



PROMPT

"Crea una macro fotografía de una grieta producida por un impacto puntual sobre un plástico translúcido. Ultra HD 8k, motor VRAY, arte conceptual, producto, vibrante, renderizado 3D"

"Create a macro photograph of a crack produced by a point impact on a translucent plastic. Ultra HD 8k, VRAY engine, concept art, product, vibrant, 3D rendering"

ANÁLISIS DE RESISTENCIA A CARGAS DE IMPACTO POR ENSAYO TIPO CHARPY SOBRE PROBETAS ELABORADAS POR MEDIO DE MANUFACTURA ADITIVA POLYJET

Analysis of Resistance to Impact Loads by Charpy Type Test on Specimens Elaborated by Means of Polyjet Additive Manufacturing

Iván Andrés Rodríguez Torres

Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA Regional Distrito Capital
Centro de Manufactura en Textil y Cuero (CMTC)

RESUMEN

LA IMPRESIÓN 3D SE HA CONSOLIDADO como una técnica de manufactura a nivel global, encontrando aplicaciones fundamentales en diversas industrias, desde la aeronáutica hasta la médica. La tecnología de fabricación aditiva PolyJet es un sistema que utiliza resina para construir objetos capa por capa, empleando la exposición a la luz UV para endurecer cada capa de manera inmediata. Un aspecto distintivo de los objetos fabricados mediante PolyJet es su anisotropía, característica intrínseca de este proceso. El objetivo de este artículo es analizar la resistencia al impacto de las piezas fabricadas mediante PolyJet utilizando el ensayo tipo *Charpy* según la norma ASTM D 6110. Se han fabricado y probado 12 probetas con resinas VEROCLEAR RGD 810 en una máquina OBJET 260 EDEN. Estos ensayos proporcionan datos cruciales para evaluar cómo la orientación de la impresión afecta la resistencia al impacto de las piezas. Este estudio se suma a la investigación en curso sobre la resistencia al impacto de productos fabricados mediante PolyJet, contribuyendo al creciente cuerpo de conocimiento en el campo de las propiedades mecánicas de estos productos. Se espera que estos hallazgos tengan un impacto significativo en la forma en que se utiliza la tecnología de PolyJet en diversas aplicaciones industriales.

Palabras clave: Fractura de polímeros, Manufactura aditiva, Polyjet.

ABSTRACT

3D printing has established itself as a key element in manufacturing worldwide, finding essential applications in various industries, from aerospace to medical. The PolyJet additive manufacturing technology is a system that uses resin to build objects layer by layer, employing UV light exposure to immediately harden each layer. An inherent characteristic of objects manufactured using PolyJet is their anisotropy. The aim of this article is to analyze the impact resistance of pieces manufactured using PolyJet by utilizing the Charpy-type test according to ASTM D 6110. For this purpose, 12 specimens were fabricated and tested with VEROCLEAR RGD 810 resins on an OBJET 260 EDEN machine. These tests provide crucial data to evaluate how the orientation of printing affects the impact resistance of the pieces. This study contributes to ongoing research on the impact resistance of products manufactured using PolyJet, adding to the growing body of knowledge in the field of mechanical properties of these products. It is anticipated that these findings will have a significant impact on how PolyJet technology is utilized in various industrial applications.

Keywords: Fracture Polymers, Additive Manufacturing, Polyjet.

INTRODUCCIÓN

La Manufactura Aditiva (MA), como una tecnología en pleno desarrollo, estimula la investigación para la elaboración de estrategias que aprovechen al máximo sus ventajas. Estas estrategias se basan en las propiedades del material, el diseño de la pieza y el proceso de fabricación (impresión). En la etapa investigativa, es necesario identificar las variables que pueden influir en el comportamiento de la pieza frente a esfuerzos mecánicos. Este artículo se enfoca en analizar la incidencia de la orientación de la pieza con respecto a los ejes x, y, z contemplados por la máquina Objet 260 Eden en el proceso de fabricación de piezas.

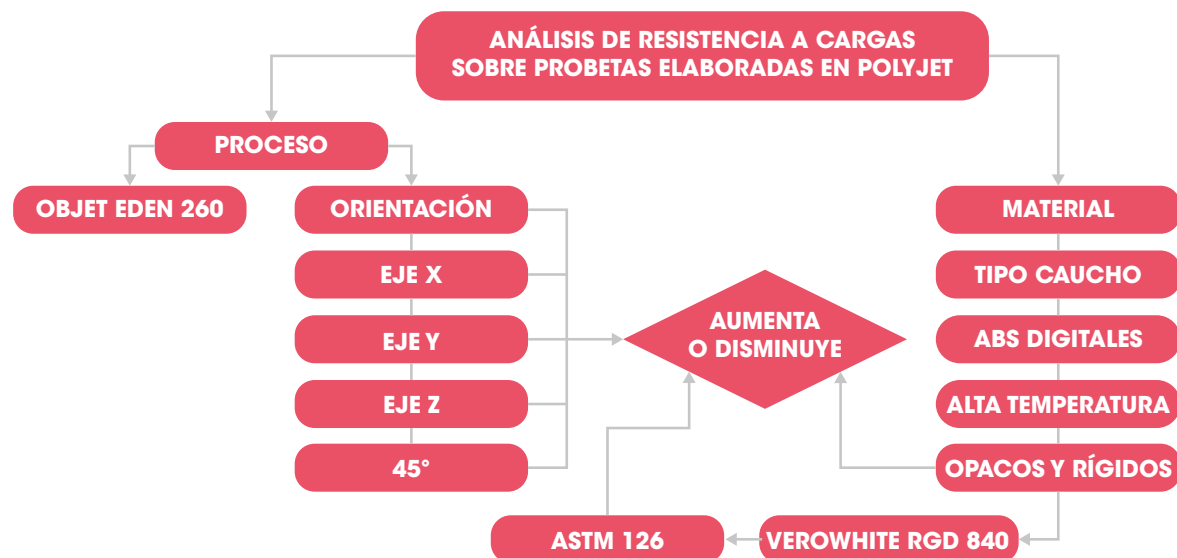
El objetivo de esta investigación es evaluar la resistencia al impacto del material VEROCLEAR RGD 810 mediante una prueba *Charpy*, siguiendo la norma ASTM D6110-04. Se fabricaron 12 probetas en total: 3 alineadas con cada uno de los ejes (x, y, z) y 3 impresas a 45°. Estas probetas se ensayaron según la norma ASTM D6110-04, y los resultados se expresaron en Joules (J/m). A continuación, se analizarán y discutirán los resultados.

Es importante destacar que los sistemas de manufactura aditiva ofrecen nuevas posibilidades de uso. Sin embargo, es fundamental considerar que las propiedades del objeto fabricado pueden variar según la posición de impresión. Factores como el tiempo, el material y la temperatura pueden influir en la resistencia al impacto de la pieza. No obstante, en este artículo, no se tendrán en cuenta estos factores.

MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de diseño y fabricación de un objeto mediante MA Polyjet puede ser planificado para que las piezas fabricadas aumenten o disminuyan su resistencia al impacto de acuerdo con la orientación que tuvieron durante el proceso de manufactura. Esto se basa en la anisotropía característica de estos productos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la resistencia al impacto puede variar dependiendo de varios factores, como la geometría de la pieza, el modo de carga, la aplicación de carga, el entorno y las propiedades del material (Cárdenas Castrillón, 2017).

Figura 1. Mapa de conceptos (Autoría propia).



MATERIAL: VEROCLEAR RGD810

POLÍMEROS FOTOSENSIBLES

Los materiales fotosensibles son aquellos que, al ser irradiados con cierto tipo de luz, experimentan reacciones fotoquímicas que conducen a cambios estructurales significativos. Estos cambios pueden manifestarse en la modificación de propiedades, comportamiento o respuesta del material. Es importante destacar que la luz actúa como un reactivo en estos procesos y tiene una espacialidad limitada, ya que se propaga en línea recta y solo induce la reacción en la región donde incide. Además, el control temporal de estos procesos depende de la presencia o ausencia de luz, lo que permite iniciar y detener el proceso a voluntad y a temperatura ambiente.

En el contexto de esta investigación, se trabaja con un polímero de polimerización fotoiniciada. Este proceso implica exponer monómeros a radiación ultravioleta (UV) y catalizar una sustancia que inicialmente se encuentra en estado líquido, transformándola en un polímero rígido.

En cuanto al proceso de fabricación, se utiliza el sistema POLYJET, que es una tecnología de impresión 3D. Esta tecnología es capaz de producir piezas, prototipos y herramientas con acabados suaves y alta precisión. Ofrece una resolución de capa microscópica y una precisión de hasta 0.1 mm, lo que permite la creación de paredes delgadas y geometrías complejas. Además, se destaca por su amplia gama de materiales disponibles, superando a otras tecnologías en este aspecto (STRATASYS, 2019).

PARAMETROS DE IMPRESIÓN

En el planteamiento inicial, se planeó realizar las pruebas en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional – Sede Bogotá, y las probetas se elaboraron en el Laboratorio CNC del SENA Centro Metalmecánico. Se aplicaron las normas ASTM, las cuales son referenciadas por el fabricante (STRATASYS, 2019). Para esta investigación, se fabricaron 12 probetas

siguiendo la norma ASTM. El diseño CAD de las probetas se desarrolló en el software Autodesk INVENTOR 2019 y se guardaron los archivos en formato .stl. En el software Objet Studio Eden 260v, se prepararon los archivos .stl de los modelos a imprimir, lo que permitió configurar los parámetros de fabricación de las probetas. Para la elaboración de estas probetas, se seleccionaron los siguientes parámetros de impresión:

- Material: Veroclear RGD810.
- Acabado: *Matte* (opaco) en la última capa construida.
- En *High speed* (HS) se obtiene un espesor de capa (resolución) de 30 micras.
- Las orientaciones de las muestras en la bandeja de construcción serán de 0°, 45° y 90° de acuerdo a la selección para cada prueba.

Figura 2. Vista de la probeta con la incisión (Autoría propia).

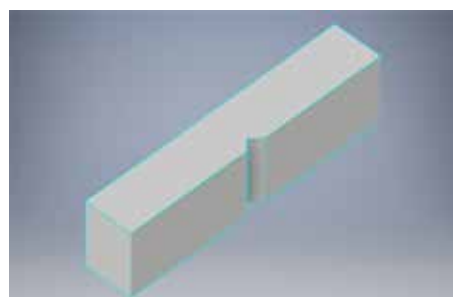


Figura 3. Sección de las probetas y patrón angular de estriado (Autoría propia).

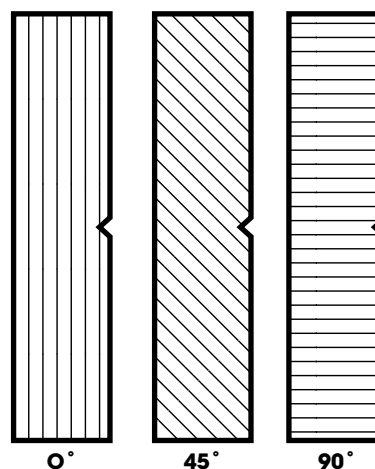


Figura 4. Proceso de elaboración probetas (Autoría propia).



NORMA ASTM D6110-04

El método de prueba utilizado tiene como finalidad determinar la resistencia de los plásticos a la fractura mediante un impacto súbito. La prueba mide la energía absorbida por la probeta cuando se somete a un impacto, y se utiliza una máquina estandarizada que cuenta con un martillo de 1 Joule. Es importante destacar que la presencia de una muesca en la probeta induce una concentración de tensión, lo que promueve una fractura frágil en lugar de una fractura dúctil.

Los resultados de este método de ensayo se expresan en términos de la energía absor-

bida por unidad de la anchura de la muestra. Esta norma de prueba está estandarizada según las pautas de ASTM (American Society for Testing and Materials) y proporciona información importante sobre la capacidad de un material plástico para resistir la fractura por impacto (ASTM, 2004).

PRUEBA DE IMPACTO

Se utiliza específicamente para estudiar la tenacidad del material en un contexto de ensayo mecánico dinámico. Este tipo de ensayo se realiza para determinar cómo se comporta el material cuando se somete a velocidades de

Tabla 1. Pruebas de polímeros (Autoría propia).

Probeta	α	β	γ	Espesor de capa
X1	0	90	90	32 μ
X2	0	90	90	32 μ
X3	0	90	90	32 μ
Y1	90	0	0	32 μ
Y2	90	0	0	32 μ
Y3	90	0	0	32 μ
Z1	0	0	90	32 μ
Z2	0	0	90	32 μ
Z3	0	0	90	32 μ
45-1	45	45	0	32 μ
45-2	45	45	0	32 μ
45-3	45	45	0	32 μ

Figura 5. Máquina de prueba para impacto (Autoría propia).

deformación elevadas utilizando un péndulo de impacto. Permite medir la energía absorbida por una probeta estandarizada durante el impacto.

Las fallas por fragilidad en los materiales pueden ser causadas por varios factores, y de acuerdo con múltiples estudios, se identificaron tres causas principales: la variación en la velocidad de deformación debida a la rapidez en la aplicación de la carga, la generación de estados complejos de tensiones debido al “efecto de forma” y las bajas temperaturas. En esta prueba en particular, se controlaron la velocidad de impacto y la temperatura, por lo que solo se consideró como uno de los factores principales en la falla la presencia de un estado triaxial de tensiones, que se genera debido a la muesca en la probeta. Esta muesca provoca microgrietas de deformación y roturas en el arrancamiento durante la prueba.

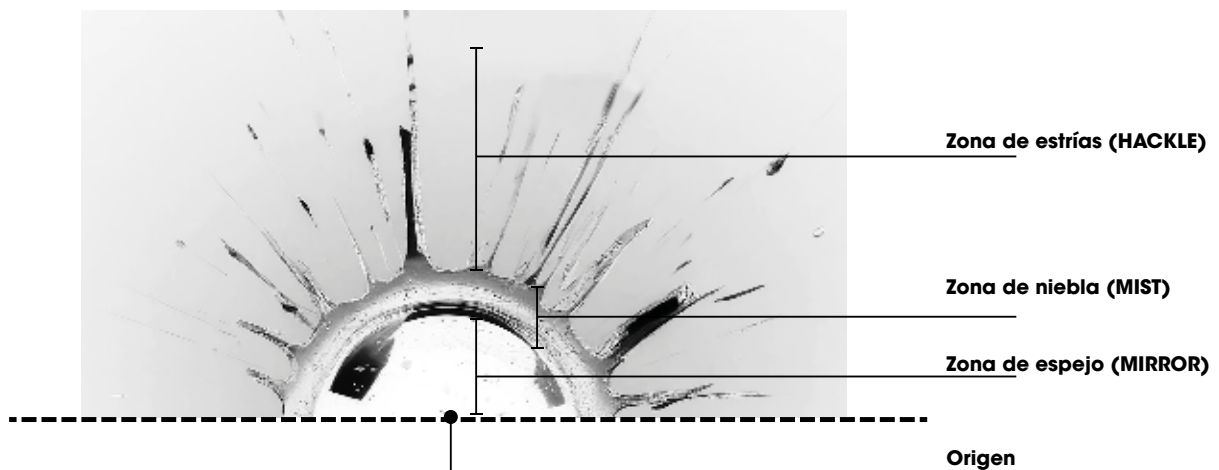
La velocidad de aplicación de carga en la prueba *Charpy* es superior a la velocidad crítica de rotura, lo que resulta en una deformación localizada con epicentro en la entalla de la probeta. Las condiciones de la prueba *Charpy* se mantuvieron constantes en cuanto a temperatura, velocidad de impacto, posición del péndulo y tipo de péndulo estándar, para asegurarse de que estos factores no influyeran en el ensayo. En resumen, estas pruebas de impacto *Charpy*

con muesca, realizadas de acuerdo con la norma ASTM D6110-04, evaluaron la resistencia al impacto de muestras con muesca fabricadas mediante un proceso de impresión en capas. Las muestras se probaron en tres orientaciones diferentes, y se sujetaron en sus extremos para someterlas al impacto del martillo del péndulo con una energía controlada de 1 Joule.

Este ensayo se llevó a cabo en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Universidad Nacional de Colombia utilizando la máquina de impacto marca PHYSICAL TEST SOLUTION. A continuación, se presenta una tabla que muestra las variables consideradas para la realización de las pruebas de impacto. Estas variables se seleccionaron de acuerdo con los diferentes parámetros especificados en la norma ASTM D6110 (*Charpy*) con el fin de elegir los parámetros que proporcionarían los resultados adecuados para su posterior análisis.

Se consideró un factor importante la orientación de las probetas, ya que influye considerablemente en los resultados. Las propiedades mecánicas del polímero se ven afectadas durante su procesamiento y construcción. A partir de las pruebas de tensión realizadas, se observó que la orientación influye en el comportamiento del material, generando un efecto anisotrópico debido a los cambios en el estiramiento.

Figura 6. Patrón de fractura. Tomada de *Mechanical Behavior* 2nd ed.



RESULTADOS

La fractura es el proceso de separación o fragmentación de un cuerpo sólido en dos o más partes debido a tensiones aplicadas sobre él. Esta ruptura implica la creación de una nueva superficie dentro del material. Es importante destacar que la fractura se refiere a la acción de quebrar o romper, pero no necesariamente implica una falla del material en términos generales (Chawla, 1999).

El estudio de la fractura abarca diversas disciplinas, como la física del estado sólido, la ciencia de los materiales y la mecánica continua. En esta investigación, se ha puesto énfasis

en evaluar las fracturas causadas por la aplicación rápida de cargas, es decir, por impacto. Esto implica un análisis de cómo se forman y propagan las grietas en el material.

La fractografía es la rama que se encarga de visualizar y estudiar la fractura. En este tipo de análisis, se presta atención al aspecto general de la fractura, la morfología de las grietas, su trayectoria y cómo se propaga la fractura. Una fractura puede originarse en una grieta preexistente, un defecto en el material o una heterogeneidad en su estructura. Además, el tamaño de la grieta inicial también desempeña un papel importante en este proceso. Por lo

Figura 6. Sección Probeta eje x (Autoría propia).



Figura 7. Sección Probeta eje Y (Autoría propia).



Figura 8. Sección Probeta eje z (Autoría propia).**Figura 9.** Sección Probeta a 45° (Autoría propia).

general, el análisis fractográfico se lleva a cabo en superficies de fractura que pertenecen al material en su conjunto o al producto final.

La fractura entre los materiales plásticos y los vidrios indican una semejanza estructural debido a que presentan zonas muy parecidas (Chawla, 1999).

La zona de espejo (*mirror*) es lisa y brillante, aunque si la tensión de rotura es muy grande puede llegar a ser algo nebulosa. La posición de la zona de espejo indica el origen de la fractura. La forma nos da idea de la distribución de las tensiones. El tamaño nos indica la magnitud de la tensión que generó la fractura y la distribución de esta zona respecto de las demás, nos indica que normalmente las

grietas que provocan la fractura están invariablemente en la superficie del material. También esta zona es útil para identificar grietas debidas a inclusiones (Chawla, 1999).

La zona de niebla (*mist*) está formada por un arco estrecho que rodea la zona de espejo (*mirror*) y su superficie de fractura presenta un aspecto rugoso. Después de la zona de niebla se encuentra la zona de estrías (*hackle*) o zona de fractura. Está formada por la interacción con defectos del material de las dos ondas de propagación: la transversal y la longitudinal. Por un lado tenemos las líneas radiales que parten de la zona de niebla y siguen paralelamente a la dirección de propagación, y por otro lado, se observan una sucesión de ondas de fractura (Chawla, 1999).

Tabla 2. Reporte de resultados de análisis de ensayos de impacto

45STANDARD	ASTM D6110	BATCH NUMBER	R.RODRÍGUEZ_ 13-12-2018
Type	V	Deep [mm]	2
Sn	Área [mm²]	Energy [J]	Toughness
X1	80	0.408	0.005
X2	80	0.182	0.002
X3	80	0.194	0.002
Y1	80	0.337	0.004
Y2	80	0.397	0.005
Y3	80	0.384	0.005
Z1	80	0.182	0.002
Z2	80	0.210	0.003
Z3	80	0.176	0.002
45-1	80	0.453	0.006
45-2	80	0.476	0.006
45-3	80	0.274	0.003
&Number&13&	&Area&13	&Energy&13&	&Toughness&13&
&Number&14&	&Area&14	&Energy&14&	&Toughness&14&
&Number&15&	&Area&15	&Energy&15&	&Toughness&15&
Min Value	80.0	0.176	0.002
Max Value	80.0	0.476	0.002
Mean Value	80.0	0.306	0.002
Standart Deviation	0.0	0.115	0.002

CONCLUSIONES

ORIENTACIÓN

Las pruebas realizadas han demostrado que las probetas y su resistencia al impacto están directamente relacionadas con la orientación de la impresión en su fabricación, lo que refuerza su anisotropía. Se puede observar una sustancial diferencia entre los resultados obtenidos en las probetas impresas a 45° y las probetas impresas sobre el eje Y con respecto a las probetas X y Z. Las probetas Y, y 45° presentan mayor resistencia al impacto en un 74.4% con respecto a la media de las otras, bajando la velocidad de la falla y, por tanto, demostrando que las piezas en impresión 3D pueden aumentar su resistencia al impacto si la impresión está realizada en ángulo o sobre el eje Y o impresa a 45° . Aunque cabe aclarar que se necesitaría realizar más pruebas para aumentar la representatividad de la muestra. Asimismo, esta investigación abre la posibi-

lidad de explorar diferentes angulosidades para evaluar su resistencia al impacto.

LÍNEAS DE FUERZA

Las geometrías abruptas pueden ser concentradores de esfuerzos que induzcan la falla del material por fractura. Esto se debe a que las líneas de fuerza que se disponen a lo largo de la pieza se deforman y se concentran alrededor de una muesca, como es el caso de las probetas evaluadas, cuya muesca está diseñada para ser un concentrador de esfuerzos que acelera la fractura durante la ejecución de la prueba. Además, las geometrías abruptas pueden actuar como aceleradores de fractura. Por lo tanto, se recomienda tener en cuenta este aspecto al diseñar elementos que deban soportar cargas aplicadas de manera súbita. Cuando la acumulación de energía de deformación es mayor que la que el material puede disipar, se producirá la fractura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barclift, M. W. (2012). Examining variability in the mechanical properties of parts manufactured via polyjet direct 3D printing. In International Solid Freeform Fabrication Symposium (pp. 6–8). Austin, Texas: University of Texas. Barclift, M. W., & Williams, C. B. (2012, August). Examining variability in the mechInternational Solid Freeform Fabrication Symposium (págs. pp. 6–8). Austin, Texas: University of Texas.
- Cárdenas Castrillón, Á. M. (2017). *Estudio del prototipado rápido como técnica aditiva con polímeros fotosensibles y su influencia en las propiedades de la pieza en la máquina STRASTASYS EDEN 260V*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.
- Chawla, K. K. (1999). *Mechanical behavior of materials*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Khosravani, M. R., & Zolfagharian, A. (2020). Fracture and load-carrying capacity of 3D-printed cracked components. *Extreme Mechanics Letters*, 37, 100692.
- Patpatiya, P., Chaudhary, K., Shastri, A., & Sharma, S. (2022). A review on polyjet 3D printing of polymers and multi-material structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 236(14), 7899–7926.
- Torrado, A. R. (2015). Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing. *Additive Manufacturing*. (Vol. 6).
- Velasco, M. A.-A. (2016). Geometric and mechanical properties evaluation of scaffolds for bone tissue applications designing by a reaction-diffusion models and manufactured with a material jetting system. *Journal of Computational Design and Engineering*, 3(4), 385–397.
- Xu, Y., Zhang, H., Šavija, B., Figueiredo, S. C., & Schlangen, E. (2019). *Deformation and fracture of 3D printed disordered lattice materials: Experiments and modeling*. *Materials & Design*, 162, 143–153.