

Study of distortion and residual stresses produced by a tool manufactured using additive manufacturing

Daniel del-Río-Velilla¹, ANDRÉS PEDRAZA, ILIA LOPEZ-LORENTE, Antonio Fernandez-Lopez¹

1 - Universidad Politécnica de Madrid.

Abstract

The manufacture of curing tools for composite materials using 3D printing represents an innovative, rapid, and economical solution, especially for small production runs. It is an efficient alternative to traditional machining, although its influence on the mold must be known. A method for manufacturing high-temperature laminating tools is proposed, based on a 3D printed model and short fiberglass-reinforced epoxy resin, which allows its use at temperatures up to 160 °C. The influence of the tool will be studied through a dimensional analysis of the geometric variations of the model throughout each stage, from 3D printing to the post-curing required for working at high temperatures. The results of this analysis will be discussed and will allow the development of compensation techniques to minimize deviations between the final part and the nominal geometry and the reduction of residual stresses to improve the precision and repeatability of the process.

 OPEN ACCESS

Accepted: 28/07/2025

Keywords:

impresión 3D
fabricación aditiva
útil de laminado
metrología
3D printing
additive manufacturing
curing tools

1. Introducción

La fabricación de moldes y utillajes para el curado de materiales compuestos representa una fase crucial dentro de la cadena de valor del proceso de laminado. Tradicionalmente, estos elementos se elaboran mediante mecanizado de materiales metálicos o compuestos, lo que implica elevados costes económicos y largos tiempos de entrega. Dichas limitaciones se acentúan en contextos de producción de bajo volumen, como prototipos o series cortas.

En años recientes, la fabricación aditiva (FA), especialmente la impresión 3D mediante modelado por deposición fundida (FDM), ha emergido como una alternativa prometedora para la generación rápida de utillaje [1], [2]. Esta tecnología ofrece ventajas significativas en cuanto a reducción de costes, plazos de fabricación y libertad geométrica [3]. Sin embargo, factores como la precisión dimensional, la estabilidad térmica del conjunto y la aparición de esfuerzos residuales durante el curado deben ser cuidadosamente controlados para garantizar la funcionalidad del molde [4].

El presente trabajo analiza la viabilidad funcional y dimensional de un útil de curado de alta temperatura, construido a partir de un premolde impreso en PLA y posteriormente recubierto con resina epoxi reforzada con fibra de vidrio para generar el molde final. Se cuantifican las desviaciones geométricas inducidas a lo largo de las etapas de fabricación y se comparan dos configuraciones geométricas del premolde: impresión vertical en una única pieza y en tres partes que serán unidas. Además, se propone una estrategia de compensación geométrica para mitigar deformaciones post-curado.

2. Metodología

La fabricación del molde comienza con la impresión 3D de un

premolde mediante tecnología FDM y filamento de ácido poliláctico (PLA), material seleccionado por su bajo coste y facilidad de procesamiento. Aunque su baja resistencia térmica impide su uso directo en procesos de curado, resulta adecuado como modelo maestro. En la [Figura 1](#) se puede ver las tres piezas que forman el premolde estudiado.



Figura 1 Ejemplo del modelo en partes impreso en 3D.

Posteriormente, se realiza una preparación superficial del premolde con el objetivo de optimizar el acabado del molde final. Esta preparación incluye:

1. Lijado mecánico para eliminar irregularidades generadas por la impresión.

2. Aplicación de masilla de poliéster para rellenar discontinuidades entre capas.
3. Lijado fino para alisado final (Figura 2).
4. Aplicación de tres capas de pintura brillante, seguidas de lijado al agua y pulido para mejorar el acabado superficial (Figura 3).

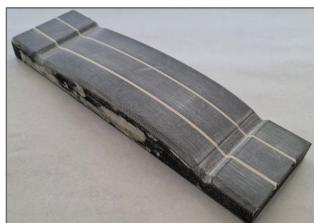


Figura 2 Modelo en partes después de haber sido procesado.

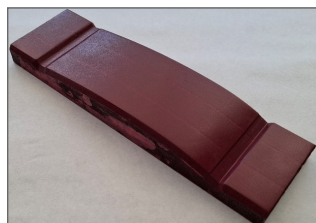


Figura 3 Modelo en tres partes con el acabado superficial completo

Una vez finalizada la preparación del premolde, se aplica una barrera desmoldeante (cera D34 [5]) en cinco capas. A continuación, se procede a la fabricación del útil mediante la aplicación de tres capas de gelcoat EG160 [6] (Figura 4), seguido de una capa de resina epoxi reforzada EMP160 [7] (Figura 5), capaz de soportar temperaturas de hasta 160 °C.

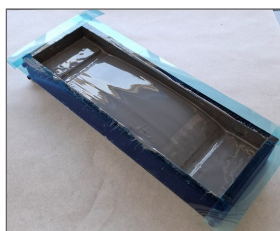


Figura 4 Aplicación del gelcoat EG160 sobre el premolde.



Figura 5 Aplicación del refuerzo EMP160 sobre el premolde.

El curado inicial del sistema se realiza a temperatura ambiente (25 °C durante 24 horas) o acelerado (40 °C durante 12 horas). Posteriormente, el molde es desmoldeado (Figura 6) y sometido a un postcurado escalonado hasta alcanzar los 160 °C (Figura 7), asegurando el desarrollo completo de las propiedades mecánicas y térmicas del material.

Finalmente, se realiza un pulido sobre la superficie de laminado y se utiliza el molde para fabricar una pieza de material compuesto mediante laminado manual y curado térmico.



Figura 6 Molde tras el curado a temperatura ambiente.

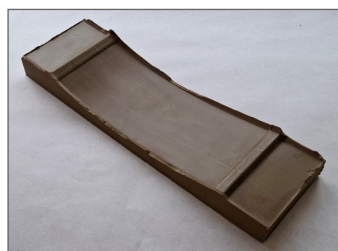


Figura 7 Molde tras el proceso de post-curado.

3. Resultados

Para evaluar las desviaciones dimensionales se empleó un escáner 3D EinScan HD Pro, generando nubes de puntos comparadas con el modelo CAD mediante herramientas de alineación "Best Fit" en CATIA. Esta alineación se realiza de forma iterativa para maximizar la precisión del ajuste. En la Figura 8 se muestra el ajuste de la superficie escaneada con la superficie de referencia.

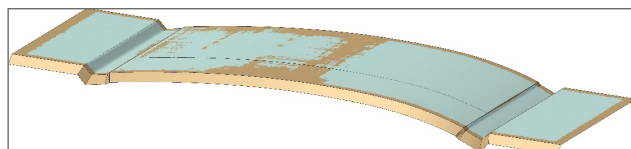


Figura 8 Pieza escaneada en 3D (verde) alineada con el modelo de referencia (marrón).

El análisis de desviaciones, ejecutado con la herramienta "Deviation Analysis" de CATIA, revela la existencia de zonas con desviaciones localizadas elevadas, especialmente en regiones de geometría compleja donde el proceso de lijado presenta limitaciones, Figura 9. Dado que en esta pieza de estudio las superficies con un mayor grado de desviación pertenecían a las zonas destinadas a las creces del material para su posterior recantado se decidió excluirlas del cálculo final al no influir en la funcionalidad de la pieza.

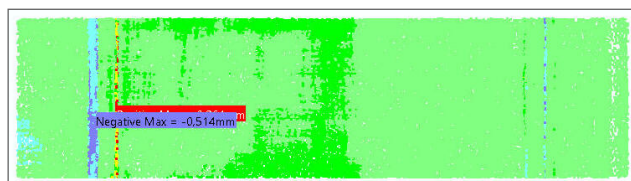


Figura 9 Valores de desviación de la pieza impresa en 3D con el modelo escaneado.

En la Tabla 1 se presentan los valores de desviación máxima negativa, máxima positiva y desviación estándar obtenidos en las distintas etapas del proceso de fabricación para las configuraciones analizadas.

Tabla 1 Resultados del análisis de desviaciones de las etapas del proceso de fabricación escaneadas respecto al modelo CAD.

Pieza	Desviación negativa máxima [mm]	Desviación positiva máxima [mm]	Desviación estándar [mm]
Completa	-0,185	0,0414	0,0428
Completa curado	-0,264	0,183	0,0723
Completa postcurado	-0,757	1,34	0,538
3 partes	-0,169	0,257	0,066
3 partes curado	-0,154	0,29	0,0542
3 partes postcurado	-0,794	1,44	0,594

4. Discusión

El análisis dimensional demuestra que el premolde impreso en 3D presenta una elevada fidelidad geométrica respecto al modelo CAD, con desviaciones inferiores a 0,1 mm en las superficies críticas. Sin embargo, tras los procesos de curado y

postcurado se identifican deformaciones significativas, atribuibles a contracciones del material epoxi y a la asimetría estructural inducida por la aplicación unidireccional del gelcoat.

Para mitigar estas desviaciones, se propone una estrategia de compensación geométrica. Esta se basa en el cálculo de los vectores de desviación entre la superficie escaneada y la CAD, que se aplican con un factor de corrección de -1 sobre el modelo digital, generando así una superficie compensada. Esta técnica permite predecir y corregir deformaciones sistemáticas, mejorando la precisión dimensional del molde final (Figura 10). Adicionalmente, sería posible emplear métodos numéricos, como el análisis por elementos finitos (FEA), para modelar y prever las deformaciones térmicas esperadas durante el curado, lo cual permitiría optimizar el diseño del premolde antes de su fabricación física.

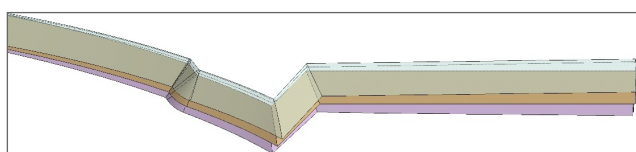


Figura 10 Representación de la superficie de referencia (naranja), escaneada (rosa) y compensada (verde translúcido).

5. Conclusiones

1. La combinación de impresión 3D con recubrimiento epoxi reforzado constituye una alternativa viable para la fabricación de moldes de curado de altas prestaciones, especialmente en contextos de prototipado o producción a baja escala.
2. Las desviaciones geométricas permanecen contenidas durante las etapas iniciales del proceso, pero aumentan significativamente tras el postcurado debido a la naturaleza termocontractil del material de refuerzo.
3. La estrategia de compensación geométrica propuesta, basada en escaneado 3D y modelado inverso, permite minimizar deformaciones y mejorar la precisión del molde resultante.
4. El coste total del proceso para los moldes estudiados asciende a 33,23 € (Tabla 2), representando una reducción superior al 75% respecto a los procesos tradicionales de mecanizado, con un coste aproximado de 150 € si es mecanizado en aluminio 5052, lo que confirma su atractivo económico.

Tabla 2 Desglose de costes de fabricación.

Producto	Cantidad	Coste [€]
PLA	198 g	2.97
Impresora 3D	10 h	10
Masilla de poliéster	20 g	0.52
Papel de lija	3 ud	1
Pintura	0.05 %	0.44
EG160	50 g	2.02
EMP160	400 g	8.53
Horno	21 kW	2.1
Pulidor	25 g	0.65
Consumibles	NA	5
Total		33.23

5. Es necesario continuar con el estudio de compensación dimensional, teniendo en cuenta las deformaciones térmicas, para que este proceso de fabricación de moldes de laminado tenga unas tolerancias comparables a los procesos de fabricación con CNC y materiales metálicos tradicionales.

1. Bibliografía

- [1] P. Ferretti *et al.*, "Molds with Advanced Materials for Carbon Fiber Manufacturing with 3D Printing Technology," *Polymers* 2021, Vol. 13, Page 3700, vol. 13, no. 21, p. 3700, Oct. 2021, doi: 10.3390/POLYM13213700.
- [2] A. El Moumen, M. Tarfaoui, and K. Lafdi, "Additive manufacturing of polymer composites: Processing and modeling approaches," *Compos B Eng*, vol. 171, pp. 166–182, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2019.04.029.
- [3] P. Ferretti, G. M. Santi, C. Leon-Cardenas, E. Fusari, M. Cristofori, and A. Liverani, "Production readiness assessment of low cost, multi-material, polymeric 3D printed moulds," *Heliyon*, vol. 8, no. 10, p. e11136, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.HELIYON.2022.E11136.
- [4] A. Kantaros, E. Soulis, F. I. T. Petrescu, and T. Ganetsos, "Advanced Composite Materials Utilized in FDM/FFF 3D Printing Manufacturing Processes: The Case of Filled Filaments," *Materials* 2023, Vol. 16, Page 6210, vol. 16, no. 18, p. 6210, Sep. 2023, doi: 10.3390/MA16186210.
- [5] "Desmoldeante 34D." Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: <https://feroca.com/es/supplier/40-abel-industrie?srsId=AfmBOopcf10Qu-CrYlaVh2MHG7rUjfPo3tk4f2e1hzYr28AFANAxcnK2>
- [6] "EG60 Epoxy Tooling Gel Coat", Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.easycposites.eu/eg160-high-temperature-epoxy-tooling-gel-coat>
- [7] "EMP160 High Temp Epoxy Moulding Paste", Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.easycposites.eu/emp160-high-temperature-epoxy-moulding-paste>