

Normalización de la caracterización de manufacturas FDM para su aplicación en el sector del transporte

Standardization of FDM Manufactured Parts for Application in the Transport Sector

Presentación: 06/09/2023

Alexis Maximiliano Caratozzolo

GTA – Grupo de Tecnología Aeroespacial. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Haedo, Buenos Aires, Argentina.
caratozzoloalexism@gmail.com

Tomás Martín Zirolto

GTA – Grupo de Tecnología Aeroespacial. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo, Buenos Aires, Argentina.
tomaszirolto@gmail.com

Sofía Anabel Reginato

GTA – Grupo de Tecnología Aeroespacial. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo, Buenos Aires, Argentina.
sofiareginato@gmail.com

Nahuel Castello

GTA – Grupo de Tecnología Aeroespacial. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo, Buenos Aires, Argentina.
ncastello@frh.utn.edu.ar

Resumen

Las nuevas tecnologías de Manufactura Aditiva (AM, *Additive Manufacture*) permiten avances y mejoras continuas en el sector del transporte. En particular los métodos de Modelado por Deposición Fundida (FDM, *Fused deposition Modeling*) permiten la generación de prototipos y piezas complejas con gran facilidad, capacidad que es de gran interés en el sector aeroespacial. No obstante, presentan una problemática: la dificultad de caracterización de las propiedades mecánicas finales del proceso FDM y del material como un conjunto. Las notables diferencias resultantes de la variación de uno o más parámetros de fabricación hacen que sea necesario un análisis integrado del método.

Se propone en este trabajo una primera normalización aplicable a los procedimientos de manufactura y caracterización del conjunto “material + Proceso FDM”. Se tendrán en cuenta las características del material, el equipo utilizado, las parametrizaciones y los procedimientos de ensayo, tomando como referencia normas ASTM e ISO. Como resultado se logran unificar conceptos y formatos de identificación de parámetros y aplicación que serán de gran utilidad a la hora de realizar la caracterización.

Palabras clave: Manufactura FDM, Caracterización, Procedimientos de ensayo, Normativa, Análisis integral

Abstract

The new advancements in *Additive Manufacturing* (AM) technologies allow for continuous improvements in the transportation sector. In particular, *Fused deposition Modeling* (FDM) methods allow for easy generation of prototypes and complex parts, which is highly valuable in the aerospace industry. However, they present a challenge: the difficulty in characterizing the final mechanical properties of the FDM process and the material as a whole. The notable differences resulting from variations in one or more manufacturing parameters make an integrated analysis of the method necessary.

This work proposes an initial standardization applicable to manufacturing and characterization procedures of the 'material + FDM process' combination. It takes into account the material characteristics, equipment used, parameter settings, and testing procedures, with reference to ASTM and ISO standards. As a result, concepts and formats for parameter identification and application are unified, which will be highly beneficial for the characterization process.

Keywords: FDM manufacture, Characterization, Testing procedures, Standards, Integrated analysis

Introducción

Se conoce como modelado por deposición fundida o FDM (*Fused Deposition Modeling*) al método de Manufactura Aditiva o AM (*Additive Manufacture*) basado en la deposición controlada de un filamento fundido a través de una boquilla fundente en capas sucesivas, por medio de un control numérico y una serie de instrucciones previamente programadas (ISO/ASTM International, 2016; Popescu et al., 2018).

Las propiedades de la pieza manufacturada difieren de las propiedades del material utilizado, siendo estas ortotrópicas, y asemejándose a una estructura laminada o “material compuesto laminado”. Es por esta razón que diversos autores han realizado estudios de caracterización con el fin de determinar la dependencia de la tensión límite y del módulo de elasticidad respecto del espesor de deposición y los ángulos de impresión (Knoop & Schoeppner, 2015; Ziroldo & Caratozzolo, 2023). Existen muchos otros estudios también referidos a materiales como PLA, ABS y PETG, los cuales a su vez analizan diferentes particularidades según los intereses de los autores. Una de las observaciones que podemos tener es la carencia de una estandarización clara en la constitución de las estructuras caracterizadas (Considerando “material + Proceso FDM”). El poder conocer de manera simple y rápida las características de las estructuras antes mencionadas permitiría evaluar de forma más certera la aplicabilidad de los resultados obtenidos en los trabajos de interés. Inicialmente se presentan normas de consideración general aplicable a trabajos de manufactura aditiva, y que han resultado de interés al momento de efectuar este trabajo:

- ASTM 52910 – Additive manufacturing – Design – Requirements, guidelines and recommendations
- ASTM WK732227 – New Guide for Additive Manufacturing – Investigation for Additive manufacturing (AM) Facility Safety Management

Otras normas de interés serán comentadas a medida que, bajo nuestra consideración, su aplicación resulta directa respecto del tema en desarrollo.

Algunos autores han presentado trabajos de gran interés referidos al estudio de las normativas actuales y los puntos que cada una considera (García-Domínguez et al., 2020). Otros han realizado avances en la comparación de estándares actuales en pos de determinar la idoneidad de las geometrías correspondientes a las probetas de ensayo, dado que las mismas difieren según la organización que las nuclea (Gil et al., 2018).

Desarrollo

La caracterización estará enfocada en el material de manufactura pero, como se ha mencionado, requiere un enfoque integrado de todo el proceso de fabricación. Para ello, dividimos el análisis en cuatro secciones:

- I. Material
- II. Manufactura
- III. Parametrización
- IV. Ensayo

I. Material

Se parte de un material cuya manufactura sea posible por medio de un método FDM. El material tendrá influencia directa en los requisitos mínimos del equipo de manufactura y en las parametrizaciones a utilizar.

Resulta recomendable caracterizar el material particular utilizado siguiendo el sistema de clasificación estandarizado de ASTM, propuesto en la norma ASTM D4000 – Standard Classification System for Specifying Plastic Materials, la cual referencia los documentos necesarios para clasificar cada material en particular (Por ejemplo: D4066 – Classification System for Nylon Injection and Extrusion Materials) y la normativa correspondiente a cada ensayo posible (Por ejemplo: D638 – Test Method for Tensile Properties of Plastics).

Por tanto, y a nuestra consideración, se podrán determinar (como mínimo) los siguientes puntos:

- I.a. Origen y características del material
- I.b. Secado y acondicionado general del filamento
- I.c. Temperatura de extrusión
- I.d. Tipo de extrusión
- I.e. Temperatura de superficie de deposición
- I.f. Atmósfera de impresión (temperatura, humedad y circulación de aire)

Determinado el material a utilizar y su origen (I.a), se debe verificar con el fabricante el origen de la materia prima utilizada por medio del número de *batch*. Opcionalmente se podrá certificar la composición de una muestra por espectroscopía u otros métodos. Se deberá identificar la presencia de aditivos y colorantes, los cuales pueden tener incidencia en las características mecánicas finales del material.

Respecto del secado (I.b), se deberá cumplir con los procedimientos mínimos requeridos por el material que permitan asegurar la correcta extracción de humedad del filamento. Por lo general estos procedimientos consisten en un secado en dispositivo térmico de atmósfera controlada (temperatura y humedad), con control de rampa y sistemas que permitan validar el procedimiento (ASTM D570 – Standard Test Method for Water Absorption of Plastics).

Los últimos cuatro ítems (I.c, I.d, I.e, I.f) definirán en gran parte las capacidades requeridas del equipo de manufactura. Se considera un requisito mínimo el operar con un equipo cerrado para evitar la contaminación y los defectos relacionados con las corrientes de aire.

La Tabla 1 sección “I. MATERIAL” (Página 7) resume los datos mínimos a consignar para la correcta identificación del material de trabajo.

II. Manufactura

Se parte de la suposición de que el equipo de manufactura influye en las características finales de la pieza. Resulta entonces necesario seleccionar el equipo en función de los requisitos mínimos del material con el cual se trabajará. Por supuesto el camino también podrá ser a la inversa, seleccionando el material de trabajo en función de las características del equipo disponible. Las características principales serán:

- II.a. Temperatura de extrusión
- II.b. Tipo de extrusión
- II.c. Temperatura de la superficie de deposición
- II.d. Atmósfera de impresión (temperatura, humedad y circulación de aire)
- II.e. Tipo de equipo

Respecto de los requisitos de temperatura (II.a, II.b, II.c) y atmósfera (II.d) variarán en función del material que se utilice, por lo cual es aconsejable seguir los valores recomendados por el proveedor de la materia prima según la norma ASTM 52903-1 – Additive manufacturing – Material extrusion based additive manufacturing of plastic materials – Part 1: Feedstock Materials.

Para el tipo de equipo (II.e) definimos inicialmente una clasificación que intenta subdividir de forma general los equipos actuales, dado que existe una diferencia notable entre aquellos de grado industrial de precisión y los de un nivel inicial. Esta clasificación se compone de los siguientes niveles:

1. *Entry*: Comprende equipos con tecnología FDM básica, de bajo costo y aplicaciones del tipo *hobbysta*.
2. *Semi-professional*: Versiones avanzadas de los equipos del tipo *Entry*, con mejoras en los sistemas de extrusión, cerramiento, control de movimiento, y otros. Costos relativamente económicos.
3. *Professional*: Equipos profesionales con amplia capacidad de trabajo, sin llegar a la producción.
4. *Industrial*: Equipos de primera línea con capacidad de producción en serie.

Consideraciones particulares recaerán sobre:

- Control atmosférico: Considera las características de la atmósfera de manufactura. Se deberá consignar el cerramiento, las características de control térmico y de humedad, y la circulación de aire.
- Boquilla de extrusión: Considera el tipo de boquilla (material) y diámetro.

Por último, la adhesión a la cama será un punto fundamental relacionado con la correcta manufactura, debiéndose registrar de forma reducida y textual los métodos o procedimientos empleados.

La Tabla 1 sección “II. MANUFACTURA” (Página 7) resume los datos mínimos a consignar para la correcta identificación del equipo de manufactura.

III. Parametrización

La parametrización determina el cómo será manufacturada la pieza en el equipo, es decir, la configuración y el control de proceso. Por tanto, afectará de forma directa en las características finales de la pieza, y no existe un número determinado de parámetros a configurar. Su determinación podrá depender del equipo de manufactura (Las aceleraciones de los ejes, límites de operación, retracciones, etc.), del material (rangos de temperatura de extrusión, de superficie de deposición, etc.), de los requisitos de la pieza final (cantidad de relleno, perímetros), entre otras cuestiones.

Comenzamos con el estudio del software *Slicer*, el cual genera las instrucciones de manufactura a partir de un archivo tipo CAD y de la parametrización asignada por el usuario. Existen diferentes tipos de softwares:

- Genérico o globales: están pensados por lo general para operar con prácticamente cualquier equipo de manufactura (por ejemplo: *Cura*, *PrusaSlicer*, *Octoprint*, y otros).
- Dedicados: son desarrollos de software específicos para un equipo o marca en particular, sin embargo aplicables de forma general. Su uso puede o no ser obligatorio (GrabCAD).

La selección del software dependerá de la experiencia previa del usuario y del equipo de manufactura. Si bien los parámetros generales son igualmente configurables en todos los softwares, los parámetros específicos pueden diferir en cuanto a presentación o configuración. Por tanto, y para un análisis fino de la parametrización, resultará necesario identificar correctamente el software en uso para luego evaluar las parametrizaciones utilizadas. Al momento de comparar con otro software podrá ser necesaria una equivalencia en algunas de las parametrizaciones.

La configuración de estos parámetros, como en todo proceso de manufactura, depende en gran medida de la experiencia del operario, de la puesta a punto del equipo, y del *knowhow* general del proceso y del material entre otras cosas. Los fabricantes de los softwares *Slicers* ofrecen lo que se conoce como “perfiles de impresión” para un determinado material, calidad de impresión y equipo. Por supuesto, en caso de un software dedicado, el perfil ofrecido se encontrará optimizado al detalle mientras que para un software global el perfil será genérico. A fin de estandarizar lo más posible los procedimientos de caracterización, se propone utilizar un perfil de impresión predefinido en el software a partir del cual realizar modificaciones, las cuales serán debidamente indicadas.

A continuación se detallan consideraciones sobre los principales parámetros:

1. Espesor de deposición: Depende del diámetro de boquilla seleccionado. Se sugiere utilizar valores entre 0.05 mm a 0.45 mm, en intervalos de 0.05 mm.
2. Ancho de deposición: Depende del diámetro de boquilla seleccionado. Se sugieren intervalos de 0.05 mm o intervalos del 5% (respecto del diámetro de la boquilla).
3. Temperatura de extrusión: Según el rango del material.
4. Temperatura de superficie de deposición: Según el rango del material.
5. Soportes de impresión: en caso de ser requeridos, deberá consignarse información detallada respecto del tipo de soporte empleado. Estudios como el realizado por F. Knoop & V. Schoeppner (Knoop & Schoeppner, 2015) demuestran una fuerte incidencia de los soportes en las características mecánicas finales. No entraremos en el detalle de los mismos en esta ocasión, pero estudios posteriores serán dedicados a desarrollar procedimientos de estandarización de los soportes. La Figura 1 presenta un ejemplo del caso.

La dirección de deposición será de gran importancia a la hora de analizar las direcciones de carga y sollicitación. Las manufacturas FDM se comportan como estructuras ortotrópicas (con tres ejes principales con sus respectivas características mecánicas), puesto que se realiza la deposición de filamento y no es una estructura continua. Para la correcta identificación de los ejes principales, se propone una normalización para con el ángulo relativo de impresión θ , el cual quedará en función de la dirección del eje principal de la pieza, tal como se presenta en la Figura 2. Una configuración del tipo “Solo paredes” da lugar a un cuerpo sin relleno, permitiendo evaluar exclusivamente las propiedades direccionales y representando la configuración sugerida para caracterizaciones iniciales más simples.

La Tabla 1 sección “III. PARAMETRIZACIÓN” (Página 7) resume los datos mínimos a consignar para la correcta identificación de la parametrización general empleada en la manufactura.

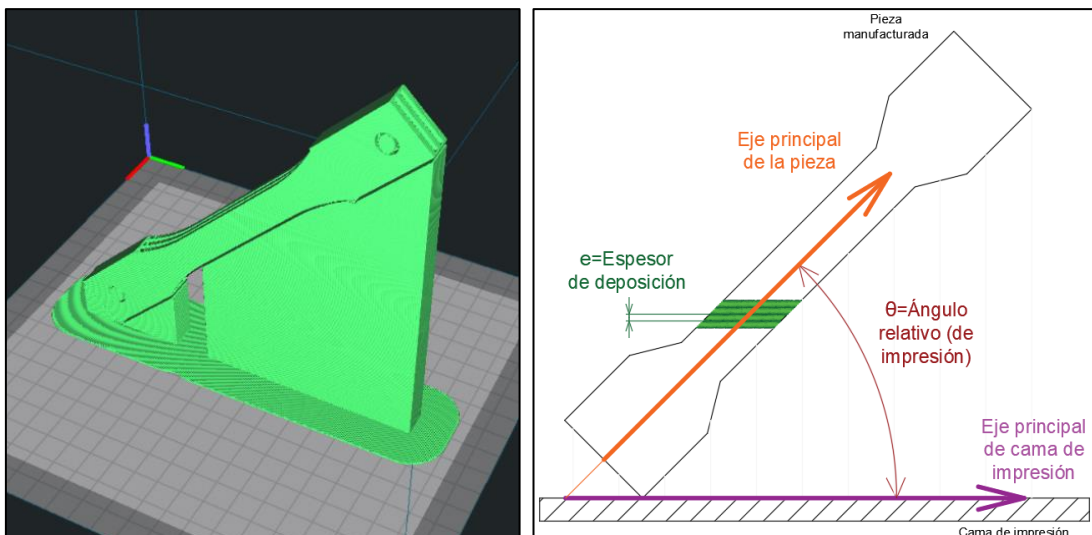


Figura 1: Ejemplo de soporte de impresión utilizado (Izq.). Fuente: Elaboración propia.

Figura 2: Representación del ángulo relativo de impresión (Der.). Fuente: Elaboración propia.

IV. Ensayo

Para la normalización de los ensayos se tomará como referencia la norma ASTM D638 (siendo posible también consultar y utilizar normas similares como la ISO 527). Tanto para la evaluación del módulo de elasticidad como para la elongación a la rotura establece la misma velocidad de ensayo: 5 mm/min. Esto es una gran ventaja puesto que permite obtener ambas características por medio de un único ensayo (Normas ISO definen velocidades diferentes y por tanto se requieren ensayos diferenciados).

Para el acondicionamiento de las probetas se tomará como referencia la norma ASTM D618 (nuevamente, será posible referenciarse a equivalentes pertenecientes al sistema ISO o similar). Se selecciona como principal procedimiento al acondicionamiento A, el cual determina que, para espesores de probeta menores a 7mm, se realice un acondicionamiento 40/23/50 (40 horas, 23°C, 50% de humedad relativa) (ASTM International, 2000).

La Tabla 1 sección “IV. ENSAYO” (Página 7) resume los datos mínimos a consignar para la correcta identificación de la metodología de ensayo aplicada.

Compilación final de datos

Los datos mínimos considerados quedarán compilados en una única tabla (Tabla 1) que permitirá de manera simple y práctica conocer el alcance de las caracterizaciones efectuadas. Esta tabla se confeccionó a partir de lo desarrollado y considerando las recomendaciones de las normas aplicables, principalmente la ASTM 52917 – Additive Manufacturing – Round Robin Testing – General Guidelines.

I. MATERIAL					
Filamento de trabajo					
Fabricante (Origen)		N° Batch		Aditivos, colorantes, otros	Certifica composición
Secado previo a la manufactura				Comentarios adicionales	
II. MANUFACTURA					
Equipo de trabajo (marca y modelo)					
Fabricante (Origen)		Nivel		Control atmosférico	Boquilla de extrusión
Adhesión a la cama				Comentarios adicionales	
III. PARAMETRIZACIÓN					
Software Slicer					
Perfil de impresión					
Deposición				Temperatura	
Espesor	Ancho	Relleno	Ángulo relativo	Extrusión	Cama
Soportes de impresión				Comentarios adicionales	
IV. ENSAYO					
Norma de ensayo (Marco)					
Tipo de probeta (Marco)					
Norma de Acondicionado (Marco)					
Propiedades a ensayar					
Comentarios adicionales probeta				Planos Probeta	Atmosfera de ensayo
Acondicionado (Detalle)				Comentarios adicionales	

Tabla 1: Datos mínimos a consignar para la caracterización del conjunto “Material + Proceso FDM”

Conclusiones

La industria del transporte requiere de materiales, métodos y procedimientos debidamente caracterizados y regulados para cumplir funciones principales o críticas. La manufactura FDM representa un amplio abanico de posibilidades a la hora de considerar la producción e implementación de piezas o prototipos de manera rápida y simple, reduciendo en especial elementos como matrices o moldes. Por ejemplo, la fabricación de una pieza de reemplazo en estaciones de manufactura locales podría ahorrar dinero y tiempo si se compara con los sistemas de repuesto tradicionales. Asimismo, la construcción de elementos únicos o de tiradas reducidas se podría ver ampliamente beneficiada.

Para el estudio y la aplicación de este tipo de manufactura resulta entonces preciso contar con una caracterización que corresponda con el objetivo. Considerando el estado del arte actual, este trabajo presenta una primera aproximación a una normalización en el tratamiento de la información y el análisis. Las ventajas recaen en la posibilidad de facilitar investigaciones respecto de un parámetro o variable particular, y considerar la aplicación del conjunto “material + Proceso FDM” en base a los resultados obtenidos y/o consultados, entre otras cosas.

Con esto en mente, se realizó un estudio aplicado a la caracterización de estos conjuntos, con foco en la aplicación práctica. Resultó una tabla de datos resumida compuesta por secciones referentes al material, el tipo de manufactura, la parametrización y el ensayo, cuyo objetivo es el de identificar al conjunto caracterizado de manera simple y directa, lo cual permitirá mejorar el análisis de los resultados y su aplicabilidad.

Por supuesto, nuevas investigaciones podrán dar pie a considerar elementos o particularidades adicionales que no hayan sido incluidas en este primer análisis. Futuras revisiones del estado del arte y de los resultados propios de nuevas caracterizaciones permitirán mejorar la cantidad y calidad de la información que identifique a estos ensayos. Adicionalmente será de interés la interrelación de las normas actuales con los procedimientos prácticos, que seguramente darán lugar a la adecuación y/o generación de nuevas normas que regulen de manera particular a la caracterización de la manufactura FDM.

Referencias

- ASTM International. (2008). *ASTM D570 Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*.
- ASTM International. (2000). *ASTM D618 Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing 1*.
- ASTM International. (2014). *ASTM D638-14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*.
- ASTM International. (2004). *ASTM D4000-04 Standard Classification System for Specifying Plastic Materials*.
- ASTM International. (2013). *ASTM D4066-13 Classification System for Nylon Injection and Extrusion Materials*.
- ASTM International. (2020). *ASTM 52903-1 Additive manufacturing – Material extrusion based additive manufacturing of plastic materials – Part 1: Feedstock Materials*.
- ASTM International. (2020). *ASTM 52917 – Additive Manufacturing – Round Robin Testing – General Guidelines*
- García-Domínguez, A., Claver, J., Camacho, A. M., & Sebastián, M. A. (2020). Analysis of General and Specific Standardization Developments in Additive Manufacturing from a Materials and Technological Approach. *IEEE Access*, 8, 125056–125075.
- Gil, J. C., Camacho, A. M., & Sebastián, M. A. (2018). *Análisis normativo y evaluación geométrica de probetas para la caracterización mecánica de piezas obtenidas por fabricación aditiva mediante FDM Industrial heritage and history of manufacturing technologies View project Additive Manufacturing: Technologies and Optimization View project*.

- ISO/ASTM International. (2016). *ISO/ASTM 52900:2015(E) Additive Manufacturing - General Principles - Terminology*.
- Knoop, F., & Schoeppner, V. (2015). *Mechanical and thermal properties of FDM parts manufactured with Polyamide 12*.
- Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baci, F., & Marinescu, R. (2018). FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing*, 69, 157–166.
- Zioldo, T. M., & Caratozzolo, A. M. (2023). Caracterización de propiedades mecánicas del Nylon 12 por FDM para aplicaciones aeroespaciales. In *12vo Congreso Argentino de Tecnología Aeroespacial*.