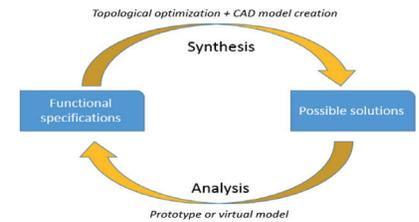


Elección entre el modelo virtual y el prototipo en el proceso de diseño para fabricación aditiva



Choice between virtual model and prototype in additive manufacturing design process



Thanh Hoang Vo, Guy Prudhomme, Philippe Marin y Frédéric Vignat

G-SCOP. Université Grenoble Alpes. 46, Avenue Félix Viallet - 38000 Grenoble (Francia)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8899> | Recibido: 04/07/2018 • Inicio Evaluación: 05/07/2018 • Aceptado: 28/01/2019

ABSTRACT

- Additive manufacturing (AM) enables the fabrication of complex shapes, which are sometimes impossible to get from conventional processes. In traditional design processes the performance of a part (such as mechanical strength) is evaluated by a numerical model (Finite Element computing) that is cheaper and quicker to obtain than a physical one. Today, when designing an AM dedicated object, it becomes easier to manufacture a physical part with exactly the same AM metallic process that will be used for the final serial part. Therefore, two options can be used to evaluate the performance of the part, a numerical model and a physical model. Then how to decide between the two options still causes confusion. The purpose of this research is to propose a method to help designers to make the best choice between numerical model and physical model for evaluating a part in a design process. To highlight the comparison between these options, our research methodology is based on the Design Research Methodology (DRM) model and several cases studies. The paper presents two case studies that lead to the proposal of a methodology and a list of criteria to help designers in comparing Virtual Model and Prototype in a given situation, and finally in deciding which option fits the best their needs in this context.
- **Keywords:** virtual model, prototype, additive manufacturing, design process.

RESUMEN

La fabricación aditiva (AM) permite la producción de geometrías complejas, que a veces son imposibles de obtener mediante los procesos convencionales. En los procesos de diseño tradicionales, el rendimiento obtenido en una pieza (como la resistencia mecánica) se evalúa mediante un modelo numérico (cálculo por Elementos Finitos) el cual es más barato y rápido de obtener que un modelo físico. Hoy en día, al diseñar un objeto dedicado a la AM, resulta más fácil fabricar una pieza física utilizando exactamente el mismo proceso metálico de AM que será utilizado para la pieza final de serie. Por lo tanto, se dispone de dos opciones para evaluar el rendimiento de la pieza en cuestión, elaborar un modelo numérico y/o un modelo físico. Posteriormente, se plantea cómo decidir entre estas dos opciones, labor que sigue causando confusión. El propósito del trabajo presentado aquí es proponer un método que ayude a los diseñadores a realizar la mejor elección entre los modelos numérico y físico a la hora de evaluar la validez de una pieza durante la fase de diseño. Para promover la compa-

ración entre estas opciones, el método presentado se basa en el modelo de la Metodología de Investigación de Diseño (DRM) y se utilizan varios ejemplos de estudio. El trabajo presenta dos casos que permiten proponer una metodología y una lista de criterios que ayudan a los diseñadores a comparar el Modelo Virtual y el Prototipo en una situación dada, y finalmente a decidir qué opción se ajusta mejor a sus necesidades en este contexto.

Palabras clave: modelo virtual, prototipo, fabricación aditiva, proceso de diseño.

1. INTRODUCCIÓN

La Fabricación Aditiva (AM) es un nuevo método que permite la producción de piezas. A través de la AM es posible fabricar piezas de plástico o metálicas mediante la progresiva adición del correspondiente material, a menudo, capa por capa. Además, esta tecnología no está limitada a la obtención de piezas para realizar pruebas en un contexto industrial, sino que permite producirlas en serie.

Desde el punto de vista del diseño, esta tecnología de fabricación le da libertad al diseñador ya que permite la adición de material donde se necesite (véase Fig. 1). Sin embargo, también crea dificultades, porque el diseñador tiene que decidir dónde colocar material [1]. Tradicionalmente, el proceso de diseño consta de una serie de actividades de síntesis (propuesta) y análisis (evaluación) que se repiten para afinar la propuesta efectuada. Muchos modelos de diseño [2, 3] ayudan a los diseñadores en estas dos actividades. Si nos centramos en la actividad de análisis, es decir, en la evaluación de una determinada propuesta de pieza frente las especificaciones o el rendimiento esperado de dicha pieza, ¿origina la aparición de la AM como método de producción un cambio en la manera de efectuar esta etapa de análisis?



Fig. 1: Ejemplo de piezas fabricadas mediante la fabricación aditiva: (a) máscaras de Chanel por Erpro; (b) Cojinete de rueda en el Fraunhofer IME

Antes de los años 80, los diseñadores contaron con herramientas de representación de piezas que se basaban en la representación del diseño industrial y estos análisis se realizaban mediante pruebas en modelos físicos.

En la década de los años 80 y 90, el desarrollo de la ciencia informática permitió la llegada de la herramienta llamada *Computer-Assisted Representation* (CAD) y la simulación (por ejemplo, con Elementos Finitos). Se consideró que las herramientas de simulación podrían llevar a cabo análisis más rápidos y menos costosos porque se basan en representaciones sin materiales de por medio. Sin embargo, por un lado, la calidad de los resultados de simulación depende de la representatividad del modelo numérico y, por otro, la simulación no permite efectuar evaluaciones relacionadas con aspectos emocionales y cualitativos del proceso de fabricación (observación, experimentación). De este modo, la única posibilidad de evaluación cuantitativa se convierte en un problema importante en un momento en el que el diseño integrado se está desarrollando, teniendo en cuenta lo antes posible la opinión/evaluación de todos los actores involucrados en el ciclo de vida del producto fabricado.

En la década 2000-2009, tuvo lugar el desarrollo de las técnicas de prototipado rápido. De este modo, era posible suministrar piezas en tiempos más cortos y a menores costos que las tecnologías de fabricación tradicional. Las piezas obtenidas eran similares a las piezas finales. Puede haber diferencias en cuanto al material, dimensiones de escala, pero permiten efectuar pruebas cuantitativas y cualitativas. Esta tecnología es compatible con la denominada "*Design Thinking*", la cual está en auge y demanda mayor intervención de los modelos físicos (material) en las primeras fases del diseño. También está en línea con el diseño integrado, proporcionando una representación adaptada para que los usuarios no iniciados con las representaciones virtuales puedan llevar a cabo sus propuestas.

Hoy en día, la fabricación aditiva (AM) permite producir piezas funcionales directamente desde el modelo CAD [4] utilizando diferentes materiales como los metales [5], polímeros [6] y de los cerámicos [7]. En este trabajo, nos centraremos en las tecnologías de AM para materiales metálicos (*Electron Beam Melting EBM* y *Selective Laser Melting SLM*), teniendo en cuenta que la mayoría de los argumentos y propuestas expuestos probablemente se podrían aplicar también en el caso de las piezas fabricadas con polímeros. Una pieza física, por tanto, se puede fabricar rápidamente por la misma tecnología de producción empleada para las piezas de serie, con el fin de llevar a cabo la actividad de síntesis (propuesta). De esta forma, la pieza tendrá las mismas características en cada paso del proceso de fabricación y será posible realizar ensayos cualitativos y cuantitativos.

De este modo, se dispone de dos opciones a la hora de validar el diseño de una pieza: un modelo de simulación digital o una pieza física fabricada por AM, cada una de las cuales tiene sus ventajas y desventajas. Por lo tanto, las preguntas que se plantean son:

«¿Son las simulaciones digitales adecuadas para analizar una pieza fabricada por AM? ¿Son los ensayos realizados sobre pieza física una alternativa a la simulación numérica? Y entonces, ¿qué criterios se deben tener en cuenta a la hora de elegir entre un modelo virtual y uno físico para analizar el comportamiento de la pieza durante el proceso de diseño en el campo de la fabricación aditiva de materiales metálicos?».

Decidir entre las dos opciones planteadas anteriormente genera todavía confusión. Este artículo va a abordar este problema mediante la búsqueda de respuestas a estas preguntas.

Nuestra propuesta está construida como sigue. En la sección 2, se describe la metodología de investigación. En la sección 3, un estudio bibliográfico nos lleva a proponer nuestra definición del «modelo virtual» y el «prototipo» en el contexto del diseño para la AM de materiales metálicos. A continuación, se realiza un estudio de los criterios de comparación existentes con el fin de ayudar a los diseñadores a comparar la utilización de un modelo virtual o un prototipo. Se han realizado varios estudios de rediseño en piezas ya existentes para llevar a cabo su producción mediante la fabricación aditiva, para conocer las contribuciones del modelo virtual y los prototipos en la fase de análisis. En este estudio, nos centraremos en un caso de estudio que se desarrollará en la sección 4. Los análisis bibliográficos y el caso de estudio realizados en este trabajo permiten proponer una nueva herramienta metodológica (sección 5) basada en la comparación de criterios, la cual facilita la labor de los diseñadores para elegir la opción más adecuada. En la sección 6, se propone un segundo caso de estudio para evaluar la viabilidad y la eficacia de la nueva herramienta metodológica propuesta.

2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Nuestra metodología de investigación se relaciona con la denominada "Design Research Methodology" (DRM) [8] propuesta por Blessing et al. con cuatro etapas principales, Fig. 2.

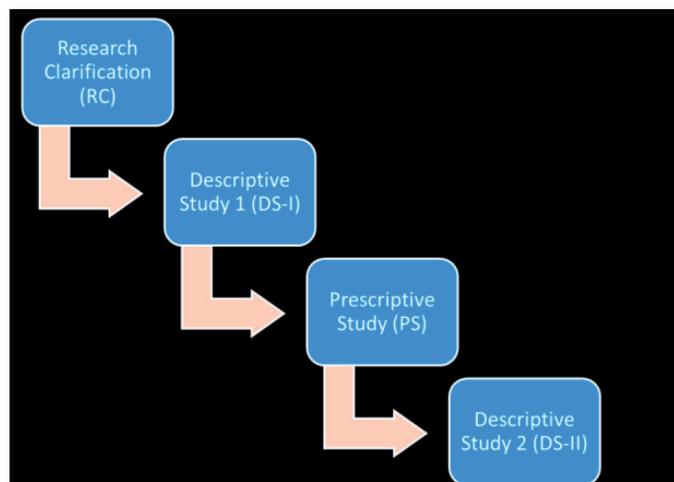


Fig. 2: La metodología de la investigación

La finalidad de la etapa «Research Clarification» (RC) es identificar los objetivos de la investigación, su enfoque, el problema principal y la pregunta de la investigación. En esta etapa, se lleva a cabo un estudio bibliográfico de las posibles representaciones del producto, que ayuda a proponer una definición del modelo virtual y el prototipo. Se realiza también un estudio bibliográfico de los criterios de comparación entre el prototipo y modelo virtual. Estos estudios ayudan a plantear la problemática del caso a estudiar y aclaran la pregunta de la investigación.

La etapa «Descriptive Study 1» (DS-1) permite que el diseñador comprenda mejor los criterios de comparación entre el modelo virtual y el prototipo. Uno de los casos de estudio proviene de un proyecto con la industria aeroespacial. Ha sido necesario rediseñar una pieza ya existente en los aviones para afrontar su producción con la fabricación aditiva (EBM).

Durante la etapa de «Prescriptive Study» (PS), se propone una herramienta de comparación por pares - incluidos los criterios de comparación - para ayudar a los diseñadores a elegir entre el mo-

delo virtual y el prototipo. La etapa final constituye un segundo estudio «Descriptive Study 2» (DS-2) en el que se analiza otro caso de estudio para evaluar la eficacia de la herramienta de comparación por pares.

3. ESTUDIOS BIBLIOGRÁFICOS – CLARIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. PROCESO DE DISEÑO PARA LA FABRICACIÓN ADITIVA

Este estudio se centra en la AM de materiales metálicos (EBM, SLM, etc.) la cual permite fabricar una pieza funcional en serie. La AM ofrece las ventajas de la libertad de diseño, una amplia elección de materiales (incluso la posibilidad de utilizar materiales múltiples), reducidas pérdidas de material y tiempos de entrega cortos.

Existen diferentes metodologías de diseño para la AM, tales como las reportadas por Tomlin en 2011 [9], Remi Ponche en 2013 [10] y Benjamin Vayre en 2014 [11], todas ellas con el mismo objetivo principal de crear una pieza óptima para la fabricación aditiva. Estas metodologías de diseño para la AM comprenden tres etapas principales: optimización topológica, la creación de modelos CAD y la evaluación de las piezas.

Aunque no siempre se usa, la optimización topológica podría considerarse como etapa clave [12] para encontrar la mejor distribución del material dentro de un dominio de diseño espacial definido y bajo restricciones especificadas. El formato del resultado de la optimización topológica es una malla constituida por superficies triangulares incluidas en un modelo poligonal, haciéndola difícil para utilizar su resultado (véase Fig. 3). La etapa de creación del modelo CAD está destinada a transformar este modelo poligonal en un modelo sólido, es decir, el modelo CAD [13]. La última etapa permite el análisis y la evaluación de los rendimientos de la solución obtenida para la pieza en comparación con sus especificaciones establecidas.

Según el modelo de diseño axiomático [2], un proceso de diseño incluye dos fases: síntesis y análisis. Aplicadas al diseño para la

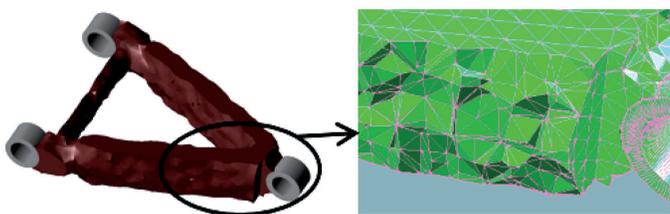


Fig. 3: Modelo poligonal definido por la optimización topológica

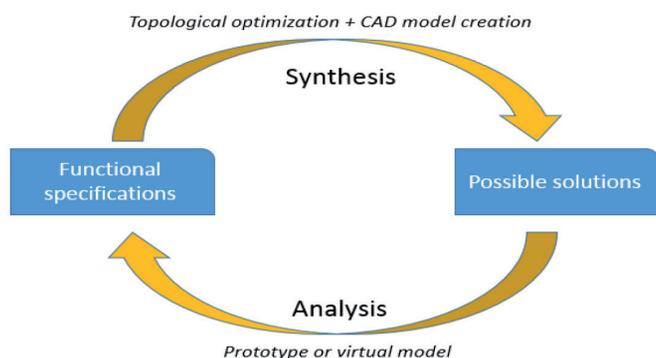


Fig. 4: Proceso de diseño para la fabricación aditiva según el modelo de diseño axiomático

fabricación aditiva, las dos primeras etapas (topología de optimización y creación de modelos CAD) son parte de la fase de síntesis y la última etapa es parte de la fase de análisis (ver Fig. 4).

Este trabajo se centra en la fase de análisis de este proceso de diseño para la fabricación aditiva, tal y como se define en el modelo de diseño axiomático, y la elección entre el modelo virtual y el prototipo para efectuar el análisis.

3.2. PROTOTIPO Y MODELO VIRTUAL

Los conceptos "modelo virtual" (VM), "modelo físico" (PM) y "prototipo" (P) se han definido de diversas maneras en los estudios ya existentes, cada uno de ellos correspondiente a su contexto de estudio [14, 15, 16, 17]. Con el fin de aclarar la terminología, a continuación, se presentan las definiciones que contienen aquellas singularidades asociadas al contexto de la fabricación aditiva:

- **Prototipo:** se trata de la primera pieza física que presenta las mismas propiedades establecidas para el producto y el proceso de fabricación de las piezas de serie. Un prototipo hace posible hacer uno o más ensayos y validar todas las características funcionales de la pieza.
- **Modelo virtual:** es un modelo digital, es decir, una representación geométrica basada en una definición numérica que permite realizar simulaciones para ensayar o evaluar uno o varios comportamientos de la pieza. Ejemplos de modelos virtuales son: una geometría 3D (véase Fig. 5A) o un cálculo por elementos finitos (véase Fig. 5B).
- **Modelo físico:** es una representación material de la pieza utilizada para ensayar uno (o más) comportamientos. El modelo físico se puede realizar utilizando una escala dada, reducida o ampliada para facilitar la visualización. El modelo físico se utiliza para realizar ensayos. El propósito del modelo físico no es convertirse en una primera pieza de la serie, ni ser representativo de todos los aspectos de la pieza final, sino para ensayar un determinado comportamiento específico, según uno o más aspectos seleccionados del producto final. De este modo, el modelo físico se puede fabricar con un material diferente y siguiendo una tecnología diferente, generalmente más rápida y barata que las que se utilizarán para fabricar las piezas de serie.

El presente trabajo se refiere al contexto de la fabricación aditiva en materiales metálicos en el que se puede producir una única pieza con esta tecnología, la cual cuenta con las mismas propiedades que las piezas de serie. Por lo tanto, en este contexto **consideramos dos opciones posibles para hacer una evaluación precisa: el modelo virtual y el prototipo.**

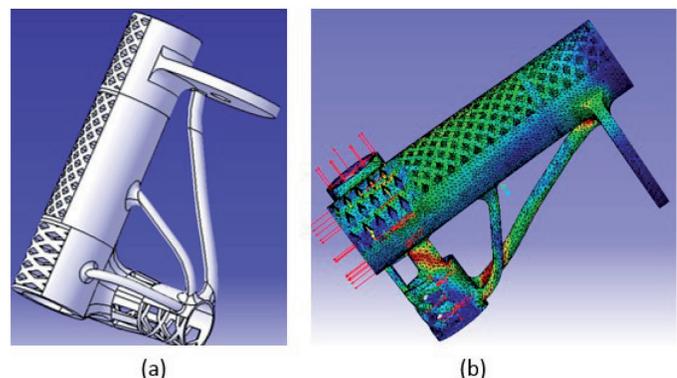


Fig. 5: Ejemplo de modelo virtual (a) modelo CAD 3D; b) El resultado del cálculo por elementos finitos

3.3. CRITERIOS DE COMPARACIÓN ENTRE VM Y P

Esta parte del estudio bibliográfico está orientado a la caracterización del modelo virtual (VM) y el prototipo (P) con el propósito de identificar aquellos criterios de comparación que ayuden a los diseñadores a elegir entre estas dos opciones en la fase de análisis durante el proceso de diseño.

Varios estudios [14, 15, 16, 17, 18] proponen integrar el VM y P en las etapas más tempranas del proceso de desarrollo, minimizando así el tiempo y el coste del proceso. Las características asociadas a la utilización del VM o P están relacionadas con las capacidades que éstos poseen en materia de comunicación, desarrollo del concepto, verificación del concepto y realización de pruebas. En estos estudios, estas características se presentan en forma de ventajas e inconvenientes del VM y P.

Según estos autores, el modelo virtual tipo CAD hace posible visualizar la geometría de la pieza con diferentes colores [16, 18]. El modelo virtual es fácil de difundir a través de Internet y está disponible siempre que sea necesario [14, 15, 16, 17]. Además, el modelo virtual es fácil de modificar en un tiempo relativamente corto [14, 15, 16]. El VM permite detectar diversos defectos relacionados con los criterios de ciclo de vida, tales como: el montaje, las operaciones de funcionamiento (cinemática + dinámica), fabricación, etc. antes de que el prototipo sea fabricado. Sin embargo, con el VM, la retroalimentación sensorial de los usuarios está limitada [18].

Según Vandeveldel et al [17], el prototipo desempeña un papel importante en el proceso de desarrollo de un producto. En particular, se mejora la comunicación entre los miembros del equipo. Por ejemplo, es más fácil explicar las funciones de la pieza en un objeto real, aunque la realización de un modelo físico siempre plantea problemas de tiempo y coste. Según Vandeveldel et al, sin embargo, para un prototipo realizado por fabricación rápida, el tiempo y el coste de implementación se reducen porque se fabrica sin la necesidad de una herramienta específica, pero lo cierto es que la modificación del prototipo es difícil y caro generalmente, comparado con el perteneciente a un modelo virtual.

En base a los trabajos existentes, las ventajas y desventajas identificadas para el VM y P están relacionadas con el tiempo, coste, apoyo para llevar a cabo el trabajo en equipo, modificabilidad y capacidad para analizar los comportamientos en pieza.

Según estas ventajas y desventajas del VM y P, se pueden proponer criterios de comparación entre el VM y P, sabiendo que la realización del prototipo se hará mediante la fabricación aditiva. En este sentido, se define la siguiente lista de criterios de comparación:

La capacidad de realizar la tarea es la capacidad de los modelos virtuales y prototipos para ayudar a los diseñadores a analizar el comportamiento de la pieza en cuestión, como es la geometría, el ensamblaje o la resistencia de la pieza. Este comportamiento se relaciona con la situación en la que se encuentra el proceso de diseño. Este es el primer criterio que los diseñadores tienen que considerar hacer una elección entre el VM y P.

El apoyo a la colaboración es la capacidad para promover el trabajo colaborativo, es decir, la comunicación, la discusión entre los miembros de un equipo o compartir el conocimiento para ayudar a los actores a comprender los conceptos.

La modificabilidad es el criterio relacionado con la capacidad de modificar el VM o P, en el caso de que sea rápido y fácil de modificar cuando alguien quiere comprobar el impacto de esta modificación en el comportamiento analizado.

El tiempo para completar la tarea incluye el tiempo de finalización (realización del modelo virtual o prototipo) y el tiempo de

análisis (el tiempo necesario para analizar la pieza con la solución elegida). Por ejemplo, el tiempo para completar la tarea con el VM incluye el tiempo para realizar un VM y el tiempo necesario para analizar la pieza con el VM. A veces, el tiempo para obtener el modelo virtual puede ser más corto que el necesario para obtener el P, pero el tiempo total requerido para llevar a cabo el análisis deseado con el VM puede ser mayor que el necesario para efectuar el análisis con el P. Este criterio se usará para calcular la relación entre el tiempo de finalización de la tarea y el tiempo total o el tiempo restante del ciclo de desarrollo.

El coste de la tarea. De la misma manera que en el caso del criterio del tiempo, se ha definido el criterio «costes de la tarea» como la suma de los costes de realización y análisis para el prototipo o el modelo virtual.

En conclusión, el estudio bibliográfico realizado permite seleccionar la utilización del VM y P en el contexto de la AM. También, se ha considerado una lista de cinco criterios de comparación para ayudar a los diseñadores a elegir entre el VM y P.

Por tanto, la pregunta de investigación es: *¿Son estos cinco criterios adecuados y suficientes para elegir entre el modelo virtual y el prototipo para analizar el comportamiento de una pieza durante un proceso de diseño en el contexto de la fabricación de aditiva de materiales metálicos?*

Para empezar a responder a esta pregunta, se presenta el primer caso de estudio que se describe en la siguiente sección.

4. ESTUDIO DE CASO 1 - ESTUDIO DESCRIPTIVO 1

Este caso de estudio se basa en una pieza fabricada inicialmente con acero, con 125g de masa (Fig. 6A), y tiene como objetivo rediseñarla para fabricarla con una aleación de titanio mediante la técnica EBM, con una reducción del 40% en su masa. Las características de esta pieza no se tratan en este artículo por razones de confidencialidad. La aplicación de este proceso de rediseño ha originado la propuesta de la geometría de la pieza mostrada en la Fig. 6B. A continuación, es necesario elegir entre el VM y P para analizar el comportamiento de resistencia de la pieza propuesta.

Analizar la resistencia de la pieza con el VM o P

En este proceso de diseño, se obtuvo una pieza propuesta después de la fase de síntesis. El diseñador debe elegir entre el VM y P para analizar la resistencia de esta pieza. En este caso, el VM es un cálculo por elementos finitos y el P es un ensayo físico de resistencia utilizando un prototipo.

El diseñador lleva a cabo un comparación entre el VM y P para cada criterio. En esta sección, se dan los detalles de la comparación únicamente para dos criterios.

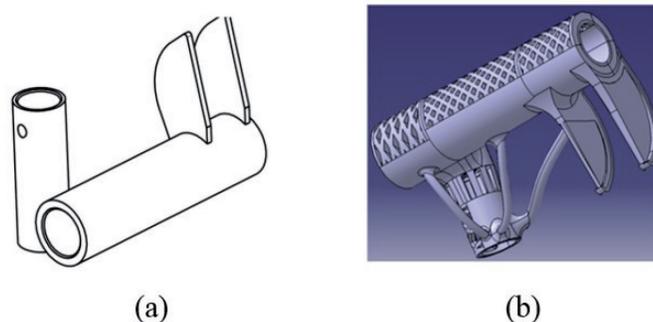


Fig. 6: (A) Pieza fabricada originalmente en acero (b) pieza fabricada con la aleación de titanio

El tiempo para completar la tarea:

- Análisis con el VM: el tiempo para diseñar el modelo CAD (2 días) + el tiempo para crear un modelo de cálculo (12 horas) + el tiempo para hacer el cálculo en una computadora (1 hora).
- Análisis con el P: el tiempo necesario para diseñar el modelo CAD (2 días) + el tiempo de fabricación del P (1 día) si la máquina está disponible + el tiempo para hacer el ensayo (1 día).
 - En estas condiciones, el modelo virtual es más adecuado que el P según este criterio.

El coste de la tarea:

- Análisis con el VM: es el coste del trabajo efectuado por el diseñador + el coste de los softwares CAD y FEM.
- Análisis con el P: es coste del trabajo efectuado por el diseñador + el coste del software CAD + el coste de fabricación del P + el coste para hacer el ensayo.
 - En estas condiciones, parece que el VM es más adecuado que el P según este criterio.

En la *Tabla 1* se muestra la adaptación del VM y el P a todos los criterios de comparación. El diseñador debe completar esta tabla según su experiencia y teniendo en cuenta la situación de diseño. El valor asociado a cada uno de los criterios de comparación se define en dos niveles: positivo (+) como valor más adaptado y negativo (-) como valor menos adaptado. Por ejemplo, en *Tabla 1*, el VM se adapta a más a criterios de tiempo que el P.

En esta situación, según los resultados de la *Tabla 1*, el diseñador elegiría el **VM** para analizar la capacidad de resistencia de la pieza propuesta. Este modelo CAD propuesto se ha validado a través de un cálculo por elementos finitos (véase *Fig. 7A*). Considerando que esta evaluación mediante el VM es positiva, se fabricó

Criterios	Modelo Virtual	Prototipo
Capacidad para realizar la tarea	+	+
Apoyo a la colaboración	+	-
Modificabilidad	+	-
Tiempo para completar la tarea	+	-
Coste de la tarea	+	-

Tabla 1. Comparación de la adaptación del VM y P para analizar la resistencia de la pieza

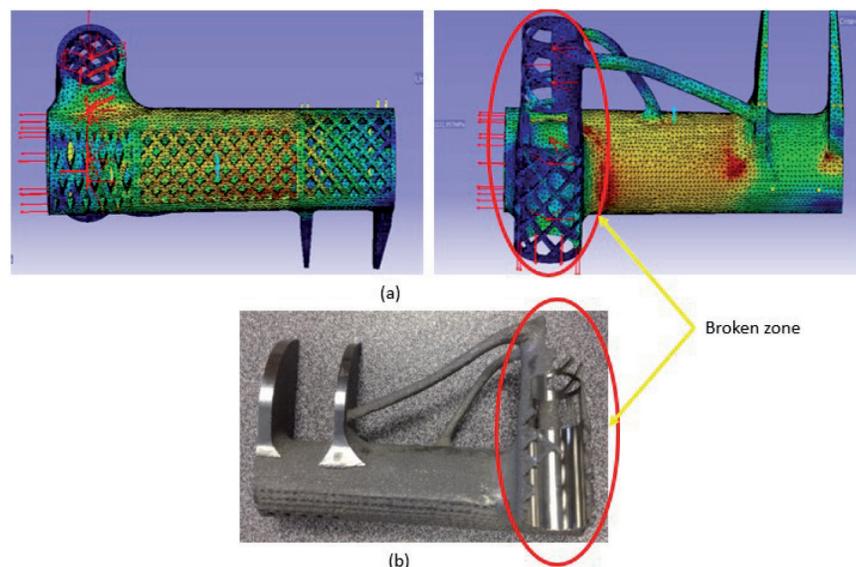


Fig. 7: (A) Resultado de cálculo por elementos finitos; (b) prototipo roto

una pieza con ayuda de una máquina de AM. Posteriormente, esta pieza se ensayó usando el banco de ensayos de la empresa. Sometida a esta prueba en condiciones experimentales, pero representando el contexto real, la pieza se rompió. La *Fig. 7 B* muestra la pieza rota después del ensayo realizado.

Debido al resultado obtenido en este caso, se ha considerado que la lista criterios de comparación obtenida de los estudios existentes puede ayudar a los diseñadores a elegir entre el VM y P. Sin embargo, esta lista de criterios no es suficiente para tomar una decisión correcta y, por ello, se han añadido dos criterios adicionales que son coherentes con nuestras experiencias anteriores:

La cantidad de información: es la cantidad de conocimiento obtenida de la simulación efectuada con el modelo virtual o del ensayo con el prototipo. Este es un criterio importante, donde es necesaria la retroalimentación. Por ejemplo, si la resistencia se analiza con ayuda de un modelo virtual, es posible ver el mapa de estrés en la pieza (véase *Fig. 7A*), identificando así las áreas de mayor riesgo y los puntos de posible ruptura. Sin embargo, si se lleva a cabo el análisis con el prototipo, únicamente es posible conocer si éste se rompe o no. Por ejemplo (véase *Fig. 7B*), un prototipo se rompe durante el ensayo, pero no se conoce la razón y es difícil identificar la zona donde se inicia el fallo. Sin embargo, en el caso del P, a menudo es posible determinar estas zonas, proporcionando más información que el VM. Por ejemplo, el P permite evaluar mejor la calidad de la superficie de la pieza y su acabado que el VM.

La representatividad: es la capacidad para representar las características reales del comportamiento de la pieza. Por ejemplo, en el caso del prototipo fabricado, el cual se suponía que debía ser resistente según el cálculo de elementos finitos, se rompió durante el ensayo efectuado (véase *Fig. 7*). Esto demuestra que el resultado del cálculo por elementos finitos no es, en este caso, representativo del comportamiento real de la pieza. Esto se debe a las suposiciones adoptadas durante la modelización, las cuales originan discrepancias entre los resultados de la simulación y el comportamiento real. En otros casos, el prototipo podría no ser representativo de la realidad porque, por ejemplo, las condiciones de utilización del componente ensayado no pueden ser reproducidas experimentalmente. Lo interesante aquí es la capacidad del P o VM para ser representativo de los comportamientos reales de la pieza en sus condiciones de uso.

Una conclusión de este caso de estudio es que los cinco criterios obtenidos de la bibliografía son relevantes para hacer una elección entre el VM y P, pero no son suficientes. Por ello, se han incluido dos criterios adicionales: la cantidad de información y de representatividad. Para elegir entre el VM y P, el diseñador también tiene que considerar la importancia de cada uno de estos criterios. En la siguiente sección, se desarrolla un método de comparación por pares que ayuda al diseñador a hacer una elección más eficiente.

5. EL MÉTODO DE COMPARACIÓN POR PARES – ESTUDIO PRECEPTIVO

En esta sección se dispone ya de un listado de criterios para comparar la eficacia del modelo virtual y el prototipo para analizar una propuesta de pieza. Para tomar una decisión entre estas dos opciones en base a estos criterios, se propone elaborar una tabla de comparación por pares, tal y como se ha

presentado anteriormente en la sección 4 (véase *Tabla 1*), aunque se han incluido los dos nuevos criterios de comparación considerados en el primer caso de estudio (la Cantidad de Información y la Representatividad, véase *Tabla 2*). Por otro lado, se ha incluido una clasificación de los criterios de comparación para tener en cuenta la importancia dada a cada criterio. De este modo, los siete criterios se clasifican en tres grupos:

- Más importante (valor: 3)
- Importante (valor: 2)
- Menos importante (valor: 1)

La clasificación de los criterios de comparación la lleva a cabo el diseñador teniendo en cuenta la situación de diseño. El diseñador puede centrarse principalmente en los criterios que pertenecen a las categorías «más importante» o «importante» al elegir entre el VM y P.

Por último, la estructura de la nueva tabla de comparación se define de manera similar a la *Tabla 2* (como ejemplo) e incluye la comparación entre el VM y P y la clasificación de cada uno de estos criterios.

En conclusión, el diseñador elegirá entre el VM y P mediante una tabla de comparación por pares que incluye la clasificación de los criterios de comparación. El valor de comparación, (+) o (-), es un valor estimado por el diseñador.

Una comparación por pares no es un método automático para hacer una elección. Se trata de una herramienta de apoyo que ayuda al diseñador, el cual tiene en cuenta la comparación y la importancia de cada criterio utilizado. El diseñador, siendo consciente de los resultados de la tabla comparativa en la que él ha definido las prioridades contextualmente, decide si prefiere hacer el análisis a través del VM o P.

Este método se aplicó para la evaluación en un segundo caso de estudio, que se presenta en el estudio descriptivo 2 (sección 6).

6. LA EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE COMPARACIÓN POR PARES: ESTUDIO DESCRIPTIVO 2

Este caso de estudio se centra en una pieza fabricada inicialmente con acero y que tiene una masa de 112 g (véase *Fig. 8A*). Se trata de una pieza utilizada en una aeronave y que se encuadra en el mismo proyecto que la mostrada en el primer caso de estudio (sección 4). El objetivo es rediseñar la pieza, fabricándola con una aleación de titanio mediante la técnica EBM y con un objetivo de reducción de masa del 40%. Las características de esta pieza no se tratan en este trabajo por razones de confidencialidad. Primero la optimización topológica y luego la creación del modelo CAD ha originado la propuesta de geometría en la pieza que se muestra en la *Fig. 8B*. En este punto, la pregunta es cómo hacer elegir entre el VM y P para analizar la resistencia de la pieza de este proceso de diseño.

La *Tabla 3* muestra una clasificación de los criterios de comparación definidos por el diseñador, de acuerdo con parámetros de situación de diseño tales como: el momento del proceso de diseño, el requisito del proyecto, etc. Por ejemplo, en este caso, el diseñador considera que el criterio «cantidad de información» es importante porque esta información es necesaria para optimizar la masa de la pieza, mientras que el criterio de «representatividad» es menos importante porque este caso está en fases de diseño muy tempranas.

El diseñador completó una tabla de comparación por pares (véase *Tabla 4*), la cual contiene el valor de comparación y una clasificación de cada uno de estos criterios. Por ejemplo, si se considera el criterio «cantidad de información» y se analiza la resis-

tencia con ayuda de un modelo virtual, es posible ver el mapa de estrés en la pieza. De este modo, se puede añadir (zona con alto riesgo de ruptura) o suprimir material (zona sobredimensionada) para optimizar la masa de la pieza.

En esta situación y de acuerdo con la información mostrada en la *Tabla 4*, el diseñador elige el VM para analizar la resistencia

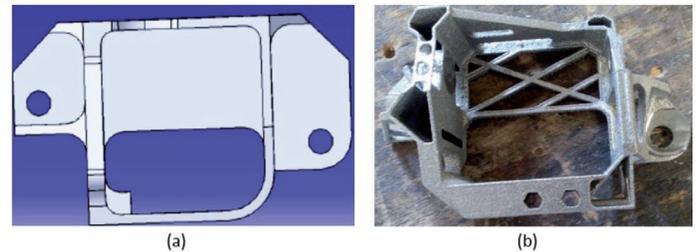


Fig. 8: (A) pieza inicial fabricada con acero; (b) la pieza final en fabricación con una aleación de titanio

Criterios	Clasificación	Modelo Virtual	Prototipo
Capacidad para realizar la tarea	3	+	+
Apoyo a la colaboración	2	+	-
Modificabilidad	3	+	-
Tiempo para completar la tarea	2	+	-
Coste de la tarea	1	+	-
Representatividad	1	-	+
Cantidad de información	2	+	+

Tabla 2: Comparación por pares entre el VM y P

Criterios	Clasificación	
	Grupo	Valor
Capacidad para realizar la tarea	Más importante	3
Apoyo a la colaboración	Importante	2
Modificabilidad	Importante	2
Tiempo para completar la tarea	Menos importante	1
Coste de la tarea	Menos importante	1
Representatividad	Menos importante	1
Cantidad de información	Importante	2

Tabla 3: Clasificación de los criterios de comparación en el caso de estudio 2

Criterios	Clasificación	Modelo Virtual	Prototipo
Capacidad para realizar la tarea	3	+	+
Apoyo a la colaboración	2	+	-
Modificabilidad	2	+	-
Tiempo para completar la tarea	1	+	-
Coste de la tarea	1	+	-
Representatividad	1	-	+
Cantidad de información	2	+	-

Tabla 4: Comparación por pares en la pieza perteneciente al caso de estudio 2

de la geometría de pieza propuesta. El VM es más adecuado que el P a todos los criterios en dos grupos «más importante» e «importante».

En este caso, el diseñador puede elegir rápidamente entre el VM y P usando el método de comparación por pares, siendo esta lista de criterios de comparación suficiente para esta labor ya que la elección efectuada tuvo éxito durante el proyecto.

Una clasificación de los criterios de comparación permite al diseñador centrarse en los criterios importantes a la hora de tomar su decisión. Los valores de clasificación y comparación (+ o -) los determina el diseñador en base a su propia experiencia y conocimiento. La elección, por lo tanto, realmente depende de su competencia y de la experiencia como participante en un proceso de diseño.

7. CONCLUSIÓN

El propósito de la investigación presentada en este trabajo se ha centrado en proponer un metodología que ayude al diseñador a elegir las mejores condiciones para el análisis del comportamiento de la pieza en el contexto de la fabricación aditiva.

Se han replanteado las definiciones del modelo virtual (VM) y el prototipo (P) en función de la información existente en trabajos de la bibliografía y de estudios de rediseño de pieza realizados en asociación con una empresa aeronáutica. Además, se ha definido una lista de criterios de comparación para ayudar a los diseñadores a la hora de escoger entre el modelo virtual y el prototipo en la fase de análisis. Se han llevado a cabo varios estudios de rediseño en piezas para adaptar su producción a la tecnología de la Fabricación Aditiva (AM). Se ha propuesto luego una herramienta de comparación por pares, que incluye una tabla de comparación asociada a una clasificación de los criterios de comparación, lo que permite que el diseñador elija entre el MV y P en la fase de análisis del proceso de diseño.

Los casos de estudio presentados en este trabajo han demostrado, primero, que la herramienta de comparación por pares parece ser eficaz a la hora de ayudar a los diseñadores a elegir entre el VM y P para facilitar el desarrollo de la fase de análisis en el proceso de diseño. Por otra parte, se pone de manifiesto el papel clave del diseñador al decidir tanto los criterios de clasificación como al asignar el valor de comparación para hacer la elección final de la opción de análisis. El siguiente paso de esta investigación consistirá en desarrollar una herramienta informática de apoyo que ayude a los diseñadores a tomar las mejores decisiones durante los dos etapas clave descritas anteriormente (clasificación y los valores de comparación).

REFERENCIAS

[1] Morretton E, F, F Pourroy Vignat, Marin P. L'impact des Choix du concepteur dans l'obtención d'une géométrie à l'cuestión du processus d'optimisation topologique. En la 15ème édition de ce colloque AIP-PRIMECA nacional 2017 Apr 12.

[2] Suh NP. Diseño axiomático: avances y aplicaciones (la serie de Oxford en manufactura avanzada), 2001.

[3] Beitz W, Pahl G, Grote K. Engineering design: un enfoque sistemático. La Sra. boletín. 1996 Aug;71.

[4] Me Gibson, Rosen DW, Stucker B. tecnologías de fabricación aditiva. Nueva York: Springer; 2010.

[5] Gu DD, Meiners W, K, Poprawe Wissenbach R. Laser fabricación aditiva de componentes metálicos: materiales, procesos y mecanismos. Materiales internacionales comentarios. El 1 de mayo de 2012;57(3):133-64.

[6] Melchels pm, Domingos MA, Klein TJ, Malda J, Bartolo PJ, Hutmacher DW.

Fabricación aditiva de tejidos y órganos. Los avances en la ciencia de los polímeros. 2012 Aug 31;37(8):1079-104.

[7] Felzmann R, Gruber Mitteramskogler S, G, P, Boccaccini Tesavibul AR, Liska, R. J. Stampfl Litografía-Basado fabricación aditiva de celular Estructuras de cerámica. Materiales de ingeniería avanzada. 2012 Dec 1;14(12):1052-8.

[8] la bendición LT, Chakrabarti A. DRM, una metodología de investigación de diseño. Springer Science & Business Media; 2009 Jun 13.

[9] Tomlin M, J. Meyer optimización de topología de un aditivo capa fabricada (ALM) aeroespacial parte. Del 7º InProceeding Altair CAE Technology Conference 2011 Mayo (págs. 1-9).

[10] El Ponche, R. Méthodologie de conception pour la fabricación aditiva, application à la proyección de poudres (tesis doctoral, Ecole Centrale de Nantes), 2013.

[11] Vignat Vayre B, F, Villeneuve F. Diseño para fabricación aditiva. Procedia el ClrP. El 1 de enero de 2012;3:632-7.

[12] Doutré PT, Vo TH, Marin Pourroy P, F, G, Prudhomme topologique Vignat F. Optimización: outil clé pour la conception des pièces produites par la fabricación aditivo?. En 14ème Colloque AIP PRIMECA Nacional 2015 Mar 31.

[13] Doutré PT, Morretton E, Vo TH, Marin Pourroy P, F, G, Prudhomme Vignat F. Comparación de algunos enfoques para definir un modelo CAD de optimización topológica en diseño para fabricación aditiva. InAdvances sobre mecánica, diseño de ingeniería y fabricación en 2017 (págs. 233-240). Springer, Cham).

[14] Choi SH, Chan AM. Un sistema de prototipado virtual para un rápido desarrollo de productos. Diseño Computer-Aided. 2004 Apr 1;36(5):401-12.

[15] Zorriassatine Wykes F, C, R, Gindy Parkin N. Una encuesta de prototipado virtual técnicas para el desarrollo de productos mecánicos. Las actuaciones de la institución de ingenieros mecánicos, Parte B: Oficial de ingeniería de fabricación. 2003 Apr 1;217(4):513-30.

[16] Bullinger HJ, Warschat J, Fischer D. rápida una visión general del desarrollo del producto. Equipos en la industria. 2000 Jun 1;42(2-3):99-108.

[17] Van Dierdonck Vandeveldé A, R, Clarysse B. El papel de prototipos físicos en el proceso de desarrollo del producto. Vlerick Leuven Gent Management School serie de documentos de trabajo. 2002;7.

[18] Bordegoni M, Cugini U, G, Polistina Caruso S. mezclado prototipado de evaluación de producto: un marco de referencia. Revista Internacional sobre Diseño Interactivo y manufactura (IJIDeM). 2009 Aug 1;3(3):177-87.