resistencia a la tensión y módulo de Young).

2.7.1. Objetivos específicos

Los objetivos específicos relativos a este estudio son los que se enlistan enseguida:

1. Identificar los materiales, procesos y tecnologías de MA así como las propiedades mecánicas que permitan comparar el consumo energético y el tiempo de construcción.
2. Verificar la similitud de las propiedades mecánicas que permiten comparar consumo energético y tiempo de construcción de los procesos.
3. Desarrollar y proponer los modelos matemáticos que definen el consumo energético y el tiempo de construcción en función de los parámetros.
4. Evaluar el consumo energético y determinar la diferencia de los valores obtenidos mediante los modelos matemáticos y la experimentación (instrumentación y medición en las máquinas de MA).
5. Obtener las regiones de consumo energético específico y tasa específica de tiempo de construcción en función del espesor de capa.

2.8. Alcance

Este trabajo tiene como alcance estudiar el consumo energético y el tiempo de construcción sólo en su primer término (véase Fig. 15) sin considerar la energía relacionada con los elementos periféricos y accesorios. El estudio incluye únicamente los procesos: ME, VP y MJ. Se seleccionaron estos procesos por la razón de que son los procesos para los cuales se identificó como vínculo comparativo la similitud de propiedades mecánicas durante la revisión de la literatura sobre materiales, procesos

y propiedades mecánicas. Las propiedades mecánicas que se estudian en este trabajo abarcan solamente la resistencia a la tensión (en el punto de cedencia) y el módulo de Young. Esto es debido a que fueron las propiedades para las cuales, se identificó una similitud en sus intervalos de valores para los materiales, tecnologías y procesos que se seleccionaron. Cabe decir también que los materiales, procesos y tecnologías, se seleccionaron en virtud de los equipos con los que en el MADiT se cuenta. Para este estudio, se considera que existe una similitud entre las propiedades mecánicas de un proceso con respecto a otro, cuando los valores de dichas propiedades estén cercanos, para lo cual, la diferencia entre tales valores sea de máximo un 10%.

3. MODELOS MATEMÁTICOS DE CONSUMO ENERGÉTICO Y TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN

El consumo energético total de cualquier proceso integrado de varios subprocesos (o etapas) es equivalente a la suma de las energías correspondiente a cada uno de tales subprocesos [44, 56]. Matemáticamente esto se define como:

$$\text{Eq. 1} \quad E_T = \sum_{i=1}^m E_i$$

Donde E_T es el consumo energético total, E_i es la energía consumida por los subprocesos i ; $i = 1, 2, 3, \dots, m$; siendo m el número de subprocesos (control, alimentación, procesamiento de material, remoción, etc.) [57]. Esto significa que:

$$\text{Eq. 2} \quad E_T = E_{\text{Proceso}} + E_{\text{Sistema de control}} + E_{\text{Alimentación}} + \dots + E_{\text{Remoción de la pieza}}$$

Dado que el objetivo de este trabajo está orientado hacia el estudio de la energía de proceso, sólo el primer término de la Eq. 2 será analizado considerando que el consumo energético $E = E_{\text{Proceso}}$; por lo tanto, la energía relacionada con los elementos periféricos y accesorios dados por la suma de los otros términos de esa ecuación no se consideran debido a que esos elementos son componentes (rodillos, bombas, circuitos y tarjetas electrónicas, entre otros), dependientes de la máquina para una pieza específica a fabricar, de la eficiencia específica de cada componente seleccionado, etc.

A continuación, se expone el desarrollo de los modelos matemáticos de consumo energético y de tiempo de construcción propuestos en función de los parámetros del proceso y del material para los procesos de MA estudiados.

3.1. Modelos matemáticos del consumo energético y del tiempo de construcción en extrusión de material

En el proceso de extrusión de material, el consumo energético implica los fenómenos que ocurren en la boquilla (extrusor) y se relaciona con la energía calorífica. Es decir, el consumo energético para convertir el material en una pieza está dada por la cantidad de calor transferida de la boquilla hacia el polímero, el cual se encuentra en forma de filamento sólido, tal cual se provee comercialmente. De tal manera que a partir de la Eq. 2, considerando sólo la energía de proceso:

$$\text{Eq. 3} \quad E = E_{\text{Proceso}} = E_{\text{Boquilla}}$$

Donde E es el consumo energético equivalente a la energía de procesamiento del material (polímero), es decir, a la energía calorífica aportada por la boquilla E_{Boquilla} [58].

La ecuación de energía (entalpía) para un proceso de extrusión de polímeros se expresa como [59]:

$$\text{Eq. 4} \quad H = \int_{T_i}^{T_f} C_p dT = C_p(T_f - T_i)$$

Donde C_p es la capacidad calorífica del material, T_f es la temperatura de extrusión, T_i es la temperatura a la cual se alimenta el material.

El flujo de masa que se presenta en la boquilla está expresado por [60]:

$$\text{Eq. 5} \quad \dot{m} = \rho v A_e$$

Donde ρ es la densidad del material, v es la velocidad a la salida de la boquilla (velocidad de deposición) y A_e es la sección transversal de la boquilla a la salida.

Entonces el flujo de calor \dot{q} requerido para la extrusión está dado por la siguiente expresión [59].

$$\text{Eq. 6} \quad \dot{q} = \dot{m} C_p (T_f - T_i) = \rho v_e A_e C_p (T_f - T_i)$$

Este flujo es suministrado por la boquilla. Cuando el material es extrudido, el flujo \dot{q}_l por unidad de área hacia adentro de la boquilla con sección transversal A_n , longitud L , y velocidad de alimentación v_n , se expresa como [61, 62]:

$$\text{Eq. 7} \quad \dot{q}_l = \frac{\rho v_n A_n C_p}{\pi D L} (T_f - T_i)$$

Donde D es el diámetro interno a la entrada de la boquilla. Dado que el flujo de masa a la entrada es el mismo que el de la salida, la relación entre las velocidades y áreas en dichas zonas es [60]:

$$\text{Eq. 8} \quad v A_e = v_n A_n$$

Dado que las velocidades de alimentación y de deposición están sincronizadas con el fin de garantizar un flujo de deposición uniforme [61, 63, 64], se considera a v como constante. Considérese al área proyectada A de una capa de construcción sólida (sin espacio entre filamentos), h el espesor de capa, y w el ancho de filamento, véase Fig. 16.

Como se sabe, la velocidad se define como:

$$\text{Eq. 9} \quad v = \frac{L_T}{t_l}$$

La distancia L_T es la distancia total de los filamentos extrudidos (con un ancho de filamento w y espesor de capa h) que forman la capa. El tiempo de deposición de dicha capa es t_l . El área proyectada A de la capa es:

$$\text{Eq. 10} \quad A = XY$$

Donde X es la base y Y la altura de la capa.

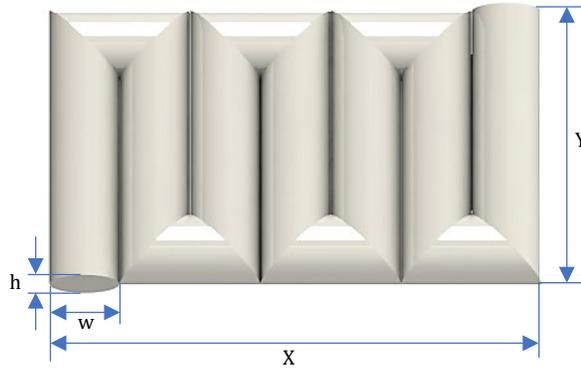


Fig. 16 Formación de capas en extrusión de material.

La longitud L_T está dada por la suma del número de filamentos n (de ancho w , espesor h y longitud Y), requeridos para completar la base X .

$$\text{Eq. 11} \quad L_T = nY$$

$$\text{Eq. 12} \quad n = \frac{X}{w}$$

De donde al combinar la Eq. 11 con la Eq. 12 resulta:

$$\text{Eq. 13} \quad L_T = \frac{XY}{w} = \frac{A}{w}$$

Y al utilizar la Eq. 13 en la Eq. 9 y despejar a t_l se obtiene el tiempo de construcción de la capa:

$$\text{Eq. 14} \quad t_l = \frac{A}{wv}$$

Entonces, el consumo energético por capa E_l estará determinada por:

$$\text{Eq. 15} \quad E_L = \dot{q}t_l$$

Combinando la Eq. 6 y la Eq. 14 con la Eq. 15 en términos del diámetro d de la boquilla a la salida se obtiene la energía de proceso por capa mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Eq. 16} \quad E_L = \frac{\pi \rho d^2 C_p (\Delta T) A}{4w}$$

Ahora, para una pieza con una altura Z , el número de capas está dado por:

$$\text{Eq. 17} \quad N = \frac{Z}{h}$$

Por lo tanto, el consumo energético para la construcción de una pieza mediante extrusión de material estará determinado por la suma del consumo energético de cada capa, de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$\text{Eq. 18} \quad E = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} \left(\frac{\pi \rho d^2 c_p (\Delta T)}{4w} \right) A_j$$

Donde $j = 1, 2, 3, \dots, N$. Aquí j representa a cada una de las capas y N el número total de ellas. Cabe decir que el número de capas es discreto, o sea, N debe ser un número entero positivo, por lo que el cociente, en caso de no ser así, debe ser redondeado hasta el entero siguiente.

El tiempo de construcción está determinado por la siguiente ecuación.

$$\text{Eq. 19} \quad t = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} \left(\frac{1}{wv} \right) A_j$$

3.2. Modelos matemáticos del consumo energético y del tiempo de construcción en fotopolimerización en tina con láser

En el proceso de fotopolimerización en tina (VP) con láser es necesario considerar la manera en la que la energía luminosa del láser $E_{Láser}$ incide sobre la resina. De tal manera que el consumo energético E en VP, a partir de la Eq. 2 se define como:

$$\text{Eq. 20} \quad E = E_{Proceso} = E_{Láser}$$

Para determinar este consumo energético se asume lo siguiente: a) la resina obedece a la ley de absorción exponencial de Beer-Lambert; b) la irradiancia presenta una distribución de Gauss y, c) la transición de la resina de la fase líquida a la sólida se llama punto de gel [65].

La expresión para determinar la exposición $E(x,y)$ (energía radiante por unidad de área) es la siguiente [65]:

$$\text{Eq. 21} \quad E(y, z) = \frac{\left(\frac{z}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}{wv} P_L e^{-\left(\frac{z}{D_p} + \frac{2y^2}{w^2}\right)}$$

Donde w es el radio del punto focal del rayo láser (spot) con una distribución de Gauss que incide sobre la resina [16], v es su velocidad de escaneo o barrido, P_L es su potencia al incidir sobre la resina y D_p es profundidad de penetración de la resina, con la cual se reduce la irradiancia (potencia radiante por unidad de área) a $1/e$ (cerca del 37%) con respecto a la superficie de incidencia [65]. Las literales y, z , denotan las coordenadas de cualquier punto en un sistema cartesiano en el que, cuando toman el valor cero,

representan el centro del diámetro del rayo láser incidente sobre la resina; en ese caso, la exposición E_m es [65]:

$$\text{Eq. 22} \quad E_m = \frac{\left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}{wv} P_L$$

Existe adicionalmente, en la resina otra propiedad llamada exposición crítica E_c , la cual se define como la exposición a la cual se alcanza el punto de gel, o sea la resina pasa del estado de agregación líquido al sólido; por lo que en función de la profundidad de curado de la resina C_d , de la exposición crítica y de la profundidad de penetración, la exposición se relaciona según la siguiente expresión [2, 65], la cual, es conocida como la ecuación general de fotopolimerización [66]:

$$\text{Eq. 23} \quad E_m = E_c e^{\frac{C_d}{Dp}}$$

Al combinar la Eq. 22 con la Eq. 23 y dejar la expresión en función de la potencia del rayo láser incidente sobre la resina se obtiene:

$$\text{Eq. 24} \quad P_L = \frac{E_c e^{\frac{C_d}{Dp}} wv}{\left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

La Fig. 17 muestra el área A definida por X y Y . El láser cura dicha área mediante el escaneo o barrido, línea por línea como se ilustra en dicha figura para formar un entramado. Cada línea es recorrida con un espaciamiento de entramado s , a una velocidad v [65].

El tiempo de fotopolimerización de cada línea está dada por:

$$\text{Eq. 25} \quad t_s = \frac{X}{v}$$

El número total de líneas está dado por:

$$\text{Eq. 26} \quad N_s = \frac{Y}{s}$$

Por lo que el tiempo para construir la capa completa está dado por:

$$\text{Eq. 27} \quad t_l = \frac{Y X}{s v} = \frac{A}{sv}$$

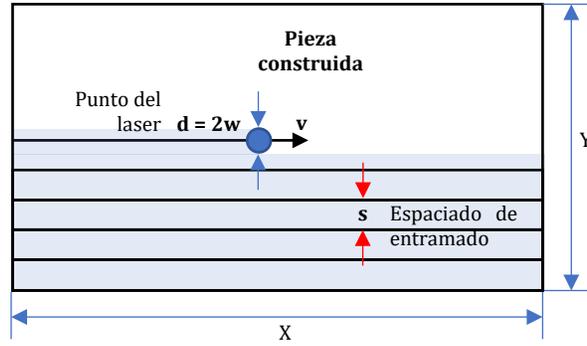


Fig. 17 Escaneado del rayo láser en VP.

El consumo energético para construir una capa, E_L , estará dado por el producto de la potencia por el tiempo, es decir, de la Eq. 24 y la Eq. 27:

$$Eq. 28 \quad E_L = \frac{C_d}{E_c e^{D_p} w A} \frac{1}{\left(\frac{2}{\pi}\right)^2 s}$$

Por lo tanto, el consumo energético para la construcción de una pieza mediante fotopolimerización en tina con láser estará determinado por la suma del consumo energético de cada capa, de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$Eq. 29 \quad E = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} \left(\frac{C_d}{w E_c e^{D_p}} \frac{1}{s \sqrt{\frac{2}{\pi}}} \right) A_j$$

Donde $j = 1, 2, 3, \dots, N$. Aquí j representa a cada una de las capas y N el número total de ellas. Cabe decir que el número de capas es discreto, o sea, N debe ser un número entero positivo, por lo que el cociente, en caso de no ser así, debe ser redondeado hasta el entero siguiente. El espesor de capa h debe ser mucho menor que la profundidad de curado C_d con la finalidad de evitar regiones sin curar, toda vez que las líneas curadas en tercera dimensión presentan geoméricamente una forma de cilindro parabólico, por lo que al juntarse o superponerse, pueden generarse espacios en los cuales la luz del rayo láser no alcance a penetrar dejando resina sin curar, si el espesor de capa y el espaciado de entramado no se seleccionan apropiadamente para minimizar dichas regiones; por ende, h y s son controlados y programados adecuadamente por los proveedores de las tecnologías [67].

Análogamente, el tiempo de construcción está determinado por la siguiente ecuación.

$$Eq. 30 \quad t = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} \left(\frac{1}{sv} \right) A_j$$

3.3. Modelos matemáticos del consumo energético y del tiempo de construcción en rociado de material

En el proceso de rociado de material, el análisis involucra el fenómeno de fotopolimerización que ocurre cuando la resina ha sido depositada (rociada) sobre la plataforma de construcción. Dicho fenómeno se relaciona con la energía por radiación ultravioleta (UV) que incide sobre la superficie de resina depositada para ser solidificada. Dicho de otro modo, el consumo energético para convertir la resina líquida en una pieza sólida estará dado por la cantidad de luz ultravioleta requerida en cada una de las capas para completar la pieza. A partir de la Eq. 2:

$$\text{Eq. 31} \quad E = E_{\text{Proceso}} = E_{\text{Luz UV}}$$

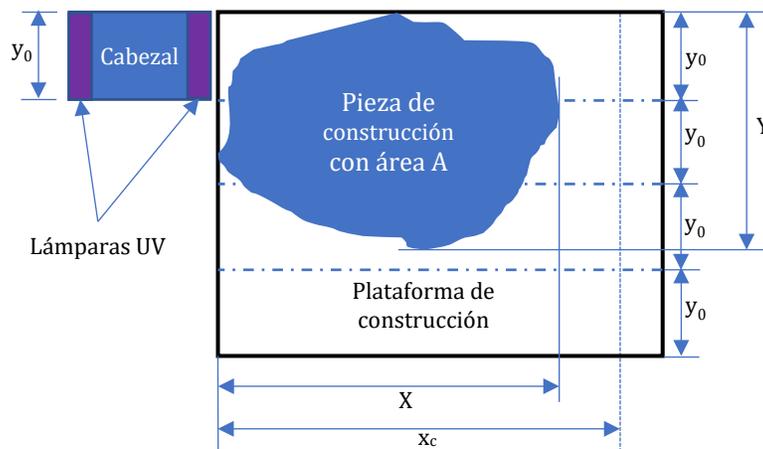


Fig. 18 Formación de capas en rociado de material.

Para determinar la energía de proceso, se considera el área proyectada A de cada capa, definida por X y por Y , véase Fig. 18. La exposición requerida para alcanzar la conversión y el espesor, $E_{c,h}$, se define como la cantidad de luz UV por unidad de área necesaria para lograr la fotopolimerización de la resina con espesor h depositada sobre la plataforma de construcción, y está definida por la naturaleza de los componentes químicos de la resina líquida; por lo que los fabricantes de las tecnologías de MA consideran esto para el control y programación del espesor de capa y de la cantidad de radiación UV emitida por las lámparas [68, 69].

El consumo energético para lograr la fotopolimerización de una capa con área A está dado por la siguiente expresión:

$$\text{Eq. 32} \quad E_l = E_{c,h}A$$

Entonces, el consumo energético para lograr la fotopolimerización de todas las capas de la pieza será la determinado por la siguiente ecuación:

$$\text{Eq. 33} \quad E = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} (E_{c,h}) A_j$$

Donde $j = 1, 2, 3, \dots, N$. La literal j representa a cada una de las capas y N el número total de ellas. El número de capas es discreto, o sea, N debe ser un número entero positivo, por lo que el cociente, en caso de no ser así, debe ser redondeado hasta el entero siguiente.

Ahora bien, el tiempo de construcción de cada capa dependerá de la velocidad del cabezal v , de la carrera del cabezal x_c , del ancho del cabezal y_0 , del ancho de la capa Y , y del número de carreras necesarias m para curar cada capa. Este proceso trabaja por bandas, es decir cada banda está definida por el ancho del cabezal (el cual incluye rociadores y lámparas) y_0 , y por la carrera del cabezal x_c , la cual, debe ser mayor que el largo de la capa X , toda vez que el cabezal se desplaza efectuando una carrera a lo largo del eje X , pasando más allá de la distancia X . El cociente de x_c entre v define el tiempo de cada carrera, mientras que el cociente de Y entre y_0 define el número de bandas necesarias para cubrir todo el ancho de la capa; este cociente debe ser un número entero positivo, por lo que, de no serlo, deberá redondearse hacia arriba hasta el entero siguiente. Por lo tanto, el tiempo t_l para curar una capa completa estará definido de la siguiente manera:

$$\text{Eq. 34} \quad t_l = \frac{x_c}{v} \frac{Y}{y_0} m$$

De donde se infiere que el tiempo de construcción para lograr la fotopolimerización de cada una de las capas j , hasta completar la pieza completa está determinado por la siguiente ecuación:

$$\text{Eq. 35} \quad t = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} \left(\frac{x_c}{v} \frac{Y}{y_0} m \right)_j$$

3.4. Síntesis de las ecuaciones de energía de proceso y tiempo de construcción para los procesos de MA: ME, VP y MJ

En la Tabla 2 se muestran las ecuaciones de consumo energético el tiempo de construcción para los procesos estudiados. También se expresa la nomenclatura relativa a cada uno de los parámetros involucrados.

	Extrusión de material	Fotopolimerización en tina con láser	Rociado de material
Consumo energético	Eq. 18 $E = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} \left(\frac{\pi \rho d^2 C_p (\Delta T)}{4w} \right) A_j$	Eq. 29 $E = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} \left(\frac{w E_c e^{\frac{C_d}{D_p}}}{s \sqrt{\frac{2}{\pi}}} \right) A_j$	Eq. 33 $E = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} (E_{c,h}) A_j$
Tiempo de construcción	Eq. 19 $t = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} \left(\frac{1}{wv} \right) A_j$	Eq. 30 $t = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} \left(\frac{1}{sv} \right) A_j$	Eq. 35 $t = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} \left(\frac{x_c}{v} \frac{Y}{y_0} m \right)_j$
Literales	<i>E</i> : Consumo energético <i>t</i> : Tiempo de construcción	<i>E</i> : Consumo energético <i>t</i> : Tiempo de construcción	<i>E</i> : Consumo energético <i>t</i> : Tiempo de construcción
Parámetros del proceso	<i>d</i> : Diámetro de la boquilla <i>w</i> : Ancho de filamento <i>N</i> : Número de capas = Entero próximo redondeado hacia arriba (Z/h) <i>h</i> : Espesor de capa <i>v</i> : Velocidad de deposición	<i>w</i> : Radio de punto del láser (de distribución de Gauss) <i>N</i> : Número de capas = Entero próximo redondeado hacia arriba (Z/h) <i>h</i> : Espesor de capa <i>C_d</i> : Profundidad de curado <i>v</i> : Velocidad de escaneo del láser <i>s</i> : Espaciamiento de entramado	<i>N</i> : Número de capas = Entero próximo redondeado hacia arriba (Z/h) <i>h</i> : Espesor de capa <i>v</i> : Velocidad del cabezal <i>x_c</i> : Carrera del cabezal <i>y₀</i> : Ancho del cabezal <i>Y</i> : Ancho de la capa <i>j</i> <i>m</i> : Número de carreras por capa
Parámetros del material	<i>ρ</i> : Densidad <i>C_p</i> : Capacidad calorífica <i>ΔT</i> : Cambio de temperatura = Temperatura de extrusión – temperatura medioambiental	<i>E_c</i> : Exposición crítica <i>D_p</i> : Profundidad de penetración	<i>E_{c,h}</i> : Exposición requerida para alcanzar la conversión y el espesor <i>h</i>
Parámetros geométricos	<i>A</i> : Área proyectada (de cada capa, <i>j</i>) <i>Z</i> : Altura de la pieza	<i>A</i> : Área proyectada (de cada capa, <i>j</i>) <i>Z</i> : Altura de la pieza	<i>A</i> : Área proyectada (de cada capa, <i>j</i>) <i>Z</i> : Altura de la pieza

Tabla 2 Ecuaciones de energía de proceso y tiempo de construcción para ME, VP y MJ y nomenclatura de los parámetros.

4. VERIFICACIÓN DE LA SIMILITUD DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Este capítulo tiene como objetivo exponer la validación de la similitud de las propiedades mecánicas en piezas construidas mediante los tres procesos de manufactura seleccionados.

4.1. Materiales y métodos para ensayo de tensión

La verificación de la similitud de las propiedades mecánicas se llevó a efecto mediante la prueba de tensión. La geometría de las probetas se manufacturó de acuerdo con lo establecido con la norma ISO 527-2 / ASTM D638, la cual, se aplica en polímeros y ha sido empleada para piezas poliméricas fabricadas por manufactura aditiva [58, 70].

Se fabricaron 10 probetas tipo I [71] con cada uno de los materiales seleccionados para cada proceso siendo en total 30 probetas: 10 para ME, 10 para VP y 10 para MJ.

La prueba se realizó empleando una máquina universal de ensayos a tensión Shimadzu AGS-X 50kN a una velocidad de 5 mm/min y con una celda de carga de 50 kN. Véase Fig. 19.



Fig. 19 Ensayo de tensión de las probetas

Las probetas fueron fabricadas con los materiales y las máquinas que se especifican en la Tabla 3. Cabe mencionar que estos materiales fueron seleccionados a partir de los datos sobre las características técnicas proporcionados por los fabricantes de los materiales y de las máquinas. De acuerdo con dicha información, las piezas fabricadas mediante estos materiales y tecnologías de manufactura aditiva tendrán una resistencia a la tensión similar y un módulo de Young similar, por lo que se procedió a seleccionarlos y verificar la similitud mediante este análisis experimental.

Proceso de MA	Tecnología	Máquina	Material
Extrusión de material	FDM	Stratasys Fortus 400	PC
Rociado de material	Polyjet	Stratasys Objet Connex 500	RIGUR RGD450
Fotopolimerización en tina con láser	SLA	DWS 020X	DL260

Tabla 3 Materiales y máquinas usados para la fabricación de las probetas sometidas a ensayo de tensión.

La construcción de las probetas fue realizada de acuerdo con los parámetros predeterminados por los fabricantes Stratasys [72, 73] y por DWS [74].

4.2. Resultados de los ensayos de tensión

Los resultados del ensayo de tensión realizado a las probetas para verificar la similitud de propiedades mecánicas, resistencia a la tensión y módulo de Young se sintetizan en las gráficas de la Fig. 20.

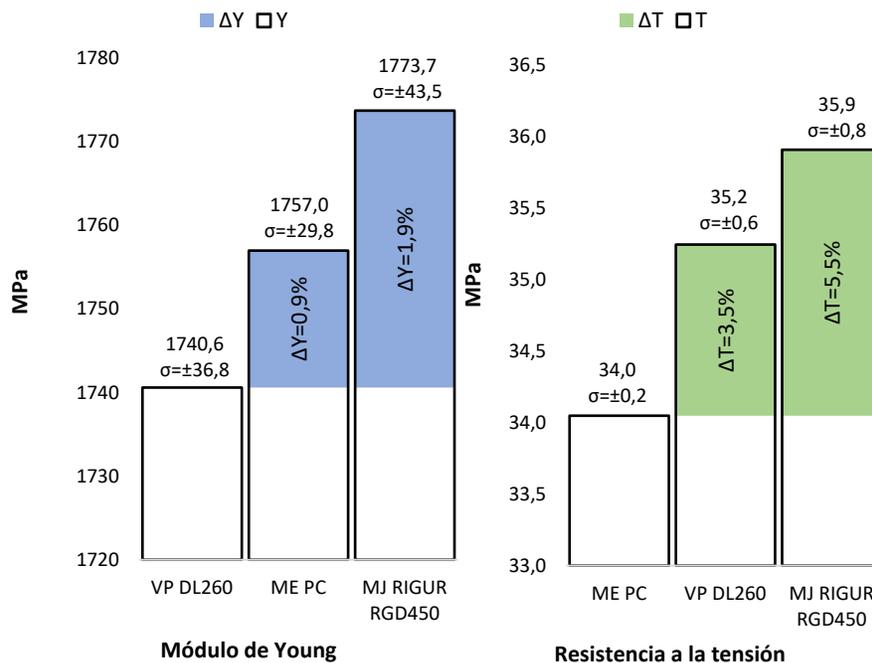


Fig. 20 Resultados del ensayo de tensión para la verificación de la similitud de las propiedades mecánicas.

Los resultados muestran que las diferencias de la resistencia a la tensión entre los diferentes procesos de manufactura aditiva, así como los respectivos módulos de Young, son menores al 10%. De donde se concluye a través de esta verificación que, en efecto, los valores de las propiedades mecánicas son cercanos y por lo tanto las propiedades mecánicas de las piezas resultantes son similares.

5. EVALUACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DEL TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN

En este capítulo se explica cómo se llevó a cabo la medición del consumo energético y del tiempo de construcción. El objetivo fue instrumentar las máquinas seleccionadas (véase Tabla 3) para medir el consumo energético directamente mientras se realiza la manufactura de especímenes diseñados para tal efecto. A través de esta experimentación se determinó el **consumo energético específico**, el cual **se define como la energía por unidad de volumen** [46]; esto permite comparar los consumos energéticos entre los diferentes procesos de MA sin importar la diferencia en las dimensiones de los especímenes de cada combinación material-proceso-geometría.

5.1. Experimentación en el proceso de extrusión de material

Se detalla en esta sección, la metodología efectuada para medir el consumo energético y el tiempo de construcción en el proceso de extrusión de material, así como los resultados obtenidos.

5.1.1. Métodos y materiales para el proceso de extrusión de material

Para realizar la medición del consumo energético, se empleó la tecnología FDM. En primer lugar, se instrumentó el cabezal de extrusión de una máquina Stratasys Fortus 400, con el objetivo de medir la energía eléctrica consumida por la resistencia que suministra la energía para alcanzar la temperatura necesaria a la boquilla de material de modelo, que es donde toma lugar la extrusión. Véase Fig. 21.



Fig. 21 Instrumentación para la energía de proceso en ME. Izquierda, detalle del conector eléctrico de la boquilla de material de modelo. Derecha, cabezal instrumentado y listo para la medición.

El aparato para medir la energía fue un analizador de calidad de energía Fluke 435 II, con el cual, fue posible obtener registros de la potencia por intervalos de 250 ms; de esta manera los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente para obtener el

consumo energético durante la construcción de los especímenes. Véase Fig. 22. El tiempo de construcción también se midió con ayuda de este mismo equipo.

En lo que respecta a los materiales para la fabricación de los especímenes, se empleó policarbonato (PC) de Stratasys. Los especímenes fueron diseñados en forma de prisma rectangular con las siguientes dimensiones para facilitar la obtención de la medida de energía por unidad de volumen: 141.5 mm x 141.5 mm x 2.54 mm, véase Fig. 23. Se manufacturaron tres especímenes con cada una de las boquillas: T12, T16 y T20, lo que corresponde a los espesores de capa: 0.178, 0.254 y 0.330 mm, respectivamente.

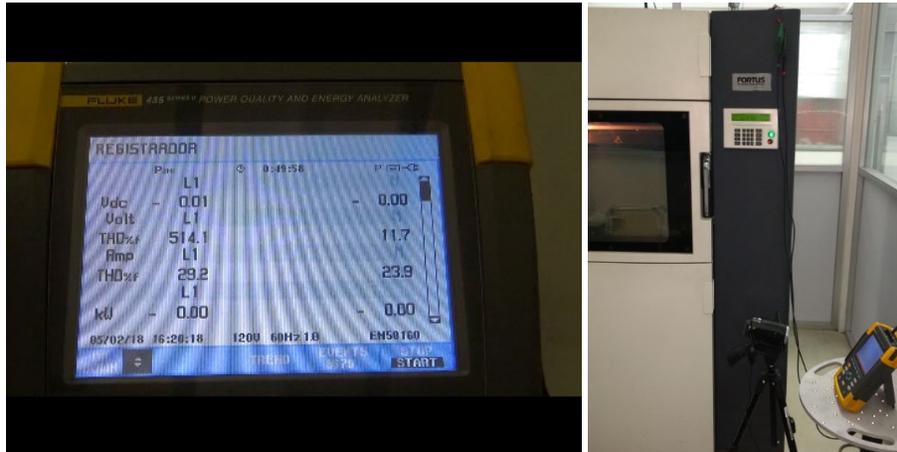


Fig. 22 Medición y registro mediante aparato analizador de la calidad de energía (izquierda) durante la construcción de los especímenes (derecha).

Los demás parámetros de proceso para todas las construcciones son: ancho de filamento 0.5 mm, espacio entre filamentos 0 mm, y ángulo de filamento 45°/-45°. Adicionalmente, otros parámetros tales como la velocidad de deposición y la temperatura de extrusión, también fueron medidos (ésta fue obtenida directamente de la lectura que la máquina despliega en su pantalla) así como los diámetros de las boquillas utilizadas.

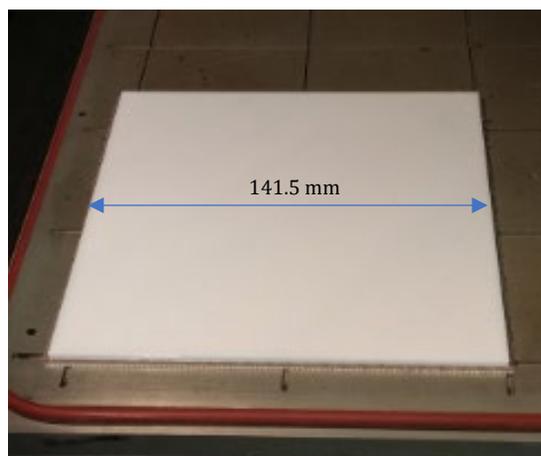


Fig. 23 Especimen construido mediante el proceso de ME.

5.1.2. Resultados del consumo energético y del tiempo de construcción en el proceso de extrusión de material

En la Tabla 4 se muestran los resultados de la medición del consumo energético y del tiempo de construcción obtenidos mediante la experimentación con proceso de extrusión de material.

Magnitud	Boquilla T20	Boquilla T16	Boquilla T12
Potencia calorífica en la boquilla (W)	12.274	12.157	12.010
Desviación estándar de la potencia (W)	0.015	0.018	0.029
Tiempo de construcción (s)	2 677.00	2 216.75	2 875.00
Consumo energético (J)	32 857.50	26 949.03	34 528.75
Desviación estándar del consumo energético (J)	42.768	36.328	83.298
Volumen de la construcción (cm ³)	50.86	50.86	50.86
Consumo energético específico (J/cm ³)	646.08	529.90	678.94
Tiempo específico de construcción (min/cm ³)	0.877	0.726	0.942
Tasa específica de tiempo de construcción (cm ³ /min)	1.13985	1.37652	1.06135

Tabla 4 Resultados de la medición del consumo energético y del tiempo de construcción en ME.

5.2. Experimentación en el proceso de fotopolimerización en tina con láser

Se detallan a continuación, los métodos y materiales empleados para la medición del consumo energético y del tiempo de construcción en el proceso de fotopolimerización en tina con láser. También se muestran los resultados obtenidos.

5.2.1. Métodos y materiales para el proceso de fotopolimerización en tina con láser

Se empleó como herramienta la tecnología SLA con la máquina DWS 020X. De acuerdo con la información técnica del fabricante, esta máquina posee una unidad de láser Solid State BluEdge 1500 que mantiene constante la potencia del rayo UV incidente sobre la superficie de la resina que se encuentra en la tina de construcción de la máquina. El rayo láser de esta máquina presenta un diámetro de punto incidente con distribución de Gauss de 50 micrómetros [75]. La máquina empleada para la construcción de los especímenes de estudio se muestra en la Fig. 24.

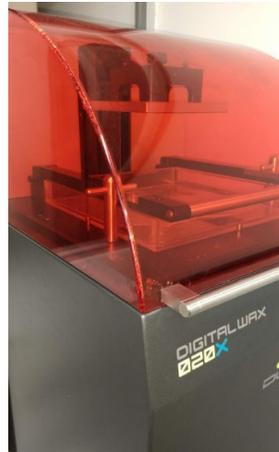


Fig. 24 Máquina empleada para la medición de la energía de proceso en VP.

Para determinar el consumo energético, se implementó un experimento que permite medir tanto el tiempo de construcción como la potencia del rayo láser incidente sobre la superficie de la resina. Para la medición de la potencia se utilizó un medidor de potencia Newport modelo 2832-C, con la respectiva conexión del sensor Newport modelo 818-UV. Véase Fig. 25.



Fig. 25 Medición de la potencia del láser con el sensor (izquierda) y el medidor (derecha).

Para tal medición, se diseñaron y construyeron tres geometrías en forma prismática rectangular, con el fin de facilitar el cálculo de la energía de proceso medida por unidad de volumen con las dimensiones de 50 mm x 50 mm x 10 mm, véase Fig. 26. Los parámetros de proceso fueron los preestablecidos por el fabricante de la máquina, los cuales son: espesor de capa, 0.040 mm; velocidad de escaneo del láser, 4.6 m/s; y espaciamiento de entramado, 0.070 mm. El material empleado para la fabricación de los especímenes fue la resina DL260.

El tiempo de construcción de cada capa fue tomado directamente de la lectura que se despliega mediante el *software* de la máquina.



Fig. 26 Espécimen construido mediante el proceso de VP.

5.2.2. Resultados del consumo energético y del tiempo de construcción en el proceso de fotopolimerización en tina con láser

En la Tabla 5 se muestran los resultados de la medición del consumo energético y de tiempo de construcción obtenidos mediante la experimentación con el proceso de fotopolimerización en tina con láser.

Magnitud	Valor medido
Potencia del láser (mW)	50
Desviación estándar de la potencia del láser (mW)	1.761
Tiempo de construcción (s)	4202.69
Consumo energético (J)	210.134
Desviación estándar de consumo energético (J)	4.616
Volumen de construcción (cm ³)	25
Consumo energético específico (J/cm ³)	8.41
Tiempo específico de construcción (min/cm ³)	2.80
Tasa específica de tiempo de construcción (cm ³ /min)	0.35691

Tabla 5 Resultados de la medición del consumo energético y del tiempo de construcción en VP.

5.3. Experimentación en el proceso de rociado de material

En este apartado se describen los métodos y materiales empleados en la experimentación para la medición del consumo energético y del tiempo de construcción en el proceso de rociado de material. También se muestran los resultados obtenidos de dichas mediciones.

5.3.1. Métodos y materiales para el proceso de rociado de material

Para este proceso, se midió el consumo energético utilizando como herramienta la tecnología *Polyjet* con la máquina Stratasys Connex3 Objet500. En la Fig. 27 se muestra la máquina empleada, así como el detalle del cabezal de rociado de material, correspondiente a dicha máquina.



Fig. 27 Máquina empleada para la medición del consumo energético en MJ (izquierda). Detalle del cabezal de rociado de material (derecha).

Para este caso, lo que se midió fue la exposición, que es la energía por unidad de área que incide sobre la resina rociada sobre la plataforma de construcción. Dicha energía está dada por las lámparas, que están calibradas para mantener una emisión de luz UV uniforme que incide sobre la resina. La cantidad de energía por unidad de área que incide sobre el material en cada capa, depende del modo en el que la máquina esté programada: *digital materials* (DM, materiales digitales), *high speed* (HS, alta velocidad) y *high quality* (HQ, calidad alta). Los espesores de capa correspondientes a los dos primeros modos son de 0.030 mm, mientras que para el tercero es de 0.016 mm. Así que para cada una de estas modalidades de construcción se midió la exposición de radiación UV mediante un radiómetro/dosímetro G&R Labs modelo 221. Véase Fig. 28.



Fig. 28 Radiómetro utilizado para la medición de la exposición de luz UV.

El material que se seleccionó para fabricar los especímenes fue el RIGUR RGD450. Tres especímenes por cada modalidad (HQ, HS y HQ) fueron diseñados y construidos con forma prismática para facilitar la medición de la energía por unidad cúbica. Las dimensiones de los especímenes fueron 10 x 10 x 10 mm. Véase Fig. 29.

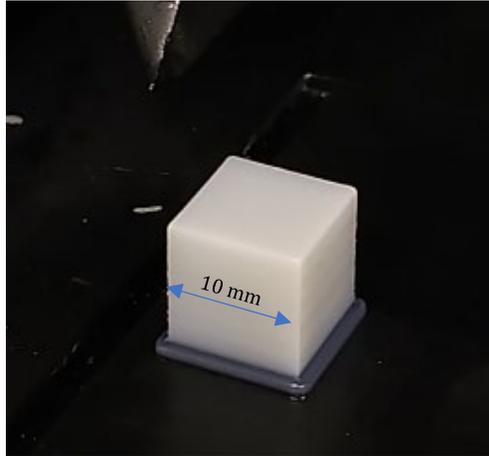


Fig. 29 Espécimen construido mediante el proceso de MJ.

Durante la etapa de construcción de los especímenes se midieron también otros parámetros como la velocidad del cabezal, la carrera del cabezal, y el ancho del mismo. El tiempo de construcción también se midió mediante la ayuda del contador de tiempo de construcción de cada capa que el *software* de la máquina va desplegando en la medida que se va realizando la manufactura de la pieza.

5.3.2. Resultados del consumo energético y del tiempo de construcción en el proceso de rociado de material

Los resultados obtenidos de la medición del consumo energético y del tiempo de construcción en el proceso de rociado de material se despliegan en la Tabla 6.

Magnitud	Modo: DM	Modo: HS	Modo: HQ
Exposición (mJ/cm ²)	10.43	12.58	10.97
Desviación estándar de la exposición (mJ/cm ²)	0.104	0.044	0.145
Tiempo de construcción (s)	18	18	18
Consumo energético (J)	3.48	4.20	6.85
Consumo energético específico (J/cm ³)	3.48	4.20	6.85
Tiempo específico de construcción (min/cm ³)	18	18	18
Tasa específica de tiempo de construcción (cm ³ /min)	0.056	0.056	0.056

Tabla 6 Resultados de la medición del consumo energético y del tiempo de construcción en MJ.

6. ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DEL TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN

En este capítulo se lleva a cabo una comparación entre los tres procesos de manufactura aditiva seleccionados considerando sus consumos energéticos y sus tasas específicas de tiempos de construcción. En primer lugar, se aplican las ecuaciones correspondientes a los modelos matemáticos propuestos en la sección 3.4; posteriormente, a partir de dichos resultados se determina el margen de error entre los resultados obtenidos al aplicar los modelos matemáticos y los obtenidos mediante la experimentación. Después se realiza una discusión sobre la proyección de regiones de consumo energético específico y tasa específica de tiempo de construcción (definida como el volumen construido o manufacturado aditivamente por unidad de tiempo) aplicando los modelos matemáticos y variando el espesor de capa. Para finalizar la sección se realiza la discusión de los resultados de la investigación: sobre la similitud de las propiedades mecánicas, sobre el consumo energético y sobre el tiempo de construcción para los tres procesos estudiados, así como sobre el impacto que tienen los parámetros en la prospectiva tecnológica.

6.1. Aplicación de los modelos matemáticos de consumo energético y tiempo de construcción

Para estimar el consumo energético y el tiempo de construcción a partir de los modelos matemáticos propuestos se consideraron los parámetros que se detallan en la Tabla 7.

En cuanto a los parámetros del material, éstos se utilizaron los reportados en las fichas técnicas de los fabricantes, así como de las bases de datos de materiales poliméricos que se encuentran disponibles en diversas fuentes [72, 73, 74, 75, 76, 77]. Los materiales considerados fueron los mismos empleados para la medición del consumo energético y del tiempo de construcción descritos en la Tabla 3.

Los parámetros referentes al proceso de ME fueron los preestablecidos por el fabricante, a excepción del ancho de filamento, que fue de 0.5 mm para las tres boquillas utilizadas; mientras que, las velocidades de deposición, fueron determinadas durante la experimentación para la medición del consumo energético y del tiempo de construcción. Los parámetros de proceso para VP y MJ fueron los preestablecidos por el fabricante.

Respecto a las probetas de las que se tomaron los parámetros geométricos, se consideraron las empleadas para la medición de la energía de proceso y del tiempo de construcción, los cuales se han mostrado en la Fig. 23, en la Fig. 26, y en la Fig. 29.

	Extrusión de material	Fotopolimerización en tina con láser	Rociado de material
Consumo energético	Eq. 18 $E = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} \left(\frac{\pi \rho d^2 C_p (\Delta T)}{4w} \right) A_j$	Eq. 29 $E = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} \left(\frac{w E_c e^{\frac{C_d}{D_p}}}{s \sqrt{\frac{2}{\pi}}} \right) A_j$	Eq. 33 $E = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} (E_{c,h}) A_j$
Tiempo de construcción	Eq. 19 $t = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} \left(\frac{1}{wv} \right) A_j$	Eq. 30 $t = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} \left(\frac{1}{sv} \right) A_j$	Eq. 35 $t = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} \left(\frac{x_c y}{v y_0} m \right)_j$
Parámetros del proceso	<i>d</i> : Diámetro de la boquilla = 0.5; 0.4; 0.3 mm (T20, T16, T12, respectivamente) <i>w</i> : Ancho de filamento = 0.5 mm <i>N</i> : Número de capas = Entero próximo redondeado hacia arriba (Z/h) = 8; 10; 15 (T20, T16, T12, respectivamente) <i>h</i> : Espesor de capa = 0.33; 0.254; 0.178 mm (T20, T16, T12, respectivamente) <i>v</i> : Velocidad de deposición = 0.12; 0.18; 0.207 m/s (T20, T16, T12, respectivamente)	<i>w</i> : Radio de punto del láser (de distribución de Gauss) 0.025 mm <i>N</i> : Número de capas = Entero próximo redondeado hacia arriba (Z/h) = 250 <i>h</i> : Espesor de capa <i>C_d</i> : Profundidad de curado = 0.157 mm <i>v</i> : Velocidad de escaneo del láser = 4.6 m/s <i>s</i> : Espaciamento de entramado = 0.070 mm	<i>N</i> : Número de capas = Entero próximo redondeado hacia arriba (Z/h) = 334; 334; 625 (DM, HS, HQ, respectivamente) <i>h</i> : Espesor de capa 0.030; 0.030; 0.016 mm (DM, HS, HQ, respectivamente) <i>v</i> : Velocidad del cabezal = 0.4 m/s <i>x_c</i> : Carrera del cabezal = 0.3 m <i>y₀</i> : Ancho del cabezal = 0.1 m <i>y</i> : Ancho de la capa j = 1 cm <i>m</i> : Número de carreras por capa = 4
Parámetros del material	<i>ρ</i> : Densidad = 1300 kg/m ³ <i>C_p</i> : Capacidad calorífica = 1170 J/Kg K ΔT : Cambio de temperatura = 621.15 K	<i>E_c</i> : Exposición crítica = 94.8 J/m ² <i>D_p</i> : Profundidad de penetración = 0.079 mm	<i>E_{c,h}</i> : Exposición requerida para alcanzar la conversión y el espesor $h = 10.03$ mJ/cm ²
Parámetros geométricos	Espécimen: 141.5 x 141.5 x 2.54 mm $Z = 2.54$ mm Área proyectada de cada capa $j = 0.02$ m ²	Espécimen: 50 x 50 x 10 mm $Z = 10$ mm Área proyectada de cada capa $j = 0.0025$ m ²	Espécimen: 10 x 10 x 10 mm $Z = 10$ mm Área proyectada de cada capa $j = 0.0001$ m ²

Tabla 7 Valores de los parámetros empleados en los modelos matemáticos propuestos.

6.1.1. Resultados del consumo energético y del tiempo de construcción mediante la aplicación de los modelos matemáticos

En la Tabla 8 se muestra el consumo energético y la tasa específica de tiempo de construcción, como resultado de la aplicación de los modelos matemáticos propuestos.

	Extrusión de material	Fotopolimerización en tina con láser	Rociado de material
Energía específica de proceso	$E(T20) = 631.126 \text{ J/cm}^3$ $E(T16) = 504.901 \text{ J/cm}^3$ $E(T12) = 610.908 \text{ J/cm}^3$	$E = 7.764 \text{ J/cm}^3$	$E(DM) = 3.351 \text{ J/cm}^3$ $E(HS) = 4.053 \text{ J/cm}^3$ $E(HQ) = 7.0 \text{ J/cm}^3$
Tasa específica del tiempo de construcción	$T(T20) = 1.143 \text{ cm}^3/\text{min}$ $T(T16) = 1.372 \text{ cm}^3/\text{min}$ $T(T12) = 1.052 \text{ cm}^3/\text{min}$	$T = 0.3864 \text{ cm}^3/\text{min}$	$T(DM) = 16.7 \text{ cm}^3/\text{min}$ $T(HS) = 16.7 \text{ cm}^3/\text{min}$ $T(HQ) = 16.7 \text{ cm}^3/\text{min}$

Tabla 8 Resultados de energía específica de proceso y tasa específica de tiempo de construcción.

6.2. Comparativo entre los resultados teórico-experimentales

Los resultados obtenidos mediante la medición de la energía de proceso, así como del tiempo de construcción *in situ* y los obtenidos mediante la aplicación de las ecuaciones propuestas se ven reflejados en la Tabla 9, así como en la Fig. 30 y en la Fig. 31. También se muestra el error porcentual entre ambos resultados.

Proceso	Cálculo	Consumo energético específico (SEC) (J/cm^3)	Tiempo específico de construcción (t) (min/cm^3)	Tasa específica de tiempo de construcción (T) (cm^3/min)	% de diferencia de SEC	% de diferencia de tiempo de construcción t
ME (T20)	Exp.	646.08	0.877	1.13985	2.31%	0.28%
	Eq.	631.13	0.875	1.14300		
ME (T16)	Exp.	529.90	0.726	1.37652	4.72%	0.36%
	Eq.	504.90	0.729	1.37160		
ME (T12)	Exp.	678.94	0.942	1.06135	10.02%	0.93%
	Eq.	610.91	0.951	1.05156		
VP	Exp.	8.405	2.802	0.35691	7.63%	7.63%
	Eq.	7.764	2.588	0.38640		
MJ (DM)	Exp.	3.48	18.00	0.056	3.83%	7.22%
	Eq.	3.35	16.70	0.060		
MJ (HS)	Exp.	4.20	18.00	0.056	3.58%	7.22%
	Eq.	4.05	16.70	0.060		
MJ (HQ)	Exp.	6.85	18.00	0.056	2.13%	7.22%
	Eq.	7.00	16.70	0.060		

Tabla 9 Comparativa de resultados teórico-experimentales.

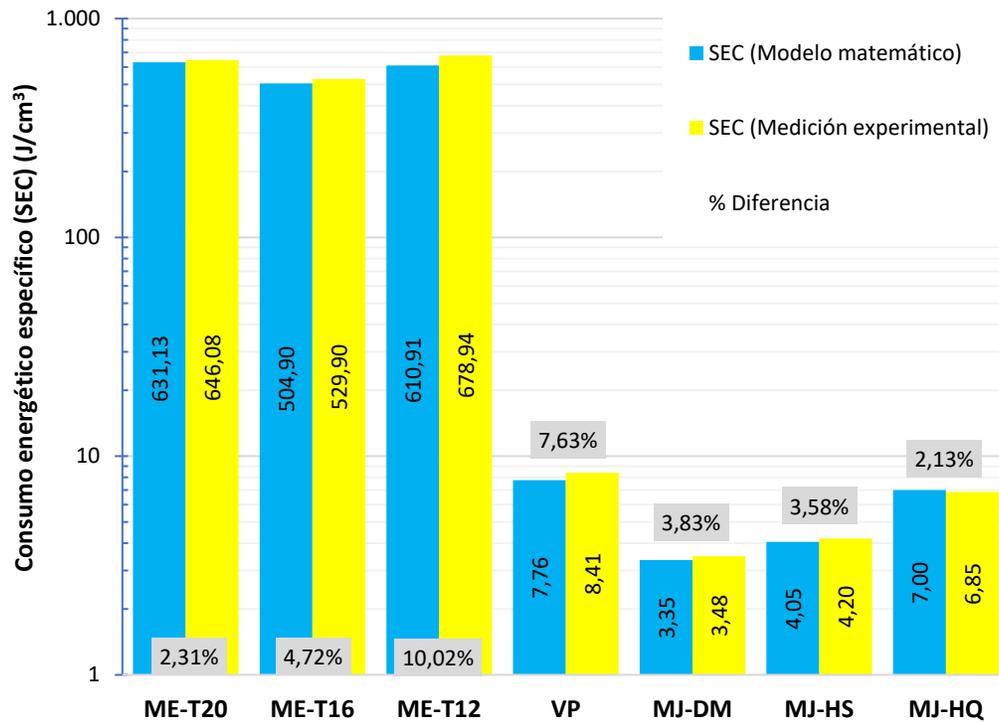


Fig. 30 Comparativa teórico-experimental del consumo energético específico y porcentaje de diferencia.

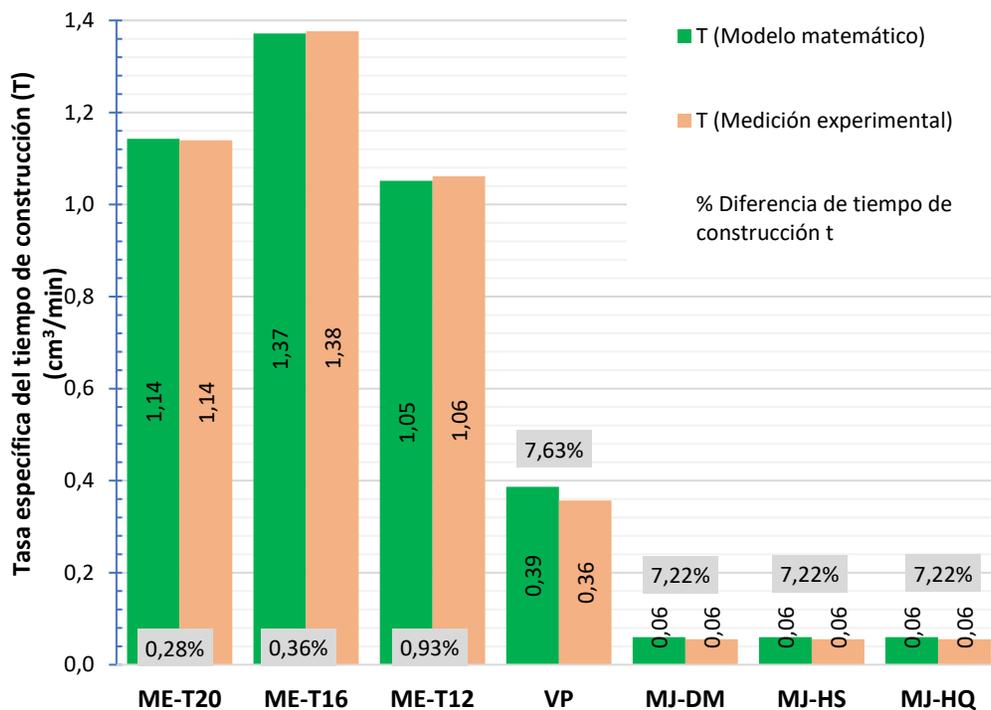


Fig. 31 Comparativa teórico-experimental de la tasa específica del tiempo de construcción y porcentaje de diferencia del tiempo de construcción.

6.3. Intervalos de las regiones de consumo energético y de tasa específica de tiempo de construcción

Corresponde a esta subsección, determinar el consumo energético y la tasa de tiempo de construcción en función de los parámetros de proceso: espesor de capa (para los tres procesos de MA) en combinación con el ancho de filamento (para ME) y con el espaciado de entramado (para VP), debido a que, el espesor de capa es el parámetro más común [2, 3, 18] y susceptible de ser seleccionado por los usuarios de las tecnologías de MA.

Para formar las regiones, los intervalos de espesor de capa se seleccionaron de la siguiente manera: para ME 0.178 – 0.33 mm; VP 0.03 – 0.05 mm; y para MJ 0.016 – 0.03 mm. Adicionalmente, en ancho de filamento y el espaciado de entramado fueron, respectivamente: ME 0.254 – 0.9822 mm; y VP 0.05 – 0.07 mm. Las regiones formadas se muestran en la Fig. 32 y en la Fig. 33.

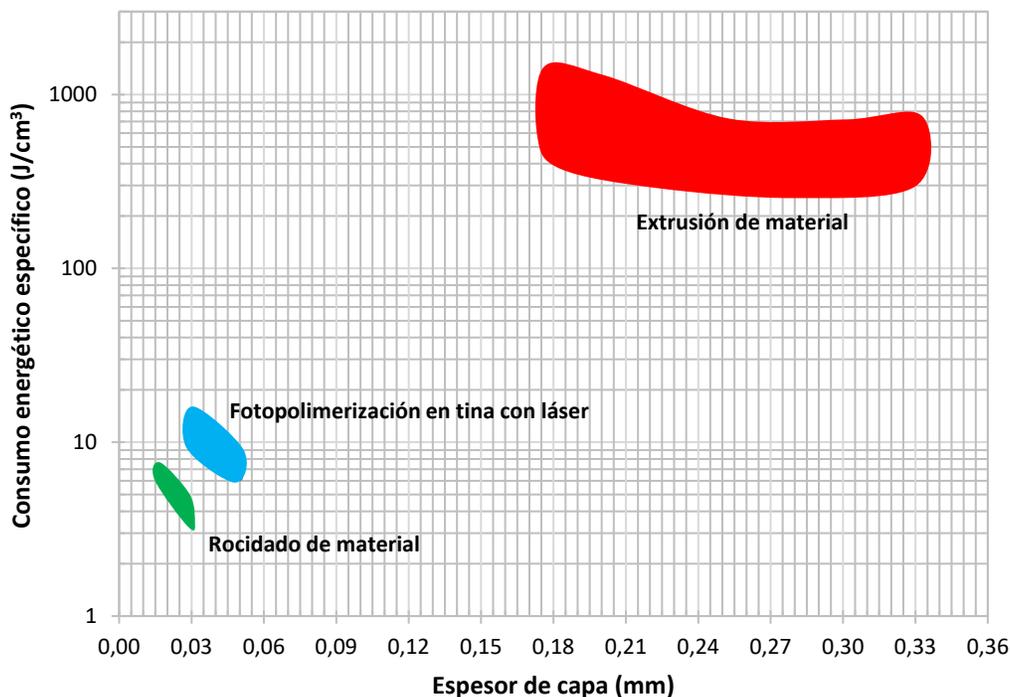


Fig. 32 Regiones de consumo energético específico (SEC) para los tres procesos de MA.

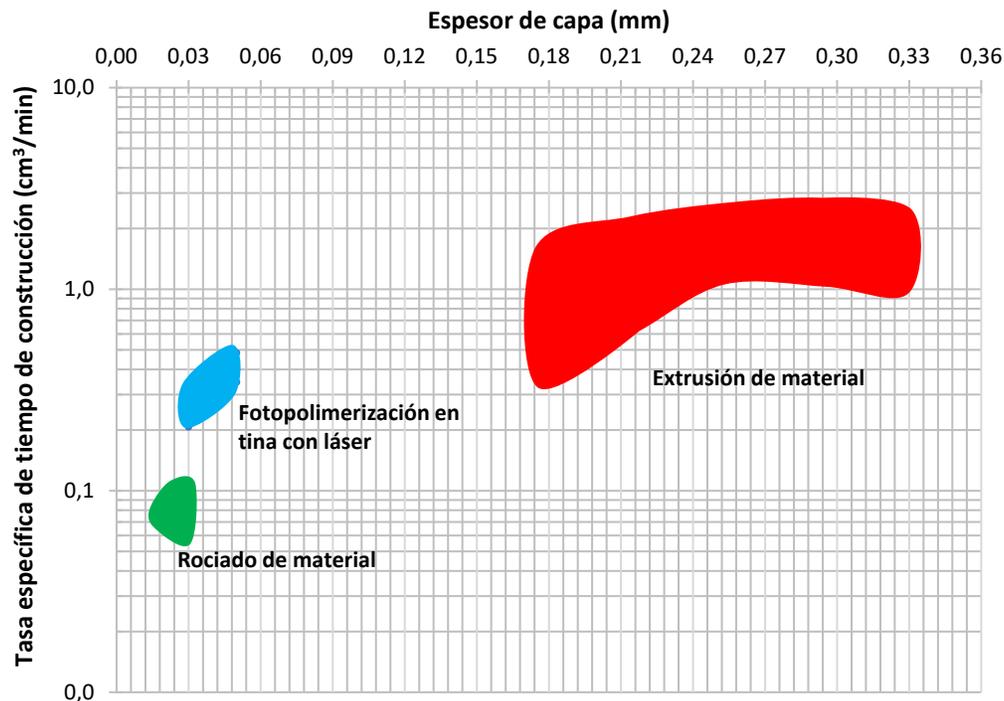


Fig. 33 Regiones de tasa específica de tiempo de construcción (T) para los tres procesos de MA.

6.4. Discusión sobre la evaluación de las propiedades mecánicas, sobre el consumo energético y sobre el tiempo de construcción

Se presenta una discusión sobre cada una de los resultados presentados en este trabajo.

6.4.1. Sobre la similitud de las propiedades mecánicas

Los resultados de la Fig. 20 muestran que para los procesos de manufactura aditiva y para los materiales seleccionados existe una similitud en la resistencia a la tensión y en el módulo de Young, dado que las diferencias en los valores obtenidos de las mencionadas propiedades fueron menores al 10%. Esto confirma que diferentes procesos de manufactura aditiva (al menos los tres estudiados en este trabajo) pueden entregar piezas con propiedades mecánicas similares; esto es debido a la naturaleza de los materiales, los cuales son polímeros, lo que implica que las propiedades mecánicas de las piezas finales estén definidas dentro de intervalos aproximadamente equivalentes [54]. Esto implica que en la etapa de diseño y manufactura de productos de ingeniería es posible seleccionar entre diferentes procesos de manufactura aditiva debido al amplitud de materiales que puedan estar dentro del mismo intervalo de propiedades mecánicas. Ahora bien, se seleccionaron el módulo de Young y la resistencia a la tensión como el vínculo comparativo de consumo energético para los tres procesos seleccionados, pero pudieron haberse seleccionado otras propiedades como por ejemplo la dureza u otra que sea similar para los tres procesos.

6.4.2. Sobre el proceso de extrusión de material

Con respecto a los modelos matemáticos de consumo energético y de tiempo de construcción propuestos y expuestos en la Tabla 2, se destacan los hallazgos que se describen a continuación para el proceso de extrusión de material.

6.4.2.1. El consumo energético en ME

El consumo energético es directamente proporcional a la densidad del material, al cuadrado del diámetro de la boquilla, a la capacidad calorífica, al cambio de temperatura, a la altura de la pieza y al área proyectada de las capas; e inversamente proporcional al ancho de filamento y al espesor de capa.

6.4.2.1.1. Consideraciones para la manufactura con respecto al consumo energético en ME

Lo anteriormente dicho quiere decir que al extrudir materiales más densos, o de mayor capacidad calorífica, o materiales que experimenten temperaturas de extrusión más altas, se requerirá una mayor energía que usando materiales con valores más bajos de dichas características; pero lo mismo sucederá si se emplean boquillas con mayores tamaños de diámetro comparadas con boquillas con menores tamaños diámetro, así como lo mismo sucederá, si las áreas proyectadas de las capas son grandes en comparación con las pequeñas. Análogamente, se debe estar consciente de que, en una manufactura mediante este proceso, entre mayor sea el tamaño del filamento (el cual es definido por el espesor de capa y el ancho de filamento) que se seleccione como parámetro de construcción en determinada máquina, será menor la energía de proceso requerida para efectuar una construcción. A este respecto, por lo general, el espesor de capa se mantiene constante y está determinado por el tamaño de la boquilla, por lo que un usuario puede variar el ancho de filamento, entonces, entre mayor sea éste, aumenta el tamaño del filamento y por ende la consecuente reducción del consumo energético.

6.4.2.2. El tiempo de construcción en ME

El tiempo de construcción es directamente proporcional a la altura de la pieza y a las áreas proyectadas de las capas; e inversamente proporcional al ancho de filamento, al espesor de capa y a la velocidad de deposición.

6.4.2.2.1. Consideraciones para la manufactura con respecto al tiempo de construcción en ME

Esto desde luego, significa que entre más altas sean las piezas a construir, requerirán un mayor número de capas y por ende demandarán más tiempo para su construcción; de igual modo, si las capas son de mayor área proyectada, entonces el tiempo de construcción se incrementa. Por otro lado, si se manufactura con filamentos que tengan un mayor valor en su anchura, la cual puede ser seleccionada por el usuario, entonces

se tendrá un ahorro de tiempo de construcción en comparación del que se tuviere si se seleccionare un valor menor de este parámetro. Adicionalmente, la velocidad de deposición juega un papel importante para el tiempo de construcción, pues con aquellos materiales que sean depositados con una mayor velocidad, se podrán obtener construcciones en un menor tiempo que con aquellos materiales cuya velocidad de deposición sea menor. Asimismo, se debe estar consciente de que los espesores de capa, definidos por el tamaño de las boquillas, no obstante que los mayores tamaños demandan mayor energía, también es cierto que reducen el tiempo de construcción. A través del análisis de las ecuaciones que representan los modelos matemáticos es posible saber cuál parámetro, de los que una máquina pueda tener seleccionables por el usuario, tendrá un mayor o menor impacto tanto en el consumo energético como en el tiempo de construcción.

6.4.2.3. Prospectiva tecnológica para el proceso de ME

La prospectiva tecnológica que se identifica, es la conveniencia, dentro de lo técnicamente posible, de que los fabricantes de materiales destinados a las tecnologías de MA con el proceso de ME, con el propósito de que se tengan manufacturas con mayor ahorro energético y con menores tiempos de construcción, desarrollen materiales que tiendan a tener valores cada vez más bajos en lo que respecta a las características físicas como la densidad, la capacidad calorífica y el punto de temperatura de extrusión; desde luego, es un reto significativo para dichos desarrolladores de materia prima destinada a este proceso de MA. Respecto al tamaño de las boquillas, será menester considerar durante la manufactura, el hecho de que entre mayor sea el diámetro de la boquilla, mayor será la energía de proceso, aunque esto puede verse compensado con el tiempo de construcción toda vez que los filamentos serán de mayor tamaño y por ende se podrá reducir el tiempo de construcción. En efecto, existe la necesidad de que los sistemas de manufactura integren un mayor número de boquillas y permitan una mayor selección de valores, dentro de los intervalos técnicamente posibles, de anchos de filamento, pues éstos permitirán optimizar los tiempos de construcción de las piezas según las necesidades. Lo mismo ocurre con las velocidades de deposición, se identifica que el hecho de que un sistema de manufactura integre un intervalo de valores de este parámetro para que sea seleccionado por el usuario (siempre que las propiedades del material así lo permitan), entonces se puede optimizar el tiempo de construcción y se tendrá un abanico más amplio de posibilidades. Claro está, los diseñadores de estos sistemas de manufactura tendrán que balancear y ajustar las especificaciones y funciones de cada máquina a desarrollar según sea el segmento al que va dirigido.

6.4.3. Sobre el proceso de fotopolimerización en tina con láser

Con respecto los modelos matemáticos de consumo energético y tiempo de construcción propuestos y expuestos en la Tabla 2, se destacan los hallazgos que se describen a continuación para el proceso de fotopolimerización en tina con láser.

6.4.3.1. El consumo energético en VP

La energía de proceso es directamente proporcional a la exposición crítica, la altura de la pieza, las áreas proyectadas de las capas, el tamaño del punto del láser con distribución de Gauss y al número de Euler elevado al cociente entre la profundidad de curado y la profundidad de penetración; e inversamente proporcional al espesor de capa y al espaciado de entramado.

6.4.3.1.1. Consideraciones para la manufactura con respecto al consumo energético en VP

Lo mencionado en el párrafo anterior significa que al emplear resinas con un mayor valor en su exposición crítica o al usar un tamaño de punto de láser más grande, se requerirá mayor energía para curar la resina de la tina y formar las capas, en comparación con el consumo de energía que se tendría al usar valores menores de esos parámetros. Lo mismo sucede al construir capas con una mayor profundidad de curado con respecto a la profundidad de penetración que permite la resina, entre mayor sea este cociente (lo que implica que la profundidad de curado sea mayor que la de penetración) se requerirá mayor energía que cuando este cociente sea menor (lo cual ocurre al usar resinas con mayor profundidad de penetración que de curado). Respecto a los parámetros geométricos, número de capas y áreas proyectada de las capas, es coherente que entre mayor sea la altura de la pieza más capas tendrá; y si las áreas de dichas capas son mayores, se tendrá un mayor consumo energético que el que se tendría en piezas con menor altura y menor valor en las áreas proyectadas de sus capas. Por otro lado, se deduce también que, al manufacturar una pieza con un mayor espaciado de entramado, se reducirá la demanda de energía, dado que entre mayor sea el valor de este parámetro (desde luego, cuidando que dicho valor no se salga del intervalo permisible, según la naturaleza de la resina y del punto del láser) menor será el número de trayectos (barridos) que dará el rayo láser para efectuar la fotopolimerización de la resina y por ende menor consumo energético habrá. La misma reducción de consumo energético ocurre si se usan espesores de capa más grandes, hasta donde técnicamente sea posible.

6.4.3.2. El tiempo de construcción en VP

El tiempo de construcción es directamente proporcional a la altura de la pieza y a las áreas proyectadas de las capas; e inversamente proporcional al espaciado de entramado, a la velocidad de escaneo del rayo láser y al espesor de capa.

6.4.3.2.1. Consideraciones para la manufactura con respecto al tiempo de construcción en VP

De aquí se deduce que, entre más alta sea una pieza, más grande será el número de capas y por lo tanto llevará más tiempo el construirla; y lo mismo acontece con el tamaño de las capas proyectadas, pues entre más grande sean, más tiempo demorará el

rayo láser en terminar el barrido de las capas y mayor será el tiempo de construcción. Lo contrario sucede si se aumenta la velocidad de escaneo de rayo láser (lo cual demandaría más potencia), según sea técnicamente posible, entonces el tiempo para construir cada capa se verá reducido y por ende el tiempo de construcción de la pieza será menor. También se tendrá un menor tiempo de construcción si el espaciado de entramado se aumenta; esto es debido a que se reducirá el número de trayectos necesarios para formar la capa. De igual modo ocurre si se fabrican piezas con un mayor espesor de capa, se reducirá el número de éstas y por ende el tiempo de fabricación de la pieza. También para este proceso, a través del análisis las ecuaciones que representan los modelos matemáticos, es posible determinar el impacto sobre el consumo energético y el tiempo de construcción al variar los valores de uno u otro parámetro.

6.4.3.3. Prospectiva tecnológica para el proceso de VP

Con base en lo puntos de análisis discutidos, la prospectiva tecnológica sobre los aspectos relacionados con el proceso de fotopolimerización en tina con láser, recae en que las tecnologías que trabajan con este proceso de MA, con el propósito de reducir cada vez más el consumo energético, desarrollen resinas que tiendan a tener valores más pequeños de sus propiedades de fotosensibilidad, a saber, la exposición crítica y la profundidad de penetración. Esto implicaría una menor cantidad de energía, que es proporcionada por el rayo láser. La integración de unidades de láser con potencia variable optimizaría la energía, así como el tiempo según las necesidades de los usuarios, pues como ya se ha discutido, la velocidad de escaneo es un parámetro determinante en el la reducción del tiempo de construcción y está íntimamente ligado con la potencia del láser. Adicionalmente, la integración del control del tamaño del punto del rayo láser y su velocidad de escaneo, así como del espaciado de entramado y el espesor de capa, de tal manera que sean seleccionados por el usuario dentro de un intervalo técnicamente posible, es un factor fundamental y un reto determinante en la mejora de la tecnología diseñada para tener un menor impacto en el consumo energético. Los desarrolladores de tecnología deberán considerar estos aspectos basados en la investigación científica para mejorar día a día las máquinas según el segmento al que están destinadas.

6.4.4. Sobre el proceso de rociado de material

Con respecto a las ecuaciones de energía de proceso y tiempo de construcción propuestas y expuestas en la Tabla 2, se destacan los hallazgos que se describen a continuación para el proceso de rociado de material.

6.4.4.1. El consumo energético en MJ

El consumo energético es directamente proporcional a la altura de la pieza, a las áreas proyectadas de las capas y a la exposición requerida para alcanzar la conversión (el curado) a un espesor determinado; e inversamente proporcional al espesor de capa.

6.4.4.1.1. Consideraciones para la manufactura con respecto al consumo energético en MJ

Lo anterior quiere decir que, si se manufactura una pieza empleando resinas que, por su naturaleza química, requieran de una mayor exposición de radiación UV para lograr la fotopolimerización, entonces, el resultado será que la construcción requerirá una mayor energía comparada con la requerida con el empleo de una resina con un valor más bajo de este parámetro. También, entre mayor sean las áreas proyectadas de las capas mayor será la demanda energética; y lo mismo ocurrirá entre más número de capas se tengan, o sea, entre más alta esté la pieza. Al igual que para los dos otros dos procesos de MA, del análisis las ecuaciones que representan los modelos matemáticos es posible saber cuál parámetro, de los que una máquina pueda tener seleccionables por el usuario, tendrá un mayor o menor impacto tanto en el consumo energético como en el tiempo de construcción.

6.4.4.2. El tiempo de construcción en MJ

El tiempo de construcción es directamente proporcional a la altura de la pieza, a la carrera del cabezal, a la relación entre el ancho de la pieza y el ancho del cabezal, y al número de carreras por capa necesarias para efectuar la fotopolimerización de la resina alcanzando el espesor de la capa; e inversamente proporcional a la velocidad del cabezal y al espesor de capa.

6.4.4.2.1. Consideraciones para la manufactura con respecto al tiempo de construcción en MJ

Cabe mencionar que la relación entre el ancho de la pieza (es decir de la capa j más ancha) y el ancho del cabezal (en la zona de rociado) es un número entero que toma el valor de 1 cuando el ancho del cabezal es menor que el ancho de la pieza, de otro modo, valdrá 2, 3, ... etc.; esta relación representa el número de pasadas (bandas) que el cabezal necesita efectuar para cubrir completamente el ancho de la pieza que ha de ser construida sobre la plataforma de construcción.

Ahora bien, al efectuar una manufactura a través de este proceso, se debe considerar que entre más alta esté la pieza, más número de capas se tendrá y, por ende, más tiempo se tardará la máquina en realizar la construcción. Lo mismo sucede cuanto mayor sea la carrera que recorre el cabezal para cubrir la longitud X de la pieza, pues el cabezal viaja a una distancia x_c , la cual es mayor que X . También se tendrá un tiempo de construcción mayor entre más grande sea el número de carreras por capa necesarias para curar la resina, es decir entre más grande sea el parámetro m . Adicionalmente, se emplea mayor tiempo de construcción si el ancho de una pieza es más grande que el ancho del cabezal, puesto que en esta tecnología, las piezas que requieren sólo una pasada para cubrir su ancho son justamente las que tienen un ancho menor al ancho del cabezal de lo contrario, se requerirán más pasadas, dado que el cociente entre ambos anchos (de la pieza y del cabezal) será mayor que 1, por lo cual, se requerirá más

tiempo. Sobre estas dos últimas consideraciones es necesario tener en cuenta que dependen del diseño de la máquina y su interacción con las lámparas y las propiedades de la resina. Por el contrario, entre mayor sea la velocidad del cabezal, será menor el tiempo de construcción (esto requiere de una mayor potencia de las lámparas) y lo mismo sucede con espesores de capas, entre mayores sean éstos, menor tiempo demorará la construcción.

6.4.4.3. Prospectiva tecnológica para el proceso de MJ

Bajo este tenor, la prospectiva tecnológica que se escenifica para este proceso de manufactura aditiva recae en que con el objetivo de tener menores consumos energéticos, los desarrolladores de materiales, consideren la integración de resinas que, al igual que en el proceso de fotopolimerización en tina con láser, tengan cada vez menores valores en sus propiedades que definen la exposición crítica, en este caso, la exposición requerida para alcanzar la fotopolimerización y el espesor de capa; esto depende, principalmente de los componentes químicos de la resina [69]. Ahora bien, las tecnologías actuales incorporan lámparas de longitud constante ligeramente mayor o igual al ancho del cabezal; esto provoca que cuando se fabrican piezas con ancho menor a dicha longitud, se esté perdiendo energía, toda vez que las lámparas están encendidas en toda su longitud y no solamente en el ancho que cada capa demanda. Por ello, se destaca la conveniencia de que los desarrolladores de maquinaria con este proceso, consideren diseños con lámparas tales que tengan un control de iluminación según sea el ancho de la pieza (o aún mejor, de cada capa). Análogamente sucede con el tiempo que duran encendidas las lámparas durante el recorrido que hace el cabezal, es decir, dado que siempre la carrera del cabezal es mayor a la longitud de la pieza, durante este recorrido, permanecen encendidas las lámparas; a partir de aquí se visualiza la conveniencia tecnológica de que las lámparas permanezcan encendidas sólo durante el tiempo que el cabezal pasa sobre la longitud de la capa que se está curando y no durante toda su carrera. Esto sin duda es un reto tecnológico, dada la complejidad y dificultad que se tiene en el control para regular la potencia requerida por las lámparas en instantes cortos de encendido y apagado. De igual manera, para la reducción del tiempo de construcción se identifica la conveniencia de la incorporación de un adecuado sistema de control de la velocidad del cabezal y la potencia de las lámparas para reducir el número de carreras por capa requeridas para lograr la fotopolimerización. En resumen, la prospectiva tecnológica implica la pertinencia de tener en cuenta diseños de máquinas enfocados a la optimización de la interacción y control de la longitud del recorrido del cabezal (a lo largo de los ejes X , Y), de los tiempos de iluminación y potencia de las lámparas, velocidad del cabezal y de las propiedades de la resina.

6.4.5. Sobre los resultados teórico-experimentales

Por otro lado, los resultados que se muestran en la Fig. 30 y en la Fig. 31 reflejan la robustez de los modelos matemáticos representados por las ecuaciones de la Tabla 2. El máximo porcentaje de diferencia de error de la energía de proceso con respecto al resultado experimental es del 10.02% y corresponde al proceso de extrusión de

material; para los procesos de fotopolimerización en tina y rociado de material tal porcentaje de error está por debajo de este valor. Respecto al tiempo de construcción, la diferencia porcentual máxima fue de 7.63% y corresponde al proceso de fotopolimerización en tina con láser. Adicionalmente, se identifica que, en ME, así como el tamaño de la boquilla decrece, el porcentaje de error crece.

6.4.6. Sobre las regiones de consumo energético específico y de tasa específica de tiempo de construcción

Con respecto a la comparación entre los tres procesos de manufactura estudiados, en la Fig. 32 y en la Fig. 33 se muestran las regiones que representan el consumo energético específico y la tasa específica de tiempo de construcción para cada uno de ellos.

El proceso de extrusión de material es el que más energía por centímetro cúbico demanda seguido por el proceso de fotopolimerización en tina con láser y posteriormente por el de rociado de material. En general, independientemente de las combinaciones de los parámetros que participan en las ecuaciones de energía de la Tabla 2 (tal combinación de parámetros ha permitido realizar el mapeo de las regiones, véase sección 6.3), a partir de la Fig. 32, se identifica una tendencia de decremento del consumo energético específico al incrementarse el espesor de capa, lo cual concuerda con lo analizado en la sección 6.4.2. Adicionalmente, a partir de la misma figura se identifica que es posible obtener valores similares de consumo energético para los procesos de fotopolimerización en tina con láser y rociado de material bajo adecuadas condiciones (combinación de parámetros), pero esto no es posible con el proceso de extrusión de material porque la región de consumo energético específico para este proceso con respecto a los otros está bastante alejada. El consumo energético específico en ME ($3.21 - 12.02 \times 10^2 \text{ J/cm}^3$) es aproximadamente dos órdenes de magnitud más grande que el consumo energético específico del proceso de fotopolimerización en tina con láser ($6.21 - 14.52 \times 10^0 \text{ J/cm}^3$) y que el de rociado de material ($3.35 - 7.00 \times 10^0 \text{ J/cm}^3$). Como puede notarse, los consumos energéticos específicos para los procesos de fotopolimerización (VP y MJ) se encuentran en el mismo orden de magnitud.

Por otra vertiente, las regiones de la Fig. 33 muestran que el proceso de extrusión de material es el proceso de manufactura más rápido seguido por el de fotopolimerización en tina con láser y posteriormente por el de rociado de material. Cabe mencionar en este momento que, como se recordará, en este trabajo se está considerando solamente el tiempo referente al proceso, por lo que los tiempos que transcurren al acabar una capa y comenzar otra (los cuales varían de tecnología en tecnología y se notan “lentos” sobre todo en VP y MJ en comparación con ME) quedan descartados para este estudio. Ahora bien, volviendo al asunto de las regiones mostradas en la Fig. 33, se identifica también que independientemente de la combinación de los parámetros que permitieron el mapeo (véase sección 6.3), para los tres procesos de MA estudiados, la tasa específica de tiempo de construcción crece cuando se incrementa el espesor de capa; lo cual concuerda con lo analizado en las secciones 6.4.2.2.1, 6.4.3.2.1 y 6.4.4.2.1. Se identifica, adicionalmente, que los procesos de extrusión de material y de

fotopolimerización en tina con láser pueden tener valores similares de tasa específica de tiempo de construcción siempre que las condiciones adecuadas (combinación de parámetros) sean establecidas; esta misma situación no es posible entre VP y MJ ni entre MJ y ME porque los valores de sus respectivas regiones de tasa específica de tiempo de construcción están muy alejados entre sí. Los valores de tasa específica de tiempo de construcción para los tres procesos de manufactura estudiados se encuentran en los siguientes órdenes de magnitud: extrusión de material, $3.4 \times 10^{-1} - 2.42 \times 10^0 \text{ cm}^3/\text{min}$; fotopolimerización en tina con láser, $2.1 \times 10^{-1} - 4.8 \times 10^{-1} \text{ cm}^3/\text{min}$; y rociado de material, $6.0 \times 10^{-2} - 1.1 \times 10^{-1} \text{ cm}^3/\text{min}$.

Propiedad	ME- PC	VP- DL 260	MJ-RIGUR RGD 450
Dureza (Escala Shore D)	80	86-91	80-84
Temperatura de deflexión térmica (ASTM D648 @ 1.82 MPa) (°C)	127	45-62	45-50
Resistencia a la flexión (ASTM D790) (MPa)	68-89	52-59	50-65
Módulo de flexión (ASTM D790) (MPa)	1800-2000	1500-1700	1300-2800

Tabla 10 Otras propiedades mecánicas.

Es importante resaltar que la comparativa de cuál proceso es más eficiente en términos de eficiencia energética surgió de tener como común denominador a las propiedades mecánicas Módulo de Young y resistencia a la tensión. Otras propiedades reportadas para los materiales seleccionados se muestran en la Tabla 10 [65, 72, 73, 78]. Cabe notar que los valores de dureza son similares para los tres materiales y procesos, pero esto no sucede así para las otras propiedades, cuyos valores son similares sólo para dos materiales, pero no para todos ellos. Esto implica que, aunque un proceso de MA pudiese ser más eficiente desde la perspectiva de consumo energético, pudiera no serlo desde la perspectiva de otras propiedades; por lo cual, es necesario considerar esta situación al tomar decisiones de selección de materiales y procesos. Como se ha mencionado, en este estudio el análisis comparativo se efectuó considerando la similitud del módulo de Young y la resistencia a la tensión para los tres procesos, sin embargo, es necesario realizar un balance entre el consumo energético y otras propiedades cuando dichas propiedades sean relevantes y no similares.

Para finalizar este capítulo, cabe recordar que estos valores de consumo energético corresponden sólo al proceso en sí mismo, es decir a la energía del proceso, no se consideran los elementos periféricos y accesorios, por lo que no son comparables con los valores realizados por otros estudios sobre consumo energético realizados por

otros investigadores [43, 45, 46, 47, 79, 80, 81, 82], ya que en ellos se considera el consumo energético total de las máquinas de MA. Independientemente de cada máquina o tecnología de MA, el consumo energético determinado por medio de este estudio es constante, por lo tanto, si se conoce el consumo energético total de una máquina en particular, se puede determinar el consumo energético asociado con los elementos periféricos y accesorios.

7. RELACIÓN ENTRE CONSUMO ENERGÉTICO Y PROPIEDADES MECÁNICAS

Cuando se selecciona un material y un proceso de manufactura, uno de los múltiples aspectos a considerar es el que se refiere qué propiedades mecánicas son las resultantes del proceso de manufactura y qué cantidad energía implica el obtener una pieza con dichas propiedades cuando los materiales son procesados para la fabricación de una pieza o producto.

Las propiedades mecánicas finales de la pieza son consecuencia del proceso de fabricación, de la naturaleza del material que se procesa y de la geometría de la pieza fabricada. De igual modo, el consumo energético depende de las características del material que se procesa y de cómo se procesa, es de decir del proceso de fabricación. En resumen, tanto las propiedades mecánicas como el consumo energético son el resultado de la combinación proceso-material, por lo que los parámetros asociados a dicho binomio juegan un rol importante para determinar la relación consumo energético-propiedad mecánica.

7.1. Formulación de la hipótesis para el estudio consumo energético vs propiedades mecánicas

En los capítulos precedentes se ha expuesto el estudio del consumo energético, para cuyo caso de estudio, se buscó como único parámetro comparador, que las propiedades mecánicas fueran similares. Dado que con ello se han podido comparar los procesos de manufactura aditiva en función del consumo energético que cada uno de ellos demanda, se detecta ahora, como resultado de la investigación, que es pertinente estudiar los procesos de manufactura aditiva desacoplándolos de dicho parámetro comparador para identificar qué acontece con el consumo energético por unidad de propiedad mecánica, es decir, cuánta energía se requiere por cada MPa de resistencia mecánica o de módulo de Young en cada uno de los procesos en función de los materiales. Es decir, la primera parte de la investigación, tomando como base la hipótesis inicial, ha servido para comparar procesos diferentes a igualdad de propiedades mecánicas, pero ahora, es posible identificar la cantidad de resistencia mecánica a la tensión y/o de módulo de Young generada por cada unidad de energía invertida en función del volumen de deposición y de los materiales, para cada uno de los procesos de MA estudiados.

Por tal motivo, se ha planteado la siguiente hipótesis: el análisis de las ecuaciones que representan el modelo matemático del consumo energético, en combinación con el análisis de las propiedades mecánicas de las piezas construidas por materiales y procesos de MA, permite determinar los intervalos de valores de las propiedades mecánicas (resistencia a la tensión y módulo de Young) en función de la cantidad de energía aplicada por unidad de volumen, y determinar si la propiedad tiene una correlación directa o inversamente proporcional o no, con la energía aplicada.

Partiendo de dicha hipótesis, el desarrollo de este capítulo tiene como objetivo investigar si existe una correlación o no entre el consumo energético y las propiedades mecánicas de piezas que resultan de la fabricación de piezas mediante los procesos de manufactura aditiva: extrusión de material, fotopolimerización en tina con láser y rociado de material.

7.2. Métodos y materiales para el estudio consumo energético vs propiedades mecánicas

Para determinar si existe o no una correlación entre el consumo energético y las propiedades mecánicas resultantes de las piezas fabricadas a través de los procesos de manufactura aditiva ME, VP y MJ, en primer lugar, se determinaron los intervalos de las regiones de consumo energético a través de los modelos matemáticos propuestos en la sección 3.4 (Eq. 18; Eq. 24, Eq. 29, Eq. 30; y Eq. 33; respectivamente) para diferentes valores de los parámetros involucrados en dichas expresiones. Para los tres procesos, el resultado de consumo energético por unidad de volumen de cada una de las combinaciones de dichos parámetros para cada material, se hizo corresponder con la propiedad mecánica (resistencia a la tensión y módulo de Young) definida y reportada por los fabricantes. Esto permitió generar las nubes de puntos consumo energético-propiedades mecánicas y a partir de ahí se tiene la posibilidad de identificar la relación existente (correlación, si es que la hubiere). Las geometrías de estudio que se emplearon por facilidad de cálculo, fueron las mismas que se emplearon para la experimentación para evaluar el consumo energético de los procesos descritas en el capítulo 5, que son de forma prismática, las cuales, pese a no tener las mismas dimensiones para los tres procesos de MA, la comparación de consumo energético entre ellos se llevó a efecto debido a que el consumo energético fue convertido a unidades de consumo energético específico; es decir de energía por unidad de volumen.

7.2.1. Consideraciones para el proceso de extrusión de material

Para estudiar la relación consumo energético – propiedad mecánica en el proceso de extrusión de material se determinaron los valores de consumo energético a través de la Eq. 18 para cada uno de los siguientes materiales: ASA, PC-ABS, ABS M30, ABS M30i, ABS-ESD7, ABSi, PC, Nylon 12, PPSF, PC-ISO, ULTEM 9085, ULTEM 1010, y variando los parámetros: ancho de filamento y espesor de capa (definido por el tamaño de la boquilla). Los espesores de capa correspondientes a cada tamaño de las boquillas T10, T12, T14, T16 y T20 son, respectivamente, 0.127 mm, 0.178 mm, 0.254 mm, 0.254 mm y 0.33 mm. Para cada uno de dichos tamaños de boquilla, se utilizaron los siguientes valores de ancho de filamento: T10 (0.2032 mm, 0.4032 mm, 0.5000 mm y 0.5782 mm); T12 (0.2540 mm, 0.3556 mm, 0.5000 mm y 0.6790) para PC, Nylon 12 y PC-ISO, mientras que, para el resto de los materiales, T12 (0.3048 mm, 0.5000 mm, 0.6548 mm y 0.7298 mm); T14 (0.3556 mm, 0.5000 mm, 0.6564 mm y 0.7306 mm); T16 (0.4064 mm, 0.5000 mm, 0.7064 mm y 0.8314 mm) para ASA, ABS M30, ABS M30i y ABS-ESD7; T12 (0.4064 mm, 0.5000 mm, 0.7064 mm y 0.8814 mm) para PC-ABS, PC, PC-ISO y Nylon 12; T12 (0.4074 mm, 0.5000 mm, 0.6564 mm y 0.7814 mm) para PPSF y ULTEM

9085; T20 (0.4572 mm, 0.5000 mm, 0.8072 mm y 0.9822 mm). Todos estos anchos de filamento abarcan del mínimo valor posible al máximo para cada tamaño de boquilla según lo permite el tipo de material [76, 83]. Los demás parámetros relativos al material como son: la temperatura de extrusión, la densidad del material y el diámetro de la boquilla fueron tomados de la información técnica del fabricante y también consultando otras bases de datos sobre propiedades de materiales [72, 76, 77, 83]. La máquina considerada compatible con estos materiales y boquillas corresponde a la Stratasys Fortus 400. La geometría de estudio para obtener el consumo energético fue prismática con las siguientes dimensiones: 141.5 x 141.5 x 2.54 mm; véase Fig. 34.

$$\text{Eq. 18} \quad E = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} \left(\frac{\pi \rho d^2 C_p (\Delta T)}{4w} \right) A_j$$

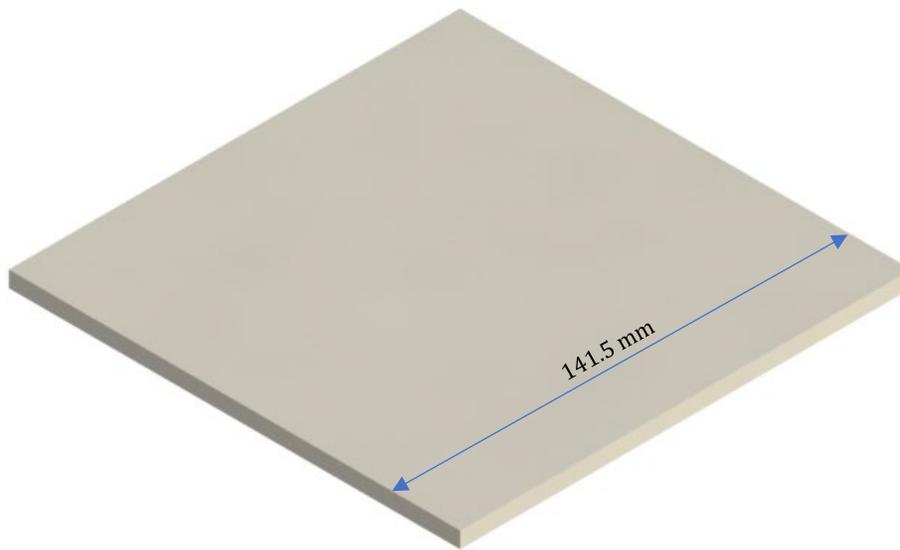


Fig. 34 Geometría de estudio para el proceso de extrusión de material.

7.2.2. Consideraciones para el proceso de fotopolimerización en tina con láser

Para estudiar la relación consumo energético – propiedad mecánica en el proceso de fotopolimerización en tina con láser se han considerado como materiales de estudio los siguientes, correspondientes a la máquina DWS 020X: AB01, AB02, DL260, Rubber-like GM08, Rubber like GM08B y Therma DM210. Para ello, se ha fijado la potencia del láser incidente sobre la resina según las especificaciones del fabricante en 50 mW [84] (esta misma potencia fue obtenida a partir de la experimentación efectuada como se expuso en la sección 5.2). Posteriormente, se combinaron las ecuaciones Eq. 24, Eq. 29 y Eq. 30 para obtener el consumo energético en función de la velocidad de escaneo del láser, el espaciamiento de entramado, el espesor de capa, la altura de la pieza y el área proyectada de las capas de la misma; como resultado se obtiene la Eq. 36.

$$\text{Eq. 36} \quad E = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} \left(\frac{P}{sv} \right) A_j$$

Se consideraron, para cada uno de los materiales, los siguientes espesores de capa: 0.030 mm, 0.040 mm y 0.050 mm; y para cada uno de estos espesores de capa, los siguientes valores de espaciado de entramado: 0.050 mm, 0.060 mm y 0.070 mm. Las velocidades de escaneo fueron de 5100 mm/s para los materiales AB01 y AB02, y de 4600 mm/s para el resto de los materiales. La geometría de estudio para obtener el consumo energético fue prismática con las siguientes dimensiones: 50 x 50 x 10 mm; véase Fig. 35.

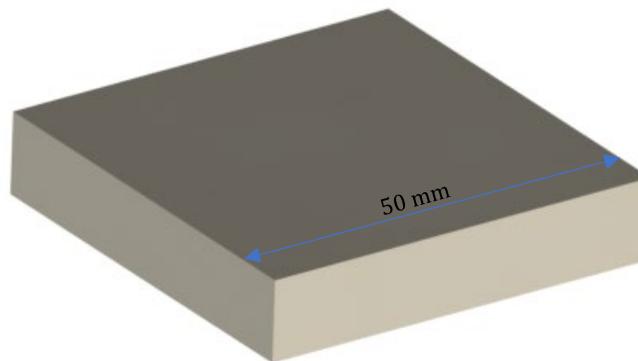


Fig. 35 Geometría de estudio para el proceso de fotopolimerización en tina con láser.

7.2.3. Consideraciones para el proceso de rociado de material

Para estudiar la relación consumo energético – propiedad mecánica en el proceso de rociado de material se consideraron los siguientes materiales, mismos que corresponden a la máquina Stratasys Objet Connex 500: TangoBlackPlus FLX980, TangoPlus FLX930, TangoBlack FLX973, Clear Bio-compatible MED610, VeroGlaze MED620, VeroDent MED670, VeroDentPlus MED690, DurusWhite RGD430, Endur Rigur RGD450, VeroBlue RGD840, Vero Family (Black, Grey, White, Yellow, Cian, Magenta), Full Cure RGD720, VeroClear RGD810, Digital ABS RDG515/531/535 y RDG525. Para todos los materiales, a excepción de los materiales Tango, se consideraron los modos de manufactura HQ (*High quality*), HS (*High speed*) y DM (*Digital materials*), mismos que, respectivamente corresponden a los siguientes espesores de capa: 0.016 mm, 0.030 mm y 0.030 mm. Asimismo, a esos modos de manufactura corresponden, respectivamente, los siguientes valores de exposición requerida para alcanzar la conversión y el espesor de capa: 11.200 mJ/cm², 12.133 mJ/cm² y 10.033 mJ/cm². Para los materiales Tango sólo se consideraron los modos de manufactura HS y DM debido a que de acuerdo con la información técnica del fabricante sólo esos dos modos trabajan para dichos materiales. Para determinar los valores de consumo energético correspondientes a este proceso se ha utilizado la Eq. 33. La geometría de estudio fue prismática con las siguientes dimensiones: 10 x 10 x 10 mm; véase Fig. 36.

$$\text{Eq. 33} \quad E = \sum_{j=1}^{N=\frac{Z}{h}} (E_{c,h}) A_j$$

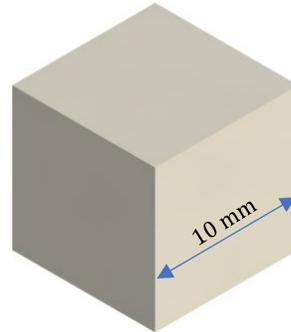


Fig. 36 Geometría de estudio para el proceso de rociado de material.

7.3. Resultados de consumo energético vs. propiedades mecánicas

Una vez que se aplicó la metodología expuesta en la sección anterior, se obtuvieron los conjuntos de valores de consumo energético específico y se relacionaron con los intervalos de valores de resistencia a la tensión y módulo de Young para cada proceso de MA. Como resultado, se obtuvieron las nubes de puntos que se muestran en las figuras: Fig. 37 y Fig. 38.

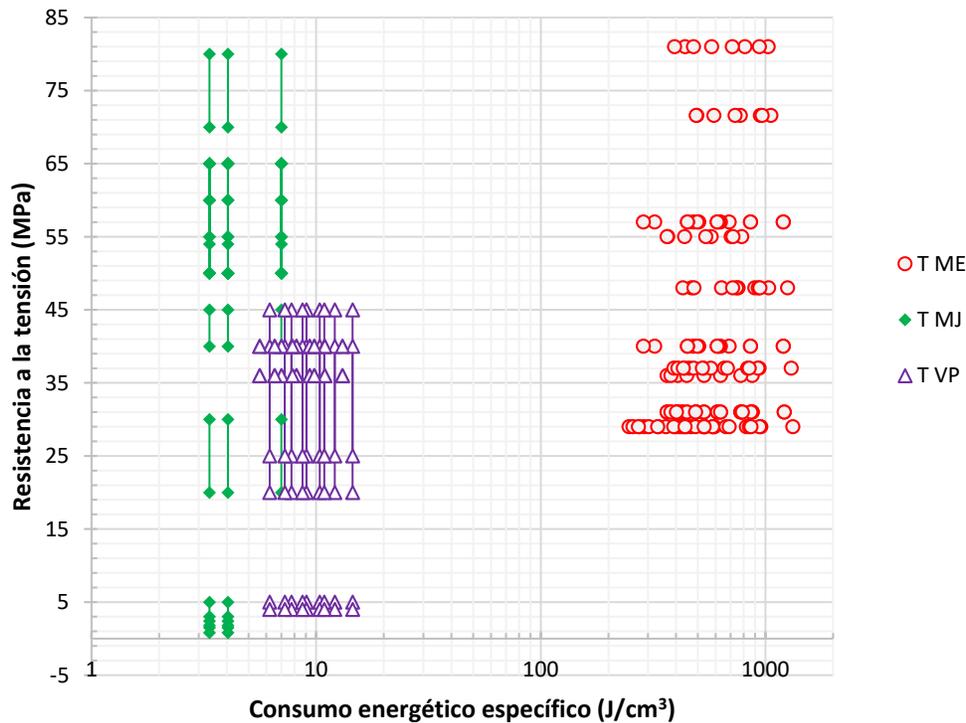


Fig. 37 Resultados de consumo energético vs. resistencia a la tensión.

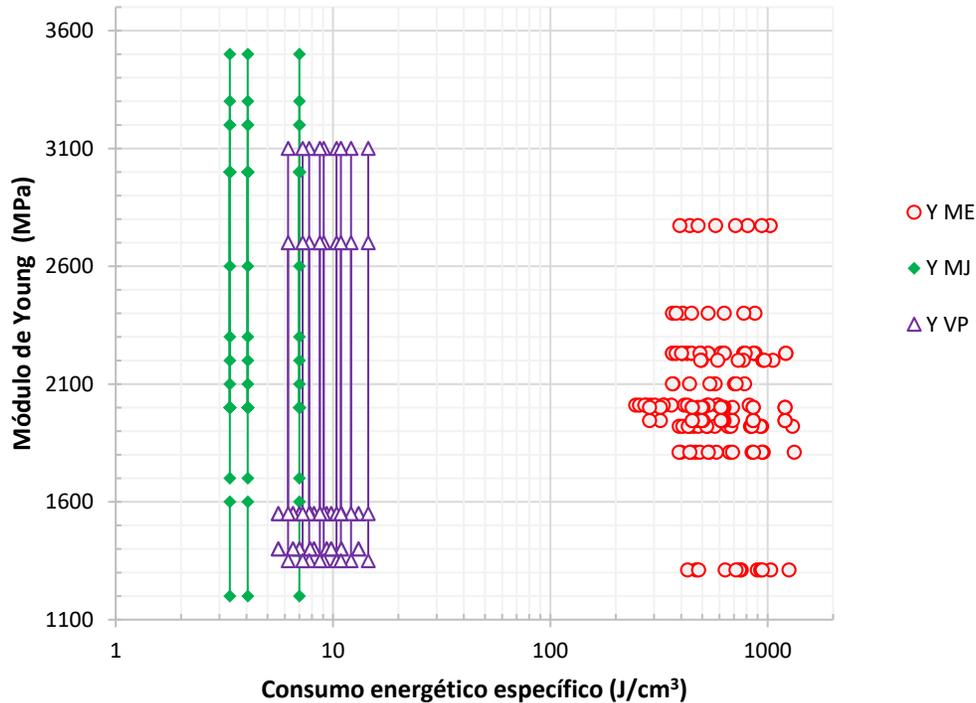


Fig. 38 Resultados de consumo energético vs. módulo de Young.

7.4. Análisis de los resultados de consumo energético vs. resistencia a la tensión y módulo de Young

Como se muestra en la Fig. 37, los intervalos de valores de consumo energético vs. resistencia a la tensión son, respectivamente, para ME: 247.43 – 1326.14 J/cm³ vs. 22 – 81 MPa; para VP: 5.6 – 14.52 J/cm³ vs. 4 – 45 MPa; y para MJ: 3.35 – 7.00 J/cm³ vs. 0.8 – 80 MPa. Análogamente, de la Fig. 38, los intervalos de valores de consumo energético vs. módulo de Young son, respectivamente, para ME: 247.43 – 1326.14 J/cm³ vs. 1027 – 2772 MPa; para VP: 5.6 – 14.52 J/cm³ vs. 7,00 – 3100 MPa; y para MJ: 3.35 – 7.00 J/cm³ vs. 1200 -3500 MPa.

Los resultados obtenidos mostrados en la Fig. 37 proporcionan una idea de la cantidad de energía que se requiere para alcanzar un cierto valor de resistencia a la tensión, y viceversa. A partir de dicha figura se infiere que existen materiales con los cuales, al ser procesados mediante alguno de los procesos de MA estudiados, se puede obtener un mismo valor de resistencia a la tensión que se corresponde con todo un intervalo de valores de consumo energético; pero también es posible que con un mismo valor de consumo energético se pueda tener todo un intervalo de valores de resistencia a la tensión. Este mismo fenómeno ocurre con el módulo de Young, como se expone en la Fig. 38.

Toda esta información es de utilidad porque ayuda a conocer cómo se puede obtener un mismo valor de resistencia a la tensión o módulo de Young con diferentes valores de

consumo energético, a fin de identificar cuál material y proceso cumplen con tales valores necesarios para la toma de decisiones de selección; la metodología para conocer esto será identificando qué materiales y procesos de MA proporcionan ese valor de resistencia a la tensión o módulo de Young que interese, aun cuando el consumo energético como resultado del procesamiento de tales materiales resulte diferente, ya sea por la naturaleza del material, del proceso de MA o de los parámetros de proceso aplicados a cada pieza en particular. Con ello, también se puede identificar qué material bajo qué proceso, a igualdad de propiedades mecánicas (o de valores de éstas muy cercanos entre sí), representa un menor consumo energético.

En efecto, la información proporcionada por la Fig. 37 y la Fig. 38 confirma el hecho de que existen materiales y procesos de MA con los que es posible obtener igualdad de propiedades mecánicas con valores cercanos entre sí; de hecho, existen regiones formadas por puntos de propiedades mecánicas que son comunes a los tres procesos independientemente del consumo energético. Adicionalmente, se identifica que el proceso de extrusión de material demanda mayor cantidad de energía que los procesos que implican fotopolimerización: rociado de material y fotopolimerización en tina con láser, cuyos valores de consumo energético son cercanos entre sí, e incluso, existe una región común a ambos. Esto confirma los resultados que se analizaron en la sección 6.4.6.

También, la Fig. 37 muestra que, entre los tres procesos de MA estudiados, los intervalos más grandes de resistencia a la tensión se alcanzan con el proceso rociado de material, seguido por el proceso de extrusión de material y luego por el de fotopolimerización en tina con láser. Complementariamente, la Fig. 38 muestra que, entre los tres procesos de MA estudiados, los intervalos más grandes de módulo de Young se logran con el proceso rociado de material, seguido por el proceso de fotopolimerización en tina con láser y luego por el de extrusión de material. Esta observación aplica sólo para los materiales seleccionados para este estudio, ya que para todo el universo de materiales los intervalos más grandes de resistencia a la tensión y de módulo de Young pueden cambiar de un proceso a otro; dependerá del avance tecnológico de los materiales. Esto puede apreciarse en la Fig. 39 y la Fig. 40. Estas figuras fueron elaboradas a partir de los datos de propiedades mecánicas reportadas por los fabricantes mayores en el mercado global de la manufactura aditiva correspondientes a los procesos de manufactura ME, VP y MJ [26, 51]. En la Fig. 39 se puede ver que para la resistencia a la tensión el mayor intervalo corresponde al proceso de fotopolimerización en tina con láser seguido por el de rociado de material y luego por el de extrusión de material; y lo mismo acontece para el módulo de Young expuesto en la Fig. 40.

No obstante que el estudio realizado en este trabajo no incluye todo el universo de materiales para los tres procesos, se identifican y son válidos los aspectos discutidos sobre relación de intervalos consumo energético vs. propiedad mecánica como resultado de esta investigación.

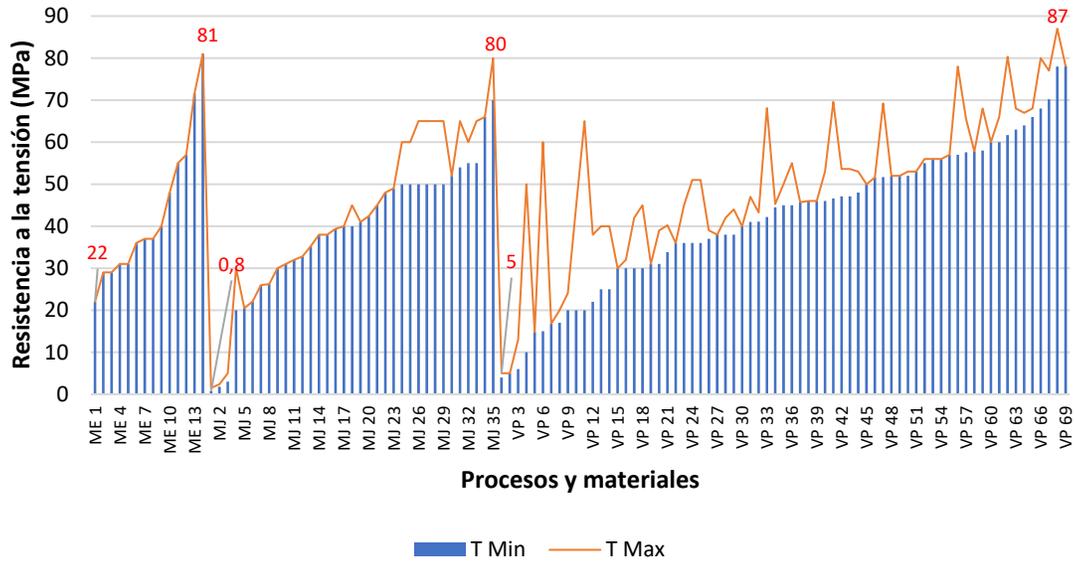


Fig. 39 Resistencia a la tensión de diferentes materiales y procesos de MA.

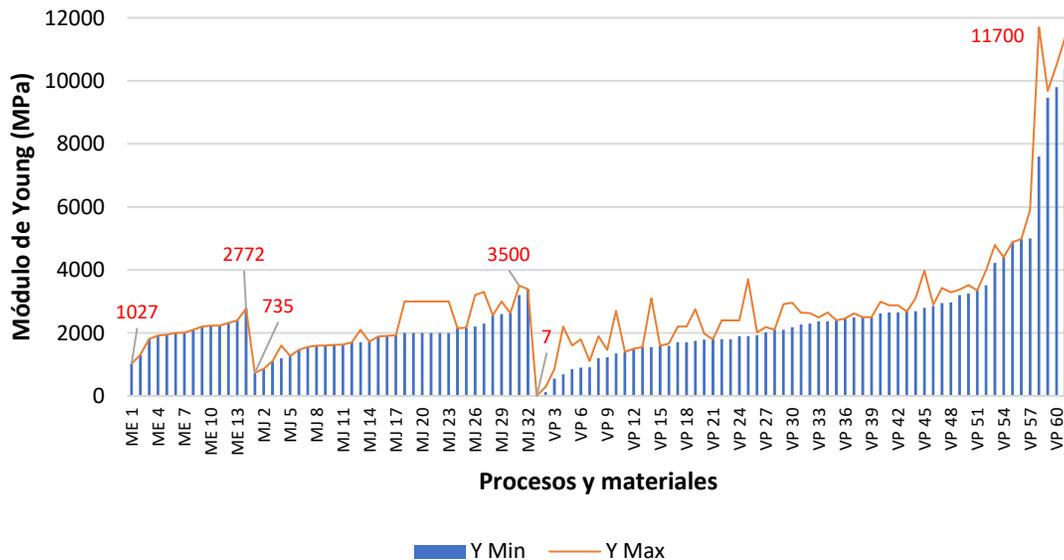


Fig. 40 Módulo de Young de diferentes materiales y procesos de MA.

Ahora bien, sobre el planteamiento de si existe o no una correlación entre el consumo energético y la propiedad mecánica, ya sea resistencia a la tensión o módulo de Young, la información de la Fig. 37 y la Fig. 38 indica que estas propiedades mecánicas no están en función del consumo energético para alcanzar uno u otro valor. No se identifica que a medida que crezca el consumo energético se tenga una respuesta de incremento en las propiedades mecánicas y viceversa. Si bien es posible formar pares ordenados como relación, no es posible hacerlos como correlación, o sea, como función. Como se ha dicho, existe la posibilidad de alcanzar valores de una misma propiedad mecánica con un intervalo de consumo energético según sean los parámetros de construcción con los

que esté trabajando el proceso. También puede darse el caso de que para un mismo consumo energético se obtengan diferentes propiedades mecánicas en función también de los parámetros de construcción. No se observa una tendencia clara de correlación entre consumo energético vs. propiedad mecánica en ninguno de los tres procesos estudiados. Por lo tanto, las propiedades mecánicas son independientes del consumo energético.

CONCLUSIONES

El estudio del consumo energético en los procesos de manufactura aditiva: extrusión de material, fotopolimerización en tina con láser y rociado de material ha sido realizado en esta investigación. Se ha desarrollado metodológicamente el objetivo de la hipótesis inicial planteada, el cual, fue el de identificar los principales parámetros que afectan al consumo energético y al tiempo de construcción desde la perspectiva del proceso en sí mismo, así como evaluar y comparar el consumo energético y el tiempo de construcción que corresponden al proceso de adición de material, capa sobre capa, empleando como herramientas: la tecnología FDM para el proceso de extrusión de material, SLA para el proceso de fotopolimerización en tina con láser, y *Polyjet* para el proceso de rociado de material, considerando que los valores de las propiedades mecánicas de las piezas manufacturadas están lo suficientemente cerca para considerarse similares. Éstas fueron verificadas mediante ensayos de tensión.

En efecto, se han identificado los principales parámetros que afectan al consumo energético y al tiempo de construcción viéndose reflejado esto con las ecuaciones que representan los modelos matemáticos propuestos; estos fueron validados mediante la experimentación, midiendo directamente en las máquinas de manufactura aditiva el consumo energético y el tiempo de construcción. Los porcentajes de error fueron determinados.

También se ha determinado el consumo energético específico y la tasa específica de tiempo de construcción; lo que ha permitido la comparación entre los tres procesos estudiados. Como resultado, se ha determinado que los procesos de fotopolimerización en tina y rociado de material son energéticamente más sustentables que el proceso de extrusión de material, si bien éste posee tasas específicas de tiempos de construcción más altas que los otros dos procesos.

Se ha discutido sobre la similitud de las propiedades mecánicas, sobre los modelos matemáticos propuestos, sobre la experimentación y sobre las regiones de consumo energético; esto ha permitido identificar las consideraciones a tomar en cuenta en la fabricación de piezas, así como identificar la prospectiva tecnológica con el objeto de desarrollar mejoras que permitan tener tecnologías de manufactura aditiva cada vez más sostenibles para cada uno de los procesos estudiados.

Mediante este trabajo se identifica la apertura de la brecha de esta línea de investigación, en cuanto al análisis las propiedades mecánicas, el cual, fue realizado sólo para la resistencia a la tensión y para el módulo de Young, sin embargo, la metodología utilizada en este estudio puede ser utilizada para explorar otras propiedades, ya sean mecánicas, térmicas, etc. Análogamente, las regiones de consumo energético específico se han graficado sólo en función del espesor de capa debido a que es el parámetro que en la mayoría de las tecnologías puede ser seleccionado por el usuario; sin embargo, este análisis puede extenderse para otras condiciones (combinación de parámetros)

obteniendo el consumo energético en función de otro parámetro de interés, ya sea de proceso, de material o de geometría. También, a través de la aportación de los modelos matemáticos propuestos es posible determinar el impacto que se tiene sobre el consumo energético y sobre el tiempo de construcción cuando se varían los valores de los parámetros involucrados, esto es especialmente útil para la toma de decisiones durante la manufactura de piezas con el objeto de reducir el consumo energético y/o el tiempo de construcción.

Por otra vertiente, el desarrollo de la investigación respecto a la hipótesis inicial ha permitido el planteamiento de una hipótesis complementaria, cuyo objetivo fue el de investigar si existe o no una correlación entre las propiedades mecánicas y el consumo energético, concluyendo que no existe correlación alguna. A pesar de esta situación, este análisis ha permitido identificar con una mayor amplitud los intervalos de valores de consumo energético y de propiedades mecánicas existentes para los tres procesos estudiados. Asimismo, esto ha permitido conocer gráficamente cómo se relacionan (que no correlacionan) el consumo energético y las propiedades mecánicas en sus respectivas regiones.

Cabe la posibilidad de ampliar más la línea de investigación para estudios futuros con el fin de investigar qué otros parámetros pueden ser considerados en los modelos matemáticos y si tienen un impacto significativo para ser integrados a dichos modelos.

Adicionalmente, es menester investigar los valores de los parámetros de proceso y de materiales de otras máquinas y tecnologías relativas a los procesos estudiados con el objetivo de tener un abanico más amplio de los intervalos de consumo energético, de tiempo de construcción y de propiedades mecánicas que pudieren existir y por ende ser seleccionados durante la etapa de diseño en ingeniería.

También, a través de la continuidad en esta línea de investigación, teniendo este estudio como base, es posible abordar y ampliar el tema de sostenibilidad en manufactura aditiva mediante el estudio de otros factores que impactan directamente en el medio ambiente y en la huella de carbono, ya que mediante los modelos matemáticos propuestos, también es posible analizar la sensibilidad en el consumo energético en cuanto a la modificación de los parámetros del proceso, pudiendo así, construir diversos escenarios y comparativas de sostenibilidad con otros procesos de manufactura, que permitan tomar decisiones en cuanto a la optimización del ciclo de vida del producto.

Los resultados de este estudio demuestran que se han alcanzado los objetivos que, a partir de las hipótesis de esta investigación se plantearon, por lo que, de acuerdo con el alcance establecido, queda concluido este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] ISO-ASTM, "BS-ISO-ASTM-52900 Additive manufacturing - General principles - Terminology," ISO-ASTM, 2015.
- [2] I. Gibson, D. Rosen and B. Stucker., Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Springer, 2014.
- [3] A. Gebhardt, Understanding Additive Manufacturing, Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing, 2012.
- [4] B. Wu, C. Myant and S. Z. Weider, "The Value of Additive Manufacturing: Future Opportunities," *Institute for Molecular Science and Engineering*, no. 2, September 2017.
- [5] W. Associates, "Wohlers Report 2018: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report," 2018.
- [6] S. Ford and M. Despeisse, "Additive Manufacturing and Sustainability: an Exploratory Study of the Advantages and Challenges," *Journal of Cleaner Production*, pp. 1573-1587, 2016.
- [7] W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C. B. Williams, C. C. Wang, Y. C. Shin, S. Zhang and P. D. Zavattieri, "The Status, Challenges, and Future of Additive Manufacturing in Engineering," *Computer-Aided Design*, vol. 69, pp. 65-89, 2015.
- [8] D. Chen, S. Heyer, S. Ibbotson, K. Salonitis, J. G. Steingrímsson y S. Thiede, «Direct Digital Manufacturing: Definition, Evolution, and Sustainability,» *Journal of Cleaner Production*, pp. 1-11, 2015.
- [9] E. Toyserkani, "Additive Manufacturing: Promise, Challenges and Opportunities," *Industry Today*, vol. 20, no. 3, 2017.
- [10] M. Attaran, "The Rise of 3-D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing over Traditional Manufacturing," *Business Horizons*, vol. 60, no. 5, pp. 677-688, 1 Sept 2017.
- [11] N. N. Kumbhar and A. V. Mulay, "Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 99, no. 4, pp. 481-487, 2018.
- [12] D. Mourtzis, M. Doukas and D. Bernidaki, "Simulation in Manufacturing: Review and Challenges," *Procedia CIRP*, vol. 25, pp. 213-229, 2014.
- [13] C. Dordlofva, A. Lindwall and P. Törlind, "Opportunities and Challenges for Additive Manufacturing in Space Applications," *NordDesign*, 2016.
- [14] A. M. Forster, "Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability," NIST, U.S. Department of Commerce, 2015.

- [15] L. Ruiz-Huerta, A. Ortega-Rodriguez and A. Caballero-Ruiz, "Relation between Tip Size, Deposition Speed and Roughness in FDM Technology," *Dimensional Accuracy and Surface Finish in Additive Manufacturing. Proceedings ASPE 2014 Spring Topical Meeting*, pp. 214-218, 2014.
- [16] A. E. Siegman, *An Introduction to Lasers and Masers*, New York: McGraw-Hill, 1971, pp. 312-314.
- [17] G. B. Kim, S. Lee, H. Kim, D. H. Yang, Y.-H. Kim, Y. S. Kyung, C.-S. Kim, S. H. Choi, B. J. Kim, H. Ha, S. U. Kwon and N. Kim, "Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology," *Korean Journal of Radiology*, vol. 17, no. 2, pp. 182-197, 2016.
- [18] K. Prakash, T. Nancharaih and V. Rao, "Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing - An Overview," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, Part 1, pp. 3873-3882, 2018.
- [19] Bits Into Atoms 3D Printing and Desing, "Bintoa," 30 April 2017. [Online]. Available: <https://www.bintoa.com/directed-energy-deposition/>. [Accessed 7 July 2017].
- [20] A. Ambrosi and M. Pumera, "3D-Printing Technologies for Electrochemical Applications," *Chem. Soc. Rev.*, pp. 2740--2755, 2016.
- [21] M. P. Sealy, G. Madireddy, R. E. Williams, P. Rao and M. Toursangsaraki, "Hybrid Processes in Additive Manufacturing," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 140, 2018.
- [22] «Hybrid Manufacturing Technologies,» [En línea]. Available: <http://www.hybridmanutech.com/>. [Último acceso: 2 October 2018].
- [23] I. E. Agency, "Electricity information," IEA, 2018.
- [24] I. E. Agency, "Key world energy statistics," International Energy Agency, 2018.
- [25] SENER, "Consumo energético en México," 2018.
- [26] W. Associates, "Wohlers Report 2017. Service Provider Survey Results. Appendix E.," 2017.
- [27] "SASAM Standardisation Roadmap," 2015.
- [28] AM-motion, "A Strategic Approach to Increasing Europe's Value Proposition for Additive Manufacturing Technologies and Capabilities," 2018.
- [29] D. S. Thomas, "Costs, Benefits, and Adoption of Additive Manufacturing: A Supply Chain Perspective," *The International Journal of Advanced Manufacturing*, vol. 85, p. 1857-1876, 2016.
- [30] T. Gutowski, S. Jiang, D. Cooper, G. Corman, M. Hausmann, J.-A. Manson, T. Schudeleit, K. Wegener, M. Sabelle, J. Ramos-Grez and D. P. Sekulic, "Note on the Rate and Energy Efficiency Limits for Additive Manufacturing," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 21, no. S1, pp. S69-S79, 2017.
- [31] M. Gebler, A. J. M. Schoot Uiterkamp and C. Visser, "A Global Sustainability Perspective on 3D Printing Technologies," *Energy Policy*, p. 158-67, 2014.

- [32] M. Baumers, C. Tuck, R. Wildman, I. Ashcroft and R. Hague, "Energy Inputs to Additive Manufacturing: Does Capacity Utilization Matter?," *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, pp. 30-40, 2011.
- [33] M. Baumers, Economic Aspects of Additive Manufacturing: Benefits, Costs and Energy Consumption, E. b. C. T. A. P. P. D, Ed., 2012.
- [34] T. Campbell, C. Williams, O. Ivanova and B. Garret, "Could 3D Printing Change the World? Technologies, Potential and Implications of Additive Manufacturing, Strategic Foresight," *Atlantic Council (www.acus.org)*, 2011.
- [35] L. A. Verhoef, B. W. Budde, C. Chockalingam, B. G. Nodar and A. J. v. Wijk, "The Effect of Additive Manufacturing on Global Energy Demand: An Assessment Using a Bottom-up Approach," *Energy Policy*, vol. 112, pp. 349-360, 2018.
- [36] DOE, "Additive Manufacturing Technology Assessment (pre-decisional draft). Washington DC, United States," 2015.
- [37] S. Torres-Carrillo, H. Siller, C. Vila, C. López and C. Rodríguez, "Environmental analysis of selective laser melting in the manufacturing of aeronautical turbine blades," *Journal of cleaner production*, vol. 246, 2020.
- [38] O. Diegel, P. Kristav, D. Motte and B. Kianian, "Additive Manufacturing and its Effect on Sustainable Design," *Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing. Volume I*, vol. 1, pp. 73-99, 2016.
- [39] D.-G. Ahn, "Direct Metal Additive Manufacturing Processes and their Sustainable Applications for Green Technology: A Review," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 3, no. 4, pp. 381-395, 2016.
- [40] R. Thomas and G. Witt, "Experimental Analysis of the Laser-Sintering Process from an Energetic Point of View," *Annals & Proceedings of DAAAM International*, 2012.
- [41] C. Telenko and C. C. Seepersad, "A Comparison of the Energy Efficiency of Selective Laser Sintering and Injection Molding of Nylon Parts," *Rapid Prototyping Journal*, 2012.
- [42] R. Sreenivasan and D. Bourell, "Sustainability Study in Selective Laser Sintering- An Energy Perspective.," *Metals and Materials Society/AIME*, 2010.
- [43] M. Baumers, C. Tuck, D. L. Bourell, R. Sreenivasan and R. Hague, "Sustainability of Additive Manufacturing: Measuring the Energy Consumption of the Laser Sintering Process," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2011.
- [44] X. Xu, S. Meteyer, N. Perry and Y. F. Zhao, "Energy Consumption Model of Binder-Jetting Additive Manufacturing Processes," *International Journal of Production Research*, vol. 53, no. 23, p. 7005-7015, 2015.
- [45] V. A. Balogun, N. D. Kirkwoo and P. T. Mativenga, "Direct Electrical Energy Demand in Fused Deposition Modelling," *Procedia CIRP 15. 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, pp. 38-43, 2014.
- [46] H.-S. Yoon, J.-Y. Lee, H.-S. Kim, M.-S. Kim, E.-S. Kim, Y.-J. Shin, W.-S. Chu and S.-H. Ahn, "A Comparison of Energy Consumption in Bulk Forming, Subtractive, and

- Additive Processes: Review and Case Study,” *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing-Green Technology*, vol. 1, no. 3, pp. 261-279, 2015.
- [47] L. Clemon, A. Sudradjat, M. Jaquez, A. Krishna, M. Rammah and D. Dornfeld, “Precision and Energy Usage for Additive Manufacturing,” *ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, V02AT02A015-V02AT02A015. American Society of Mechanical Engineers*, 2013.
- [48] P. Dudek and K. Zagórski, “Cost, Resources, and Energy Efficiency of Additive Manufacturing,” *E3S Web of Conferences. Energy and Fuels*, vol. 14, no. 01040, 2017.
- [49] D. Kim, I. H. Lee and H. Y. Cho, “A Study on the Mechanical Properties of Additive Manufactured Polymer Materials,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, vol. 39, no. 8, pp. 773-780, 2015.
- [50] T. Swetly, J. Stampfl, G. Kempf and M. Hucke, “Capabilities of Additive Manufacturing Technologies (AMT) in the Validation of the Automotive Cockpit,” *RTEjournal - Forum für Rapid Technologie*, 2014.
- [51] E. & Y. G. L. (EYG), “EY’s Global 3D printing Report,” GSA Agency, 2016.
- [52] E. P. Popov, *Mecánica de materiales*, Limusa, 2013.
- [53] J. M. Gere, *Mechanics of Materials*, USA: Thomson Learning, 2004.
- [54] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, Cambridge: Butterworth Heinemann, 2000.
- [55] H. Bikas, P. Stavropoulos and G. Chryssolouris, “Additive Manufacturing Methods and Modelling Approaches: a Critical Review,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 83, p. 389-405, 2016.
- [56] J. Madan, M. Mani, J. H. Lee and K. W. Lyons, “Energy Performance Evaluation and Improvement of Unit-Manufacturing Processes: Injection Molding Case Study,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 105, pp. 157-170, 2015.
- [57] D. Pal, N. Patil, M. Nikoukar, K. Zeng, K. H. Kutty y B. E. Stucker, «An Integrated Approach to Cyber-Enabled Additive Manufacturing Using Physics Based, Coupled Multi-Scale Process Modeling,» *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2013.
- [58] C. Bellehumeur, L. Li, Q. Sun and P. Gu, “Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 6, no. 2, pp. 170-178, 2004.
- [59] C. Rauwendal, *Polymer Extrusion*, Hanser Publishers, 2014.
- [60] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Termodinámica*, Mc. Graw Hill, 2012.
- [61] A. Bellini, “Liquefier Dynamics in Fused Deposition,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 126, no. May 2004, pp. 237-246, 2004.
- [62] B. N. Turner, R. Stron and S. A. Gold, “A Review of Melt Extrusion Additive Manufacturing Processes: I. Process Design and Modeling,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 192-204, 2014.
- [63] W. J. Heij, “Feed Velocity Feedback for High Speed Fused Deposition Modelling Machines,” 2016.

- [64] S. L. Devlin, "Modeling of Filament Deposition Rapid Prototyping Process with a Closed Form Solution," 2017.
- [65] P. F. Jacobs, "Fundamentals of Stereolithography," *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 196-211, 1992.
- [66] A. M. Elliott, The Effects of Quantum Dot Nanoparticles on the Polyjet direct 3d Printing Process, Blacksburg, VA: Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, 2014.
- [67] P. K. V. Venuvinod and W. Ma, Rapid Prototyping. Laser-based and Other Technologies, Springer Science+ Business Media New York, 2004.
- [68] S. P. Papas, Radiation Curing. Science and Technology, Springer Science+Business Media, LLC, 1992.
- [69] D. B. Milèna, Investigation of Interpenetrating Polymer Networks and Recent UV Curable Chemistries, Mulhouse, 2011.
- [70] J. C. Riddick, A. J. Hall, M. A. Haile and R. V. Wahldt, "Effect of Manufacturing Parameters on Failure in Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Fabricated by Fused Deposition Modeling," *Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. April 2012*, 2012.
- [71] ASTM, "ASTM D638 – 10. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," 2010.
- [72] Stratasys, "FDM Materials," [Online]. Available: <http://www.stratasys.com/mx/materiales/fdm>. [Accessed 3 April 2015].
- [73] Stratasys, "Stratasys Polyjet Technology," [Online]. Available: <http://stratasys.com/3d-printers/technology/polyjet-technology>. [Accessed 1 August 2016].
- [74] DWS, "DWS Precisia DL260," [Online]. Available: [www.http://hexagongroup.pl/zywice/precisia-dl260/](http://www.hexagongroup.pl/zywice/precisia-dl260/). [Accessed 5 May 2017].
- [75] DWS, "Additive Manufacturing Digital Wax," dwssystem, Italy, 2016.
- [76] Stratasys, "Design for Additive Manufacturability: FDM Basics," RedEyeOnDemand.com, 2014.
- [77] MatWeb, "MatWeb - The Online Materials Information Resource. Material Property Data," Copyright 1996-2019 by MatWeb, LLC. [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search>. [Accessed 5 10 2018].
- [78] R. Krache and I. Debbah, "Some Mechanical and Thermal Properties of PC/ABS Blends," *Materials Sciences and Applications*, vol. 2, pp. 404-410, 2011.
- [79] L. Yanchun, J. Zhiming, L. Ming-Chuan and R. J. Caudill, "Environmental Performance Analysis of Solid Freedom Fabrication Processes," *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (Cat. No.99CH36357)*, pp. 1-6, 1999.
- [80] S. S. Muthu and M. M. Savalani, "Sustainable Impact Evaluation of Support Structures in the Production of Extrusion-Based Parts," in *Handbook of*

- Sustainability in Additive Manufacturing: Volume 1*, Singapore, Springer Singapore, 2016, pp. 7-30.
- [81] Z. Liu, Q. Jiang, F. Ning, H. Kim, W. Cong, C. Xu and H.-C. Zhang, "Investigation of Energy Requirements and Environmental Performance for Additive Manufacturing Processes," *Sustain. Sci. Pract. Policy*, vol. 10, no. 10, p. 3606, 2018.
- [82] S. Junk and S. Côté, "A practical Approach to Comparing Energy Effectiveness of Rapid Prototyping Technologies," *Proceedings of AEPR'12, 17th European Forum on Rapid Prototyping and Manufacturing*, 2012.
- [83] Stratasys, "Fortus 360mc / 400mc 3D Production System. User Guide," Stratasys, Inc., 2015.
- [84] DWS, "Stereolithography Machine Digital Wax 020x. Instruction Manual for Use and Maintenance," DWS S.r.l., Italy, 2015.
- [85] J. C. Riddick, M. A. Haile, R. V. Wahlde, D. P. Cole, O. Bamiduro y T. E. Johnson, «Fractographic Analysis of Tensile Failure of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Fabricated by Fused Deposition Modeling,» *Additive Manufacturing*, vol. 11, pp. 49-59, 2016.

ANEXOS

En esta sección se exponen los artículos internacionales como resultado de la investigación científica.



Energy consumption analysis for additive manufacturing processes

A. Horacio Gutierrez-Osorio¹ · Leopoldo Ruiz-Huerta^{2,3} · Alberto Caballero-Ruiz^{2,3} · Héctor R. Siller⁴ · Vicente Borja⁵

Received: 19 June 2019 / Accepted: 9 September 2019 / Published online: 23 October 2019
© Springer-Verlag London Ltd., part of Springer Nature 2019

Abstract

Additive manufacturing (AM) is defined as the process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, in contrast to subtractive or forming manufacturing methodologies. In studies of energy consumption in AM systems reported in the literature, the electric energy consumed by different technologies was measured directly in the main electrical supply wires of the machines, which does not represent the process energy consumption, because there are peripheral devices that do not have an influence on the process. In order to generate a better approach to the energy consumption of the AM process, this paper presents a proposal to measure the energy consumption directly in the system stage in which the AM processes are performed: preparing the material for extrusion, deposition, selection, gluing, curing, and so on, obtaining the geometry of a layer defined by an area with a certain thickness, and carrying out bonding between the layers to form a solid part. Because the combination of material and manufacturing processes determine the mechanical properties of a built part and because different materials and processes could be used to obtain these mechanical properties with different energy consumption values, the authors suggest mathematical models for three AM processes (material extrusion, vat photopolymerization, and material jetting) which predict the energy consumption and then compare the values with their experimental results, obtaining a difference of less than 10%, and find the parameters which define the differences in energy consumption among the processes.

Keywords Additive manufacturing · Digital Manufacturing · Energy consumption · Mechanical properties · Green manufacturing

1 Introduction

Additive manufacturing (AM) is defined as the process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, in contrast to subtractive or forming manufacturing methodologies. AM processes are classified in seven categories:

material extrusion (ME), material jetting (MJ), binder jetting, sheet lamination, vat photopolymerization (VP), powder bed fusion, and directed energy deposition [1]. Each of these processes has different associated characteristics according to its specific technological requirements and materials.

AM offers key benefits over other manufacturing processes in terms of cost, speed, quality, innovation/transformation, impact reduction of the cost and time involved in product development, elimination of tooling, cost-efficient production of small batches, fabrication of customized parts, free form production of very complex parts, elimination of material waste, reduction of inventory, reduction of the supply chain, and the potential to reduce resources, energy consumption demands, and CO₂ emissions, to mention but a few, as well as in the manufacture of spare parts and repairs [2–9].

The global AM market has been growing during the last years; it grew by 17.4% (to \$6.06 billion USD) in 2016 and by 21% (to \$7.336 billion USD) in 2017. The trend in the coming years is continued growth [10].

The number of AM processes is not growing as fast as the number of materials that they use and there are studies that reveal the existence of materials for AM technologies which

✉ Leopoldo Ruiz-Huerta
leoruiz@unam.mx

¹ Programa de Posgrado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, AP 70-186,04510 Mexico, Mexico

² National Laboratory for Additive and Digital Manufacturing MADiT, Mexico, Mexico

³ Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria AP 70-186, 04510 Mexico, Mexico

⁴ Department of Engineering Technology, University of North Texas, 3940 N. Elm St., Denton, TX 76207, USA

⁵ Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510 Mexico, Mexico

produce parts with similar values of Young's modulus, tensile, and impact strength [11–12]. Multiple technologies, materials, and mechanical properties have been reviewed from data sheets of AM companies [13–16], identifying materials and AM processes that can produce parts with similar mechanical properties.

With more materials than ever before, the opportunities for innovation are huge. The selection of an appropriate material and its conversion into a useful product with the desired shape and properties is a complex activity [17]. The choice of material cannot be made independently of the choice of the manufacturing process [18]. Therefore, to reduce the energy consumption of a product during the manufacturing stage, design considerations need to be taken into account. By identifying where the energy is used during production and how effectively it is used, the designer gains an insight into the energy efficiency of the process in relation to a product. This knowledge can empower the designer to intelligently explore the suitability of a product feature or material and consequently the chosen manufacturing process with energy minimization in mind [19].

The average growth rate of electricity consumption in the world from 1974 to 2016 was 3.3% [20]. The industrial sector represents the 41.6% of the total, which is the highest global percentage of electricity consumption, and the trend of electricity consumption in this sector for the coming years is growing [21]. AM is a fabrication process that is in continuous growth [10], and it implies a growth in the demand of electric energy as well.

Energy and time in AM, as in any fabrication process, are critical factors to consider in production systems because they define the efficiency, productivity, and cost [2, 22]. One of the global priorities in the standardization of methods, terminology, materials, and so on, in relation to AM in the world, is focused on sustainability [2, 22]. This is accomplished by pursuing the goal of implementing the certification of energy-saving applications. For this reason, researches have been investigating energy consumption in AM in order to build the basis to support the scientific and technological aspects related to standardization of AM [22].

Some authors have analyzed the sustainability of some AM technologies, studying the electric energy consumption in the stages of preheating, production, cooling, and so on of selective laser sintering (SLS) [23–26], binder jetting [27], and fused deposition modelling (FDM) [28]. Other authors have compared the energy consumption of SLS with injection moulding (IM) [24], and others have made a comparison of energy consumption in bulk forming and subtractive and additive processes [29]. Some authors have developed a methodology for calculating digital manufacturing, energy consumption, and build volume capacity utilization; thus, they estimate the cost of parts manufactured by the next systems: laser-based AM processes utilizing powder bed, electron beam melting, laser sintering, and FDM [6–7]. In addition, some authors have tested different machines to measure the energy consumption using FDM and PolyJet technologies as well [30].

The studies mentioned in the previous paragraph, concerning energy consumption in AM, measured the electric energy consumed by different technologies by means of apparatus (loggers) directly connected to the main electrical supply wires of the machines, determining in this way the energy consumption that corresponds to each stage of the process (heating, cooling, working, idle, etc.). As a result, the values of total energy consumption are distinct due to the differences among the processes, technologies, machines, and materials. The total energy consumption measured in this way is the sum of the energy consumption required by the process of layer-by-layer formation of material (hereinafter referred to as energy consumption) plus the energy consumption of the peripheral elements and accessories associated with the technology (Fig. 1). Such a measurement does not distinguish the energy consumption of the process itself from that of the peripheral elements and accessories of the machine. From this situation, the authors of this paper identify, as an important research area, the study of the energy consumption of the AM process without considering the peripheral elements and accessories, when parts manufactured from different materials and by different AM processes reach similar values of their mechanical properties.

In this paper, the energy process analysis is related to the stage in which the parts are manufactured: getting the material ready to be extruded, deposited, selected, glued, cured, and so on, obtaining the geometry of a layer defined by an area with a certain thickness, and carrying out bonding between the layers to form a solid part [1]. This value will simply be called the energy consumption.

2 Research proposal

Mechanical performance is one of the major concerns for designers and manufacturers, and it is essential to satisfy the design requirements and regulations. For that reason, typically, mechanical properties are the key factor in selecting a material and its manufacturing process, but different materials and processes can satisfy these requirements with different energy consumption values.

To identify how similar the mechanical properties are by using AM technologies and materials available in the laboratory for this work, multiple datasheets were reviewed. The materials identified and selected with close tensile strength and Young's modulus properties were PC® for ME, RIGUR RGD450® for MJ, and DL260® for laser-based VP.

With the material–process combination found in this paper, experimental tests were performed in order to verify the tensile strength and Young's modulus. In order to propose a mathematical model which predicts the energy consumption for each process, the models described by other authors [31–38] were applied and adapted. Measurements of energy

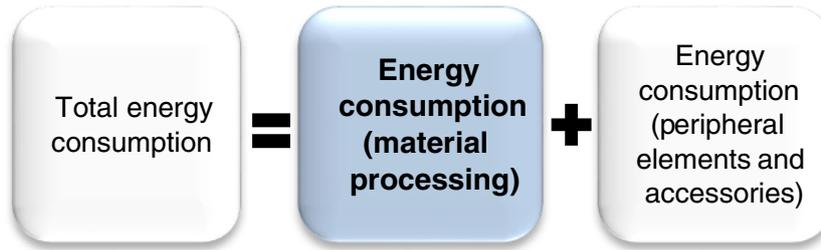


Fig. 1 Total energy consumption of a manufacturing system expressed as the sum of the process and peripherals and accessories

consumption were performed in order to compare the results with the mathematical model defined for every process.

2.1 Mechanical properties of parts manufactured by AM processes

To verify the mechanical properties identified by manufacturers, a series of tensile tests were carried out. These materials were processed with the machines Stratasys Fortus 400, Stratasys Objet500 Connex3, and DWS 020X respectively to manufacture 10 samples using each material in accordance with the edge build direction and default parameters recommended by Stratasys [15–16] and DWS [39]. The geometry and tensile tests of the samples were performed under the ISO 527-2/ASTM D638 standards using a Shimadzu AGS-X 50-kN universal tensile test machine with a test speed of 5 mm/min and a load cell of 50 kN.

In this work it, has been considered that the mechanical properties (tensile strength and Young’s modulus) of the samples manufactured by different AM processes and materials are similar when the difference in value between samples is less than 10%.

2.2 Mathematical models of energy consumption

The total energy consumption of a machine is defined by many sub-processes (stages) [27, 40]. Mathematically, it can be expressed as [27, 40]:

$$E_T = \sum_{i=1}^m E_i \tag{1}$$

where E_T is the total energy consumption, E_i is the energy consumption of the stages i , with $i = 1, 2, 3, \dots, m$, and m is the number of the stages (control system, feeding, material processing, removal, etc.) [41]. This means that:

$$E_T = E_{\text{Material processing}} + E_{\text{Control System}} + E_{\text{Feeding}} + \dots + E_{\text{Removal of the part}} \tag{2}$$

Since this work aims to find the energy consumption required for the material processing stage, only the first term of Eq. (2) is analyzed, considering that $E_{\text{Consumption}} = E_{\text{Material processing}}$; therefore, the peripheral elements and accessories

(given by the sum of the other terms of Eq. (2), i.e., $E_{\text{Peripheral elements and accessories}} = E_{\text{Control System}} + E_{\text{Feeding}} + \dots + E_{\text{Removal of the part}}$) are not considered because these elements are technological components (rollers, pumps, electronic boards, and circuits, among others), which are dependent on the machine selected for a specific part to be manufactured, the specific efficiency of every chosen component, and so on. This is shown schematically in Fig. 1. The energy consumption studied in this work is shown in the coloured square.

Although there are mathematical approaches which define the total energy consumption and although the power has been measured directly on the machines, it has been identified that such approaches do not particularize the relationship that exists between the different manufacturing conditions [parameters of the process (layer thickness, raster width, deposition velocity, etc.) and of the material (critical exposure, density, heat capacity, etc.)] for each of the processes studied. From this condition, mathematical models of energy consumption were proposed as a function of the parameters of the process and of the material for the three AM processes studied.

2.2.1 Considerations for material extrusion

A built part formed by a number of layers N that complete its height Z has been considered. Each of its layers j has a projected area A which is made up of a number of filaments n with a raster width w , thickness h , and length Y needed to complete the base X (see Fig. 2). It has been considered that the built part is solid.

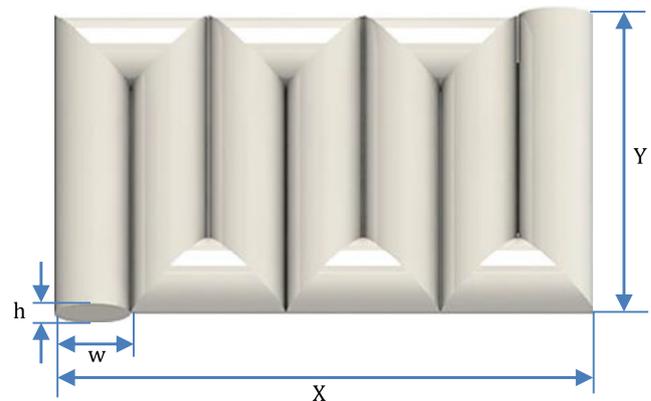


Fig. 2 Formation of layers in ME

The mathematical model to determine the energy consumption of the ME process was deduced from the combination of the equations for the enthalpy of the extrusion process [31], the flux of mass through the nozzle (tip) [32–34], and the heat flux required by the extrusion process [31]. This means that the energy consumption in the ME process is defined by the nozzle and heat flux transferred to the polymer [35]. See Table 1.

2.2.2 Considerations for laser-based vat photopolymerization

Each of the layers j has a projected area A and a layer thickness h and is scanned by a laser beam that has a Gaussian radius w . The area A is defined by X and Y (Fig. 3). The laser scans A string by string with a hatching space s and a scan speed v [36].

The mathematical model to determine the energy consumption of the VP process was deduced from the combination of the equations for the exposure [36–37], the maximum exposure [36, 38], and the laser power needed to cure the resin [36, 38]. See Table 1.

2.2.3 Considerations for material jetting

Each of the layers j has a projected area A defined by X and Y and a layer thickness h . To cover A with respect to its dimension Y , it is necessary to consider the number of strokes required to complete Y and, in this way, the entire projected area of the layer. The number of strokes will depend on the dimension y_0 , which is defined as the width of the jetting head. The ultraviolet (UV) light is provided by means of two UV lamps, one on each side (Fig. 4).

The mathematical model to determine the energy consumption of the MJ process was deduced considering the amount of UV exposure required to reach the full conversion of the monomer at a determined thickness, which is different for each resin [42]. See Table 1.

Table 1 Mathematical models of energy consumption of the AM processes

Processes	Energy consumption
ME	Eq. (3) $E = \sum_{j=1}^{N-h} \left(\frac{\pi \rho d^2 C_p (\Delta T)}{4w} \right) A_j$
VP	Eq. (4) $E = \sum_{j=1}^{N-h} \left(\frac{C_d}{s \sqrt{\frac{2}{\pi}}} \right) A_j$
MJ	Eq. (5) $E = \sum_{j=1}^{N-h} (E_{c,h}) A_j$

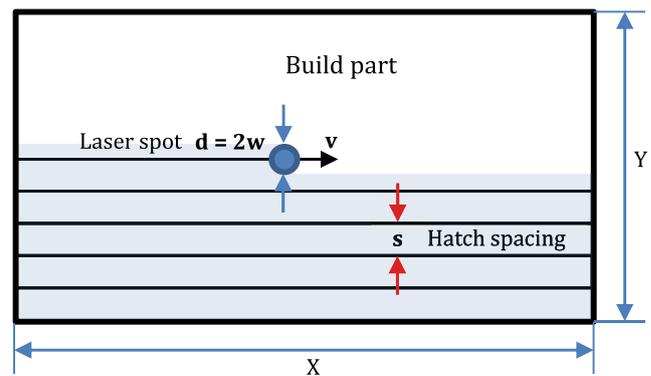


Fig. 3 Formation of layers in VP

2.3 Measuring energy consumption

The energy consumption of the three processes studied, ME, VP, and MJ, was measured considering the specific energy consumption (SEC), which is defined as the energy required per unit volume [29], regardless of the difference in dimensions for every material–process combination.

2.3.1 Measuring energy consumption for ME process

The equipment used to take the measurements was a Fluke 435 II power quality and energy analyzer (Fig. 5) in association with its respective data analyzer software, Power Log 430-II, both connected at the electrical resistance of the extrusion head. Additionally, other parameters, namely the extrusion temperature and inner diameter of each tip used, were measured. Three samples ($141.5 \times 141.5 \times 2.54$ mm) were manufactured with PC® using a Fortus 400 machine for each tip, T12, T16, and T20, with layer thicknesses of 0.178, 0.254, and 0.330 mm, respectively, a raster width = 0.5 mm, air gap = 0 mm, and raster angle = $45^\circ/-45^\circ$ for all the tips).

2.3.2 Measuring energy consumption for VP process

The laser UV power was measured at the output using a Newport model 2832-C power metre with a Newport model 818-UV sensor (Fig. 6). Three samples ($50 \times 50 \times 10$ mm,

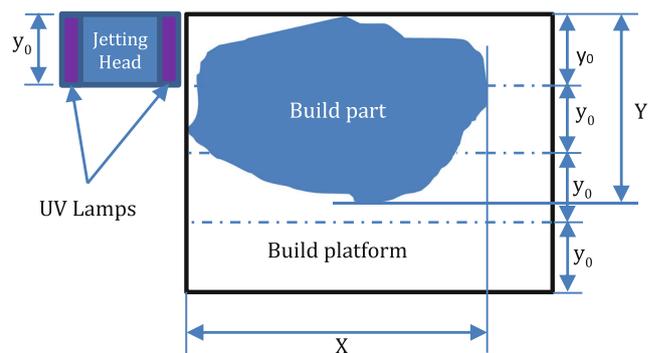


Fig. 4 Formation of layers in MJ

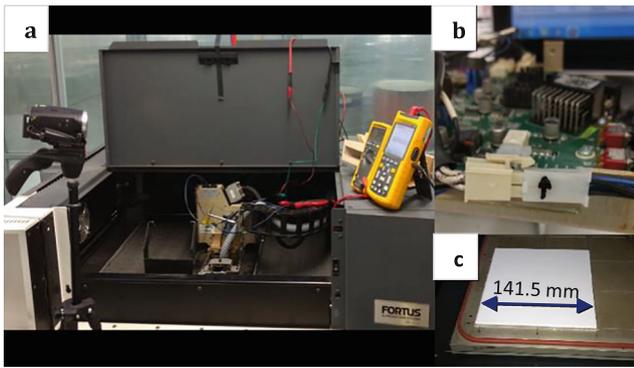


Fig. 5 Energy consumption measurement of the ME process. **a** Instrumentation of Fortus 400 machine. **b** Connection to the electronic head to plug in the measuring apparatus. **c** Sample

layer thickness = 0.040 mm, scan speed = 4.6 m/s, and laser spot = 0.050 mm) were built with DL260® using a DWS 020X machine.

2.3.3 Measuring energy consumption for MJ process

The exposure to the UV radiation that falls on the drops deposited was measured with a G&R Labs model 221 radiometer/dosimeter (Fig. 7). Three samples (10 × 10 × 10 mm; layer thickness = 0.030 mm; mode: digital material; finish: glossy) were built with RIGUR RGD450® using an Objet500 machine.

3 Results

3.1 Tensile test results

The results of the tensile test performed to verify how close the values of the mechanical properties of the parts manufactured from the AM materials and processes studied are shown in Fig. 8 were as follows: Y is Young's modulus; T is the tensile strength (yield); σ is the standard deviation; ΔY is the difference in Young's modulus; $\% \Delta Y$ is the percentage difference in

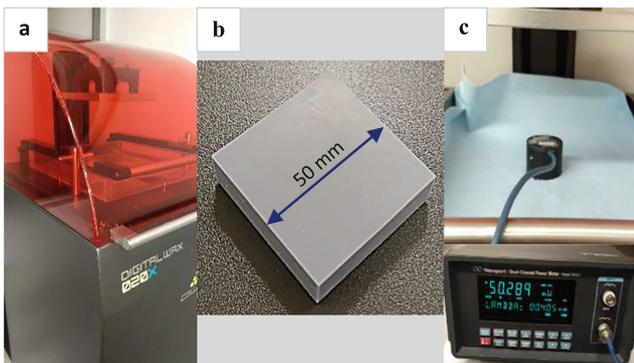


Fig. 6 Measurement of the energy consumption of the VP process. **a** DWS 020X machine. **b** Sample. **c** Power metre sensor

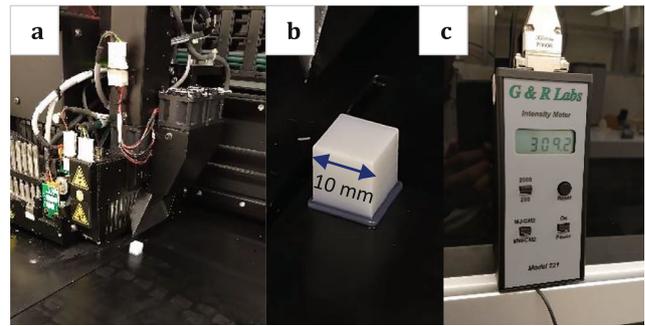


Fig. 7 Energy consumption measurement of the MJ process. **a** Objet500 machine. **b** Sample. **c** UV radiation sensor

Young's modulus with respect to the minimum value; ΔT is the difference in T with respect to the minimum value; and is the percentage difference in T .

3.2 Mathematical model of energy consumption

Table 1 shows the equations that represent the mathematical models proposed by the authors of this work to determine the energy consumption of the AM process as a function of the parameters of the process and of the material used. Table 2 shows the nomenclature that corresponds to each of the parameters involved in the equations which were derived from the application and adaptation of the models made by other authors [31–38].

3.3 Energy consumption by the proposed mathematical model versus the measured values

Figure 9 shows the difference between the energy consumption obtained by measurement and by the proposed mathematical models (Eqs. (3), (4), and (5)). The values of the parameters used to feed such equations are shown in Table 2; they

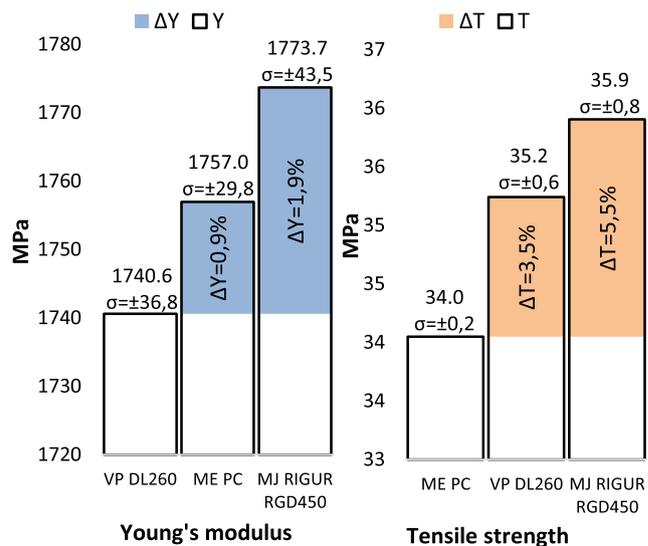


Fig. 8 Results of mechanical properties

Table 2 Nomenclature of the parameters

ME	<p><i>E</i>: Energy consumption ρ: Density = 1300 kg/m³ <i>d</i>: Inner diameter of the tip* = 0.5; 0.4; 0.3 mm (T20, T16, T12, respectively) C_p: Heat capacity = 1170 J/kg K ΔT: Change of temperature = Extrusion temperature–room temperature* = 621.15 K <i>w</i>: Raster width = 0.5 mm <i>A</i>: Projected area (of each layer, <i>j</i>) = 0.02 m² <i>N</i>: Number of layers = Upper integer (<i>Z</i>/<i>h</i>) = 8; 10; 15 (T20, T16, T12, respectively) <i>Z</i>: Height of the part = 2.54 mm <i>h</i>: Layer thickness = 0.33; 0.254; 0.178 mm (T20, T16, T12, respectively)</p>
VP	<p><i>E</i>: Energy consumption <i>A</i>: Projected area (of each layer, <i>j</i>) = 0.0025 m² <i>w</i>: Gaussian laser spot radius = 0.025 mm <i>N</i>: Number of layers = upper integer (<i>Z</i>/<i>h</i>) = 250 <i>Z</i>: Height of the part = 10 mm <i>h</i>: Layer thickness = 0.040 mm E_c: Critical exposure = 94.8 J/m² D_p: Depth of penetration = 0.079 mm C_d: Cure depth = 0.157 mm <i>s</i>: Hatch spacing = 0.070 mm</p>
MJ	<p><i>E</i>: Energy consumption <i>A</i>: Projected area (of each layer, <i>j</i>) = 1 cm² <i>N</i>: Number of layers = Upper integer (<i>Z</i>/<i>h</i>) = 334 <i>Z</i>: Height of the part = 1 cm <i>h</i>: Layer thickness = 0.030 mm $E_{c,h}$: Exposure required to reach the conversion and the thickness <i>h</i> = 10.03 mJ/cm²</p>

were obtained from the manufacturers' technical information and those marked with an asterisk (*) were measured during the experimentation.

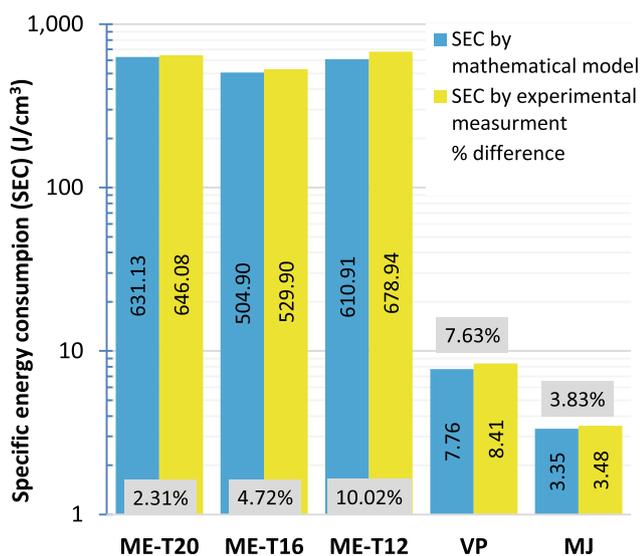


Fig. 9 Comparison between mathematical model and experimental measurement

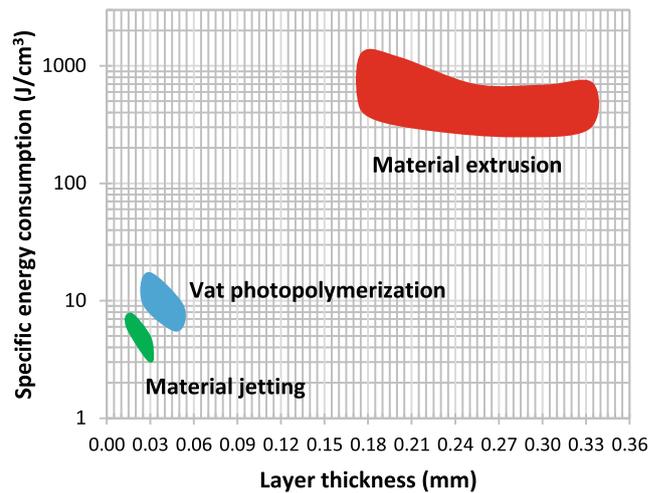


Fig. 10 Regions of specific energy consumption for ME, VP, and MJ

3.4 Regions of energy consumption

Figure 10 graphs the values of energy consumption for the three processes. They were drawn from point clouds obtained by substituting the values of the parameters of the process and of the material into Eqs. (3), (4), and (5), considering the materials studied and varying the layer thickness because it is the most common parameter that can be set by the user. To form the regions, the intervals of layer thickness are in the following ranges: 0.178–0.33 mm for ME, 0.03–0.05 mm, for VP, and 0.016–0.03 mm for MJ. Additionally, the raster width and the hatching space were as follows: 0.254–0.9822 mm for ME and 0.05–0.07 mm for VP, respectively.

4 Discussion

The results in Fig. 8 show that for the selected materials and AM processes, both the tensile strength and Young's modulus of the parts manufactured have similar values, since the differences in the mentioned properties are below 6%. This confirms that different AM processes are capable of manufacturing parts with similar mechanical properties; this is because of the nature of the polymers evaluated. This implies that in the product design stage it is possible to select among different AM processes due to the wide field of materials that could offer similar values of mechanical properties.

From the proposed mathematical models of energy consumption shown in Table 1 for each of the processes analyzed, the following findings must be taken into account when a part will be manufactured by an ME, VP, or MJ process.

In the ME process, which has a higher SEC, the volumetric flow (the amount of material deposited per unit time) is faster than that in the other processes, but it has been reported that this process gives the worst surface quality [43–45]. In the VP

Table 3 Other mechanical properties

Property	ME- PC	VP- DL 260	MJ-RIGUR RGD 450
Hardness (Shore Scale D)	80	86–91	80–84
Heat deflection (ASTM D648 @ 1.82 MPa) (°C)	127	45–62	45–50
Flexural Strength (ASTM D790) (MPa)	68–89	52–59	50–65
Flexural Modulus (ASTM D790) (MPa)	1800–2000	1500–1700	1300–2800

and MJ processes, there is a strong relation with the layer thickness: a greater layer thickness gives a lower energy consumption.

Other properties reported for the materials are listed in Table 3 [15–16, 39, 46]. It is noticeable that the values of hardness are similar among the three materials and processes, but this does not apply to the other properties, whose values are similar only for two materials and processes but not for all of them. This implies that although an AM process could be more efficient in terms of energy consumption, it may not be in terms of other properties, so it is necessary to consider this situation when making decisions concerning the choice of a certain material and process. In the comparative analysis made in this study from the energy consumption point of view, the closeness of the tensile strength and Young's modulus among the three processes was considered, but it is necessary to make a trade-off between energy consumption and other properties when those properties are relevant and not similar.

Figure 9 shows that the maximum difference in energy consumption between the experimental results and results of the mathematical model proposed was 10.02%, and it corresponds to ME. Additionally, for ME it is identified that as the tip size decreases, the difference between the mathematical model and experimental results increases.

Figure 10 shows regions that represents the specific energy consumption for each of the AM processes. ME is the process that demands more energy per cubic centimetre, followed by laser-based VP and then MJ. In general, independently of the combinations of the values of the parameters that are involved in Eqs. (3), (4), and (5) (such a combination of parameters has allowed the mapping of the regions), in Fig. 10, a trend of a decrement of the specific energy consumption when increasing the layer thickness is noticeable. In addition, from the same figure, it can be seen that it is possible to find similar values of specific energy consumption for VP and MJ under suitable conditions (combinations of parameters), but this is not possible with ME because the regions of this process with respect to the others are greater. The specific energy consumption of ME ($0.321\text{--}1.202 \times 10^3 \text{ J/cm}^3$) is two orders of magnitude greater than the specific energy consumption of VP ($6.21\text{--}14.52 \text{ J/cm}^3$) and that of MJ ($3.35\text{--}7.00 \text{ J/cm}^3$). As noted, the values of energy consumption of the photopolymerization processes (VP and MJ) are of the same order of magnitude. It should be noted that these values of energy consumption correspond to the process itself, so they

are not comparable with the energy consumption in studies done by other authors [6], [28–30, 47–50], because they correspond to the total energy consumption of the AM machines. Independently of each technology, the energy consumption determined by means of this study will be constant; therefore, if the total energy consumption of a particular machine is known, the energy consumption associated with the peripheral elements and accessories can be determined.

5 Conclusions

The material and processes selection for this study were based on the analysis for the tensile strength and Young's modulus; however, the methodology used in this work can be used to explore other properties.

The regions of specific energy consumption shown in Fig. 10 were drawn as a function of the layer thickness because this is a parameter that can be set by most technologies; however, this analysis can be extended to other conditions (combinations of parameters), obtaining the energy consumption as a function of another parameter of either the process or the material or the geometry.

Finally, the comparison of the AM process has been performed by considering that the values of the mechanical properties of the parts manufactured by different materials and processes are similar. It is important to explore the intervals of energy consumption for the three AM processes when such values are not similar enough. This exploration will be now possible by means of the mathematical model of energy consumption proposed in this work, considering the extent of its robustness.

Funding information This work has been financed by CONACYT LN-232719, LN-271897, LN 280867, LN294415, LN299129 and INFR-294752. Financial support from DGAPA-UNAM through the grant PAPIIME IN106410 is also acknowledged.

References

1. ISO-ASTM, BS-ISO-ASTM-52900 (2015) Additive manufacturing - general principles – terminology
2. Thomas DS (2016) Costs, benefits, and adoption of additive manufacturing: a supply chain perspective. *Int J Adv Manuf* 85: 1857–1876

3. Attaran M (2017) The rise of 3-D printing: the advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Bus Horiz* 60(5):677–688
4. Gutowski T, Jiang S, Cooper D, Corman G, Hausmann M, Manson J-A, Schudeleit T, Wegener K, Sabelle M, Ramos-Grez J, Sekulic DP (2017) Note on the rate and energy efficiency limits for additive manufacturing. *J Ind Ecol* 21:69–79
5. Gebler M, Schoot Uiterkamp AJM, Visser C (2014) A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy* 74:158–167
6. Baumers M, Tuck C, Wildman R, Ashcroft I, Hague R (2011) Energy inputs to additive manufacturing: does capacity utilization matter? *Solid Freeform Fabrication Proc*:30–40
7. Baumers M (2012) Economic aspects of additive manufacturing: benefits, costs and energy consumption. Ph Dissertation
8. Campbell T, Williams C, Ivanova O and Garret B (2011) Could 3D printing change the world? Technologies, potential and implications of additive manufacturing, strategic foresight. Atlantic council
9. Verhoef LA, Budde BW, Chockalingam C, Nodar BG, Wijk AJV (2018) The effect of additive manufacturing on global energy demand: an assessment using a bottom-up approach. *Energy Policy* 112:349–360
10. W. Associates (2018) Wohlers report 2018: 3D printing and additive manufacturing state of the industry: annual worldwide progress report
11. Kim D, Lee IH, Cho HY (2015) A study on the mechanical properties of additive manufactured polymer materials. *Trans Korean Soc Mech Eng A* 39(8):773–780
12. Swetly T, Stampfl J, Kempf G, Hucke M (2014) Capabilities of additive manufacturing technologies (AMT) in the validation of the automotive cockpit. *RTeJournal - Forum für Rapid Technologie*
13. W. Associates (2017) Wohlers report 2017. Service provider survey results. Appendix E
14. EYG (2016) EY's global 3D printing report, GSA Agency
15. Stratasys (2015) FDM materials. <http://www.stratasys.com/mx/materiales/fdm>. Accessed 3 April 2015
16. Stratasys (2016) Stratasys Polyjet technology. <http://stratasys.com/3d-printers/technology/polyjet-technology>. Accessed 1 August 2016
17. Mital A, Desai A, Subramanian A and Mital A (2014) Product development: a structured approach to consumer product development. Design and manufacture
18. Ashby MF (2000) Materials selection in mechanical design. Butterworth Heinemann, Cambridge
19. Seow Y, Goffin N, Rahimifard S, Woolley E (2016) A design for energy minimization approach to reduce energy consumption curing the manufacturing phase. *Energy* 109:894–905
20. IEA (2018) Electricity information. International Energy Agency
21. IEA (2018) Key world energy statistics. International Energy Agency
22. Forster AM (2015) Materials testing standards for additive manufacturing of polymer materials: state of the art and standards applicability. NIST, U.S. Department of commerce
23. Reinhardt T, Gerd W (2012) Experimental analysis of the laser-sintering process from an energetic point of view. *Annals & proceedings of DAAAM international*
24. Telenko C, Seepersad CC (2012) A comparison of the energy efficiency of selective laser sintering and injection molding of nylon parts. *Rapid Prototyp J*
25. Sreenivasan R, Bourell D (2010) Sustainability study in selective laser sintering- an energy perspective, Metals and materials society/ AIME
26. Baumers M, Tuck C, Bourell DL, Sreenivasan R, Hague R (2011) Sustainability of additive manufacturing: measuring the energy consumption of the laser sintering process. *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf* 225:2228–2239
27. Xu X, Meteyer S, Perry N, Zhao YF (2015) Energy consumption model of binder-jetting additive manufacturing processes. *Int J Prod Res* 53(23):7005–7015
28. Balogun VA, Kirkwo ND and Mativenga PT (2014) Direct electrical energy demand in fused deposition modelling. *Procedia CIRP* 15. 21st CIRP Conference on life cycle engineering 38–43
29. Yoon H-S, Lee J-Y, Kim H-S, Kim M-S, Kim E-S, Shin Y-J, Chu W-S, Ahn S-H (2014) A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: review and case study. *Int J Precis Eng Manuf-Green Technol* 1(3):261–279
30. Clemon L, Sudradjat A, Jaquez M, Krishna A, Rammah M, Dornfeld D (2013) Precision and energy usage for additive manufacturing. ASME 2013 international mechanical engineering congress and exposition. American Society of Mechanical Engineers
31. DWS (2017) Precisia DL260. <http://hexagongroup.pl/zywice/precisia-dl260/>. Accessed 5 May 2017
32. Madan J, Mani M, Lee JH, Lyons KW (2015) Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: injection molding case study. *J Clean Prod* 105:157–170
33. Pal D, Patil N, Nikoukar M, Zeng K, Kuttly KH and Stucker BE (2013) An integrated approach to cyber-enabled additive manufacturing using physics based, coupled multi-scale process modelling. *Proceedings of the solid freeform fabrication symposium*
34. Rauwendal C (2014) Polymer extrusion. Hanser Publishers
35. Cengel YA, Boles MA (2012) *Termodinámica*. Mc. Graw Hill
36. Bellini A (2004) Liquefier dynamics in fused deposition. *J Manuf Sci Eng* 126:237–246
37. Turner BN, Stron R, Gold SA (2014) A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. process design and modelling. *Rapid Prototyp J* 20(3):192–204
38. Bellehumeur C, Li L, Sun Q, Gu P (2004) Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modelling process. *J Manuf Process* 6(2):170–178
39. Jacobs PF (1992) Fundamentals of stereolithography. *Proceedings of the solid freeform fabrication symposium*, pp 196–211
40. Siegman AE (1971) An introduction to lasers and masers. McGraw-Hill, New York
41. Gibson I, Rosen D, Stucker B (2014) Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Springer
42. De Brito M (2011) Investigation of interpenetrating polymer networks and recent UV curable chemistries. Mulhouse
43. Kumbhar NN, Mulay AV (2018) Post processing methods used to improve surface finish of products which are manufactured by additive manufacturing technologies: a review. *J Inst Eng Ser C* 99(4): 481–487
44. PostProcess Technologies Inc (2018) White paper - overcoming additive manufacturing surface finishing challenges with automated SRF technology
45. Ruiz-Huerta L, Ortega-Rodriguez A and Caballero-Ruiz A (2014) Relation between tip size, deposition speed and roughness in FDM technology, dimensional accuracy and surface finish in additive manufacturing. *Proceedings ASPE 2014 spring topical meeting*, pp 214–218
46. Krache R, Debbah I (2011) Some mechanical and thermal properties of PC/ABS blends. *Mater Sci Appl* 2:404–410
47. Almeida HA, Correia MS (2016) Sustainable impact evaluation of support structures in the production of extrusion-based parts. In: Muthu SS, Savalani MM (eds) *Handbook of sustainability in additive manufacturing*, vol 1. Springer Singapore, Singapore, pp 7–30
48. Yanchun L, Zhiming J, Ming-Chuan L and Caudill RJ (1999) Environmental performance analysis of solid freedom fabrication processes. *Proceedings of the 1999 IEEE international symposium on electronics and the environment (Cat. No.99CH36357)*, pp 1–6

49. Liu Z, Jiang Q, Ning F, Kim H, Cong W, Xu C, Zhang H-C (2018) Investigation of energy requirements and environmental performance for additive manufacturing processes. *Sustain Sci Pract Policy* 10(10):3606
50. Junk S and Côté S (2012) A practical approach to comparing energy effectiveness of rapid prototyping technologies. *Proceedings of*

AEPR'12, 17th European forum on rapid prototyping and manufacturing

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

CORRELATION BETWEEN BUILDING PARAMETERS, MECHANICAL PROPERTIES AND BUILDING TIME IN MANUFACTURED PARTS BY FDM

Leopoldo Ruiz-Huerta¹, A. Horacio Gutiérrez-Osorio², Alberto Caballero-Ruiz¹ and Vicente Borja³

¹Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva, Digitalización 3D y Tomografía Computarizada (MADiT)

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET)

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria AP 70-186, C.P.

04510, Ciudad de México, México

² Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 04510, México.

³Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, C. P. 04510, Ciudad de México, México.

leoruz@unam.mx

ABSTRACT

This paper describes the effect that building parameters (layer thickness, raster width, raster angle, air gap and part orientation) have on the mechanical properties and building time of parts manufactured by Fused Deposition Modelling (FDM). The authors used the Insight® software to observe the influence of building parameters on building time. The results of the analysis reported in this paper show that building parameters affect the tensile strength and the building time of parts. The obtained building time was correlated with building parameters and mechanical properties reported in [1-4] to finally obtain the correlation between the building parameters, mechanical properties and building time.

BACKGROUND

Additive Manufacturing is the process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, in contrast to subtractive manufacturing methodologies. Additive manufacturing processes are classified within seven categories: material extrusion, material jetting, binder jetting, sheet lamination, vat photo-polymerization, powder bed fusion and direct energy deposition. Each one of these processes has different associated technologies

according to its specific technological performance characteristics [Standard ASTM F2792 - 12th].

FDM technology belongs to the material extrusion process category and, according to the Wohlers Report 2015, represents 23% of the industrial sector of additive manufacturing [5]; for this reason, it is important to study this manufacturing technology from the perspective of the building parameters in order to understand its behaviour when they change, affecting the final characteristics of the part.

There are several works that study the variation of mechanical properties of parts manufactured by FDM depending on the process parameters (building parameters). It has been demonstrated that part orientation plays an important role in the tensile strength [6]. Also, the size of the filaments is determinant in mechanical strength, since smaller filaments affect the tensile strength when arranged in particular directions, while larger filaments behave differently [7].

In general, building parameters, such as raster width, layer thickness, angle raster, air gap, and building orientation (part orientation) are determinant factors in mechanical properties

resulting from parts manufactured by FDM technology [1], [2], [7], [8] and [9]. The inner structure of a construction geometry represented with the software Insight® coincides with the internal structure of a part manufactured by FDM and, with the use of this software, it is possible to obtain the building time of fabricated parts in accordance to building parameters [8].

From the fact that the variation of building parameters directly affects the mechanical properties of the parts, the aim of the work reported in this paper is to identify the correlation between the mechanical properties, the size of filaments and the building time of parts manufactured by FDM. This using ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) as building material and the properties established previously by Godfrey C., et al., Montero, M., et al., Alhubail et al., and Panda et al. [1 - 4].

METHODOLOGY

The building parameters analysed in this study were *layer thickness (LT)*, *part orientation*, *raster angle*, *raster width (RW)* and *air gap* [1]. *Size of filaments (SF)* refers to the size of the cross-section of each filament; in [9], the cross-section of the filament is geometrically modelled as an ellipse. For practical purposes, in this study, *size of filament* is defined as the product of the raster width by the layer thickness.

$$SF = (RW) (LT) \quad (1)$$

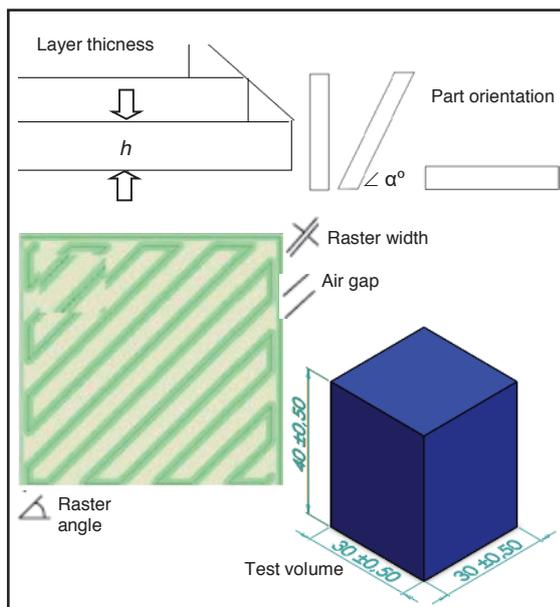


FIGURE 1. Building parameters and testing volume.

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) has been selected as building material as established in [1-4]. The analysis is based on data obtained from tables of Design of Experiments (DOE) by the authors of references [1-4].

A testing volume (30 x 30 x 40 mm) was designed with Solidworks® CAD software and then it was exported as an STL format file to Insight® software to determine building time (Fig. 1).

The next steps were followed to obtain the building time of the testing volume:

- Four tables of DOE reported in [1-4] were reviewed; in [1] and [3], a Stratasys Fortus 400mc machine was used; in [2], a Stratasys FDM 1650; and in [4], a FDM Vantage SE. Building parameters of each table of DOE have different values, levels and number of experiments. For all of the data tables of the above references, except [2], the raster angle was alternated layer by layer so that the filaments of the antecedent layer were orthogonal to those of the subsequent layer. The raster angle between layers is constant in [2].
- The following parameters were taken from data tables: experiment number, air gap, raster width, layer thickness, raster angle, part orientation and tensile strength.
- Using the building parameters data of each experiment, Insight® was employed to calculate the building time of the testing volume.
- Size of filament was calculated using Equation (1) for each experiment.
- With data complete, an analysis to identify the relations between tensile strength, building time and size of filaments was performed, according to the variation of the building parameters involved.

RESULTS

The next relations were found through data analysis.

NOTE: σ is the standard deviation.

Relation 1. Building time vs. raster angle.

Fixing air gap, part orientation and size of filaments; the building time increases when the raster angle changes from 0° to 45°.

For example, for a given group of parameters, the green bar in Fig. 2 represents the building time when the testing volume is manufactured with a raster angle of 0°, while the orange bar represents the time increment when manufacturing the same part with the same building parameters but with a raster angle of 45°.

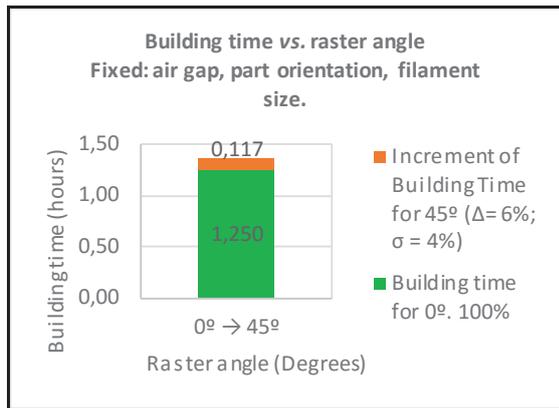


FIGURE 2. Relation 1.

Relation 2. Tensile strength vs. raster angle. Case I.

For negative air gap, fixing: air gap, part orientation and size of filaments; the tensile strength increases when the raster angle changes from 0° to 45°.

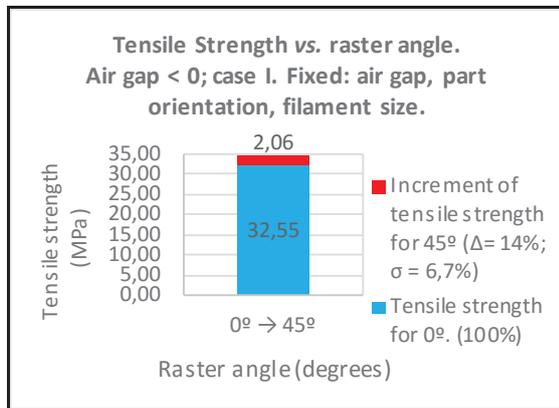


FIGURE 3. Relation 2, case I.

Relation 2. Tensile strength vs. raster angle Case II.

For positive and zero air gap, fixing air gap, part orientation and size of filaments; the tensile strength decreases when the raster angle changes from 0° to 45°.

Figs. 3 and 4 are examples of relation 2: cases I and II. For a given group of parameters, the blue

bar represents the tensile strength when the testing volume is manufactured with a raster angle of 0°, while the red bar represents the increment (in Fig. 3) and decrement (in Fig. 4) of the tensile strength when manufacturing the same part with the same building parameters but with a raster angle of 45°.

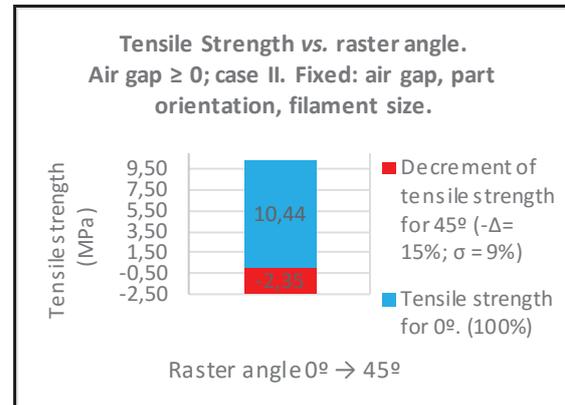


FIGURE 4. Relation 2, case II.

Relation 3. Building time vs. part orientation.

Fixing air gap, raster angle and size of filaments; the building time increases when the part orientation changes from 0° to 90°.

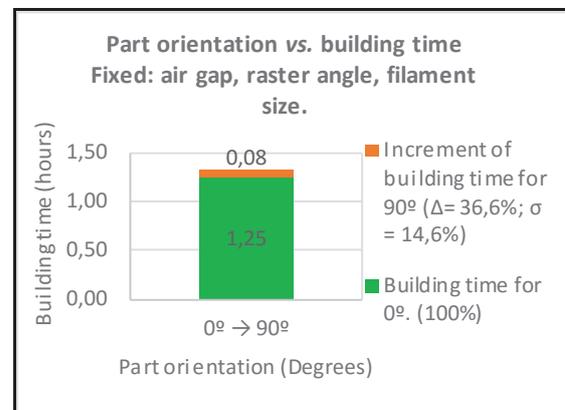


FIGURE 5. Relation 3.

Fig. 5 is analogous to Fig. 2, but the part orientation varies.

Relation 4. Tensile strength vs. part orientation. Case I.

Fixing air gap, raster angle and size of filaments; the tensile strength decreases when the part orientation changes from 0° to 90°.

Fig. 6 is analogous to Fig. 4, but the part orientation varies.

Relation 4. Tensile strength vs. part orientation. Case II.

Fixing air gap, raster angle and layer thickness; the tensile strength decrement is smaller for thick filaments than for thin filaments, when the part orientation changes from 0° to 90°. Observe the decrement shown in Table 1.

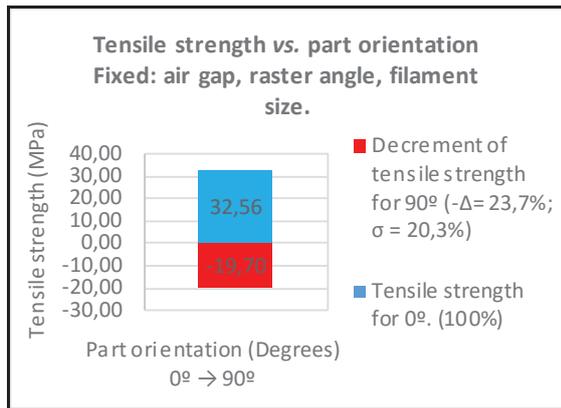


FIGURE 6. Relation 4, case I.

TABLE 1. Relation 4, case II.

Run	Layer thickness, [mm]	Part orientation [°]	Raster angle [°]	Raster width [mm]	Air gap [mm]	Tensile strength [Mpa]	Cross-section of filament, size (cm ²)	Decrement of tensile strength
1	0,1270	0	0	0,2032	-0,00254	32,56	0,026	
9	0,1270	90	0	0,2032	-0,00254	12,86	0,026	60,50%
3	0,1270	0	0	0,5588	-0,00254	24,81	0,071	
11	0,1270	90	0	0,5588	-0,00254	23,55	0,071	5,08%
17	0,3302	0	0	0,4572	-0,00254	31,46	0,151	
25	0,3302	90	0	0,4572	-0,00254	20,55	0,151	34,68%
19	0,3302	0	0	0,9652	-0,00254	24,99	0,319	
27	0,302	90	0	0,9652	-0,00254	24,72	0,319	1,08%

Relation 5. Building time vs. size of filaments.

Fixing air gap, raster angle and part orientation, building time decreases when the size of filaments increases.

For instance, the curve shown in Fig. 7 is formed by a group of points (with the same fixed parameters), which represents the building time of the testing volume, but only varying the size of filaments. If the size of filaments is changed

for other group of fixed parameters, a similar curve is obtained; it means that this phenomenon is the same.

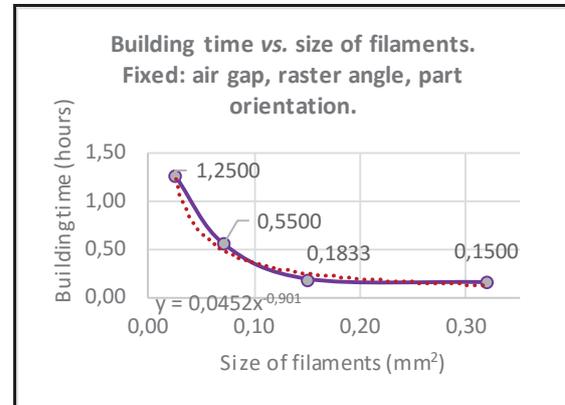


FIGURE 7. Relation 5.

Relation 6. Tensile strength vs. SF. Case I.

Fixing air gap, layer thickness, raster angle and part orientation; for negative and zero air gap: if the part orientation is 0°, the tensile strength decreases when the size of filaments increases.

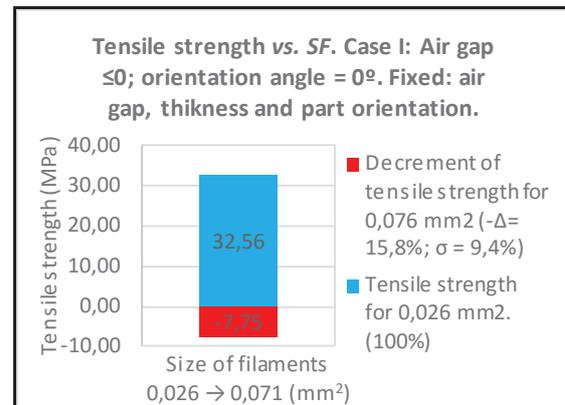


FIGURE 8. Relation 6, case I.

Relation 6. Tensile strength vs. SF. Case II.

Fixing air gap, layer thickness, raster angle and part orientation; if air gap is negative or zero but part orientation is 90°, the tensile strength increases when size of filaments increases.

Relation 6. Tensile strength vs. SF. Case III.

Fixing air gap, layer thickness, raster angle and orientation part; if air gap is positive, the tensile strength increases when the size of the filaments increases; even though the part orientation changes.

Figs. 8, 9 and 10 show examples of relation 6, cases I, II and III. For a given group of parameters: the blue bar represents the tensile strength for thin filaments, while the red bar depicts the decrement (in Fig. 8) and increment (in Figs. 9 and 10) of the same mechanical property (with the same group of parameters) for thick filaments.

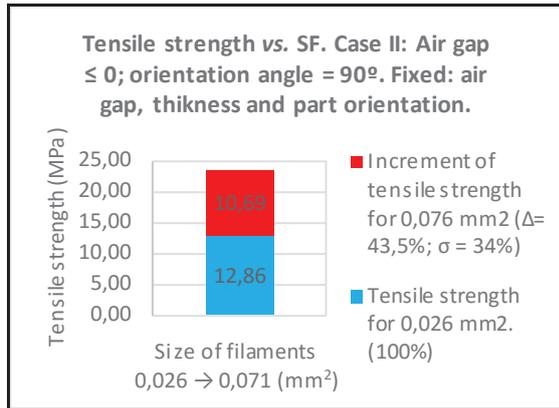


FIGURE 9. Relation 6, case II.

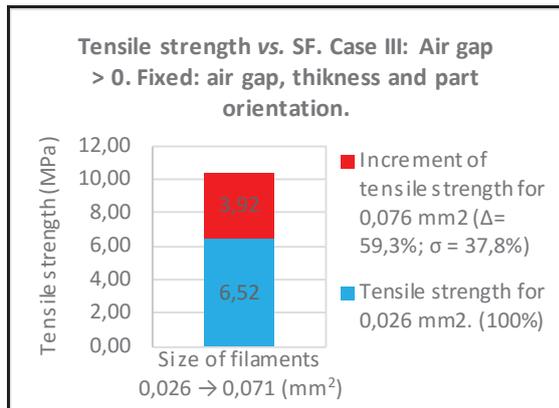


FIGURE 10. Relation 6, case III.

Relation 7. Tensile strength vs. SF.

For negative and zero air gap; fixing air gap, raster angle and part orientation; if the tensile strength is constant (within a range of $\pm 10\%$), the building time decreases when the size of the filaments increases.

Fig. 11 is analogous to Fig. 7.

DISCUSSION

The graphs are meant to show, through an example, the phenomena that occur when an input parameter is changed and others are fixed.

Table 2 summarizes the relations, which show the effect (output) on the tensile strength and building time of changing a parameter from a value to another one (input). For this reason, relations 1, 3 and 5 were omitted because they are implicit in relations 2, 4 and 6, respectively.

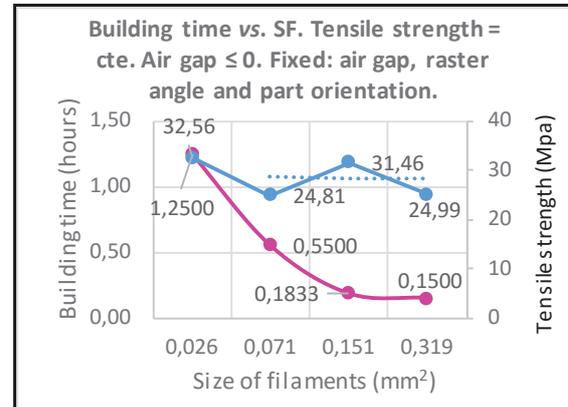


FIGURE 11. Relation 7.

TABLE 2. Summary of relations. FX = Fixed; D = Depends on LT and FS; \rightarrow It changes to; \uparrow It increases; \downarrow It decreases; C=Case.

Relation	Layer thickness	Air gap	Raster angle	Part orientation	Size of filament	Tensile strength	Building Time	Tensile strength (Mpa)	Building time (hours)
2, C-I	D	FX < 0	0° \rightarrow 45°	FX	FX	\uparrow	\uparrow	32,56 \uparrow 34,61	1,25 \uparrow 1,36
2, C-II	D	FX \geq 0	0° \rightarrow 45°	FX	FX	\downarrow	\uparrow	10,44 \downarrow 8,09	0,43 \uparrow 0,46
4, C-I	D	FX	FX	0° \rightarrow 90°	FX	\downarrow	\uparrow	32,56 \downarrow 12,86	1,25 \uparrow 1,33
6, C-I	FX	FX \leq 0	FX	FX = 0	\uparrow	\downarrow	\downarrow	32,56 \downarrow 24,81	1,25 \downarrow 0,55
6, C-II	FX	FX \leq 0	FX	FX = 90	\uparrow	\uparrow	\downarrow	12,86 \uparrow 23,55	1,33 \downarrow 0,70
6, C-III	FX	FX > 0	FX	FX	\uparrow	\uparrow	\downarrow	6,52 \uparrow 10,44	0,48 \downarrow 0,33
7	D	FX \leq 0	FX	FX	\uparrow	FX ($\pm 10\%$)	\downarrow	28,45	1,25 \downarrow 0,15

Input Output Example

Additionally, Table 2 contains two columns of data (tensile strength and building time) in order to give an example for each relation. These data can be observed in the figures as well. As it can be observed in relation 2, C-I, and relation 6, C-I, negative air gap, orientation part of 0° and raster angle of 45° give the best tensile strength (34.61 MPa). Relation 2, C-2, shows that a

positive air gap decreases the tensile strength (10.44 MPa, with respect to 32.56 MPa of relation 2, C-I) as well as with positive air gap, varying the raster angle from 0° to 45°, a decrement of the tensile strength is obtained (from 10.44 MP to 8.09 MPa). The change of part orientation from 0° to 90° (relation 4, C-I) is the cause of the decrement of the tensile strength (from 32.56 MPa to 12.86 MPa). Relations 6, C-I and C-II, describe that for negative and zero air gap, the decrement of the tensile strength is shorter for a part orientation of 0° than the increment of the tensile strength for a part orientation of 90° when increasing the size of the filaments (varying raster width and fixing layer thickness), whereas that decrement of building time decreases almost 50% for both cases. Relation 6, C-III, demonstrates that it is possible to get an increment of the tensile strength and a decrement of the building time for parts with positive air gap if the size of the filaments is increased; this does not imply that a tensile strength similar to the tensile strength of a part with negative air gap can be obtained.

Finally, these relations can be considered for FDM technology-related design, manufacturing or research; for instance, relation 7 states that if thick filaments are selected, then a shorter building time will be obtained (with a similar tensile strength) than with thin filaments. This directly affects the manufacturing cost.

CONCLUSIONS

From the data in the references, supplementary data obtained from Insight® software to determine building time, and from the application of Equation (1) to determine filament size, some relations have been found which describe the tensile strength and building time behaviour of parts manufactured by FDM, considering the changes of the building parameters. More experiments with different data are needed in order to find out what would happen when having other inputs different to those shown in the found relations, but this work is a baseline for further research on other aspects of this subject.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been financed by DGAPA-UNAM through the grant PE-104014. The financial support from CONACYT LN-232719, LN-272897 and INFR-205502 is also acknowledged.

REFERENCES

- [1] Godfrey C. Onwubolu and Farzad Rayegani. Characterization and Optimization of Mechanical Properties of ABS Parts Manufactured by the Fused Deposition Modelling Process. *International Journal of Manufacturing Engineering*, 2014; 13.
- [2] Michael Montero, Shad Roundy, Dan Odell, Sung-Hoon Ahn and Paul K. Wright. Material Characterization of Fused Deposition Modelling (FDM) ABS by Designed Experiments. *Society of Manufacturing Engineers*, 2001, 21.
- [3] M. Alhubail, D. Alenezi and B. Aldousiri. Taguchi-based Optimisation of Process Parameters of Fused Deposition Modelling for Improved Part Quality. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2013; 2 Issue 12, 2505-2519.
- [4] Samir Kumar Panda, Saumyakant Padhee, Anoop Kumar Sood, S. S. Mahapatra. Optimization of Fused Deposition Modelling (FDM) Process Parameters Using Bacterial Foraging Technique. *Intelligent Information Management, Scientific Research*, 2009; 89-97.
- [5] The Wohlers Report 2015.
- [6] Gibson, I., D. W. Rosen. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, USA: 2010.
- [7] Agnes Bagsik, Volker Schöppner. Mechanical properties of fused deposition modelling parts manufactured with ULTEM*9085. *DMRC, ANTEC 2011*; 5.
- [8] Hossain, M. S., Ramos, J., Espalin, D., Perez, M., & Wicker, R. Improving tensile mechanical properties of FDM-manufactured specimens via modifying build parameters. In *24th International SFF Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2013*; 380-392
- [9] Leopoldo Ruiz-Huerta, Adolfo Ortega-Rodríguez and Alberto Caballero-Ruiz. Relation Between Tip Size, Deposition Speed and Roughness in FDM Technology, *Proceedings ASPE Spring Topical Meeting - Dimensional Accuracy and Surface Finish in Additive Manufacturing*. 2014; 214-218.