



# Estereotomía digital para la fabricación de bóvedas de arista a escala

## Digital Stereotomy and additive manufacturing to groin vault fabrication in scale model

*Cruz-Ramírez, Luis Carlos<sup>1</sup>*

*Rivas-González, Gerardo Tomihuatzí<sup>2</sup>*

*Zárate-Martínez, Jorge Fernando<sup>3</sup>*

<sup>1,2,3</sup>Laboratorio de Patrimonio Arquitectónico, Escuela Superior de Ingeniería, Unidad Tecamachalco, Instituto Politécnico Nacional, México.

<sup>1</sup>[lcruzr@ipn.mx](mailto:lcruzr@ipn.mx) | <https://orcid.org/0000-0002-3651-4471>

<sup>2</sup>[rivas02gonzalez@gmail.com](mailto:rivas02gonzalez@gmail.com) | <https://orcid.org/0009-0005-4698-031X>

[abcenteringles@gmail.com](mailto:abcenteringles@gmail.com) | <https://orcid.org/0009-0001-3979-2477>

Recibido el 11 de Octubre del 2024, aprobado el 18 de Noviembre del 2024



**Resumen** | La técnica del corte de la piedra en piezas para la construcción se conoce como estereotomía. Este método de construcción fue desarrollado y perfeccionado durante siglos. Ha sido registrado en algunos tratados de construcción, tales como los de Philibert de l'Orme o Alonso de Vandelvira y funcionó para el desarrollo de la geometría descriptiva. Hoy forma parte de la construcción arquitectónica tradicional de fábricas de cantería y su aplicación en gran medida se limita a la intervención de monumentos. No obstante, la estereotomía es una técnica que continúa siendo desafiante por la dificultad práctica. Desde hace un par de décadas, ha recuperado interés nuevamente en la investigación en arquitectura con la implementación de técnicas digitales como el CAD-CAM, para convertirse en lo que hoy se conoce como *estereotomía digital*. El objetivo en esta investigación fue identificar como modelar y fabricar por medios digitales una bóveda de arista a escala reducida utilizando procesos de manufactura aditiva de bajo costo. Para cumplir este objetivo, primero se modeló digitalmente una bóveda de arista, pasando su despiece digital desde software CAD, y luego, ejecutando un plan de manufactura digital. Para la manufactura, se utilizó un método aditivo, por medio del Modelado por Deposición Fundida (FDM) con filamento de ácido poliláctico (PLA). Este estudio es de utilidad para comprender un tipo de construcciones con una cantidad representativa de ejemplares y tiene aplicación en la construcción arquitectónica contemporánea.

**Palabras clave** | Bóvedas, Cantería, Digitalización, Estereotomía, Impresión-3D, Manufactura-aditiva.

**Abstract** | The technique of cutting stone into pieces for construction is known as stereotomy. This construction method was developed and perfected over centuries. It has been recorded in some construction treatises, such as those by Philibert de l'Orme or Alonso de Vandelvira, and contributed to the development of descriptive geometry. Today, it is part of traditional architectural construction using stone-cutting, and its application is largely limited to monument restoration. However, stereotomy remains a challenging technique due to its practical difficulty. For the past couple of decades, it has regained interest in architectural research with the implementation of

digital techniques such as CAD-CAM, evolving into what is now known as digital stereotomy. The aim of this research was to identify how to digitally model and fabricate a scaled groin vault using low-cost additive manufacturing processes. To achieve this goal, a groin vault was first digitally modeled, transferring its digital breakdown from CAD software, and then executing a digital manufacturing plan. For manufacturing, an additive method was used through Fused Deposition Modeling (FDM) with polylactic acid (PLA) filament. This study is useful for understanding a type of construction with a representative number of examples and has applications in contemporary architectural construction.

**Keywords** | Additive-manufacturing, Digitalization, 3D-Print, Stone-cutting, Stereotomy, Vaults.

## Introducción

El objetivo en esta investigación fue identificar las técnicas de modelado, despiece y fabricación de una bóveda de arista a escala reducida por medios digitales, utilizando procesos de manufactura aditiva de bajo costo, para posteriormente comprender los procesos constructivos. Esta investigación tiene su origen en la comprensión del fenómeno de la construcción con piedra de cantería. Parte de la observación de construcciones patrimoniales con fábricas de piedras. Llama la atención como diferentes trozos de piedras han sido tallados y labrados manualmente, con formas adecuadas para ser mampuestos, formando sistemas integrados para la construcción de arcos, bóvedas y cúpulas.

El fenómeno asociado con cortes de piezas de piedra para usarlas en la construcción es conocido en nuestros días en la disciplina de la arquitectura como estereotomía. Esta es una técnica que ha sido desarrollada y perfeccionada durante siglos (Rippmann y Block, 2011). El corte de la piedra tiene antecedentes que pueden rastrearse hasta la Grecia antigua o a las construcciones prehispánicas en Mesoamérica y Sudamérica, luego fue utilizada en la edad media, perfeccionada en el Renacimiento (Galletti, 2017, p. 74; Sanabria, 1989, pp. 266-267) e implementada en América en las construcciones de los Virreinos y las Capitanías. Esta técnica fue registrada en algunos tratados de construcción -tales como los de Philibert de l'Orme (1544-1570) (de l'Orme, 1567), Alonso de Vandevira (1544-1625) y Amédée-François Frézier (1682-1773)- y practicada entre canteros, lo que ha permitido entender dicha técnica en la actualidad.

En nuestros días, la ejecución de estas técnicas resulta un tanto compleja de comprender, debido a que la construcción con piedra suele ser menos común que en siglos pasados y por la dificultad que significa seguir los procesos de proyección geométrica-constructiva (Fallacara and Gadaleta, 2021, p. 1330), con el cual lograr el tallado y el despiece de las formas curvas de un material sólido como la piedra, para lo que se requiere destreza en la cantería.

El uso de la técnica de la estereotomía se puede considerar en el presente fuera de los intereses de la construcción moderna y limitado a las prácticas de intervención de edificios. Esto debido a que la construcción con mampostería de piedra regular se ha reducida considerablemente por la existencia de otros materiales y sistemas constructivos<sup>1</sup> (Valera y Sousa, 2016, p. 428). La estereotomía forma parte de los principios para la construcción arquitectónica de mamposterías de piedra compuesta de piezas regulares, conocimientos que son de utilidad en la reproducción de



piezas – tales como sillares, dovelas o plementos regulares-, que a su vez son necesarias en la intervención del patrimonio edificado.

A nivel académico, aunque la técnica de la estereotomía se enseña en algunas escuelas de arquitectura –como en la Universidad Politécnica de Madrid–, no es tan común en las Universidades. Entonces, ¿Qué alternativas existen en el presente para comprender la construcción de bóvedas de mamposterías? Desde hace un par de décadas, la estereotomía ha sido adaptada a las tendencias digitales. El diseño digital con el CAD (Computer-Aided Design) y la materialización física –construcción– con la CAM (Computer-Aided Manufacturing) son dos áreas de las ciencias computacionales aplicadas que llevan décadas de existencia y han permitido llevar la estereotomía de métodos tradicionales a métodos contemporáneos digitales, facilitando el proceso constructivo y permitiendo obtener formas más complejas (Cavaliere y Graziano, 2024, p. 416). Esta adaptación contemporánea de la *estereotomía tradicional*<sup>2</sup>, pero ahora con el uso de técnicas digitales-computacionales CAD-CAM, es conocido como *Estereotomía 2.0* (E2.0) o *Estereotomía Digital* (ED) (Fallacara y Gadaleta, 2021, p. 1330).

Estudios elaborados desde la década del 2010, -tales como el número de la revista Nexus Network Journal dedicado a la Estereotomía 2.0 (Fallacara & Barberio, 2018a) y otros aplicados al estudio del patrimonio –Neumüller et al. (2014) – la intervención como el de Millán-Millán et al. (2023)- muestran un reciente interés en la exploración de métodos digitales en la construcción de formas abovedadas, con el uso de técnicas emergentes de CAD-CAM aplicados a la arquitectura, dentro de la ED (Fernando et al., 2015). En la literatura actual, se pueden encontrar resultados de proyectos concretos construidos, tanto a escala reducida (Gadaleta, 2018) como a escala real (Cavaliere y Graziano, 2024; Fallacara y Gadaleta, 2021). No obstante, los métodos aplicados en la ED continúan siendo experimentales (Rippmann & Block, 2011), dichos proyectos experimentales suelen ser realizados con robots de alta tecnología que tienen un costo económico considerable (Bidgoli y Cardoso-Llach, 2015; Kontovourkis et al., 2020) difícil de replicar en Latinoamérica y no abordan con suficiente detalle los procesos internos para clarificar su reproducción, especialmente siguiendo una ruta de trabajo en la que se pueda aplicar una estrategia de bajo-costos. Por lo anterior, la pregunta que se plantea en esta investigación es ¿Cómo fabricar digitalmente una bóveda a escala reducida utilizando procesos de manufactura aditiva de bajo costo para comprender los procesos constructivos?

Basado en el contexto antes mencionado, en este estudio se plantea demostrar que esto se puede ejecutar utilizando aplicaciones CAD de licencias educativas –o en software libre–, en conjunto con la implementación de impresoras 3D –aprovechando el hecho que en la última década se han popularizado y han bajado su costo– y tomando como casos de estudio modelos existentes en textos de historia de la arquitectura. En este documento se explica el proceso de como fabricar digitalmente una bóveda de arista a escala reducida siguiendo el proceso de manufactura aditiva por Modelado por Deposición Fundida (FDM) –impresoras 3D de filamento– utilizando como material filamento de Ácido Poliláctico (Polylactic Acid PLA). Para esto, en la sección 2, se contextualiza la relación entre la estereotomía de la cantería clásica con la ED. Posteriormente, se presenta en la sección 3, el método en el que se describe el conjunto de procedimientos a seguir



para poder fabricar digitalmente una bóveda escala. En la sección 4, se muestran los resultados y detalles del experimento realizado. Finalmente, se la sección 5 se comentan algunas implicaciones y experiencias del proceso realizado.

## Desarrollo

### *Estereotomía: de las técnicas tradicionales a la digitalización*

La estereotomía se define como la técnica necesaria para realizar el corte de sólidos en piezas -de piedra o de madera-. Etimológicamente significa *cortar sólidos* (del griego “*stereós*” -sólidos- y “*tomé*” -corte-) y puede ser rastreado hasta documentos sobre arquitectura y construcción durante el Renacimiento. Hoy se conoce que el término “*Stéréotomie*” fue inicialmente utilizado por Jacques Curabelle (1585-16), en 1644 (Fallacara, 2006).

Desde el surgimiento del término estereotomía, este ha sido aplicado al corte y ensamble de la piedra y la madera (Sakarovitch, 2003, p. 69), dos de los materiales sólidos tradicionalmente utilizados en la construcción en el pasado (Fallacara, 2006; Valera y Sousa, 2016). No obstante, el uso del término comúnmente es aplicado al trazo y al corte de la piedra, tal como era descrito en diccionarios clásicos como el de D’Aviler (1691), que define la estereotomía como “el arte de trazar formas sobre la piedra para su futuro ensamble” (Sakarovitch, 2003, p. 69). Es particularmente utilizada para referirse al corte de la piedra como un arte, para la construcción de estructuras de cubiertas abovedadas (Galletti, 2017, p. 73). En el presente, puede interpretarse como el arte y una técnica de construir con piezas que han sido creadas usando técnicas geométricas (Fallacara and Gadaleta, 2021). Esto incluye la estereotomía tradicional y la estereotomía digital (ED).

### *Estereotomía tradicional*

La estereotomía tradicionalmente se desarrollaba en etapas -lo que, en este documento para fines descriptivo, se limita a tres etapas-. En una primera etapa, de diseño geométrico, se realizaban los trazos sobre plantillas de papel o de cartón, donde se marcaba la forma de las dovelas (Calvo-López, 2002, p. 337; Calvo, 2002). Posteriormente, una vez que se tenían las proyecciones ortogonales, estas se pegaban sobre superficies sólidas de material (Rippman y Block, 2011). Finalmente, para darle forma a las superficies curvas se labraba la pieza (Calvo-López, 2002, p. 337).

En el presente este proceso nos parece complicado por lo difícil que puede ser cortar la piedra y detallar las piezas. No obstante, la complejidad geométrica de la estereotomía de la piedra es desmitificada por Rabasa (2013, p. 6), por algunas razones que se enuncian a continuación. El corte de la piedra no fue una técnica precisa, porque inicialmente no estaba sustentada en la geometría euclidiana, ya que los textos de Euclides se desarrollaron los teoremas de manera abstracta, algo que no resultaba útil para los canteros (p. 9). Esto se sustenta, por ejemplo, en los comentarios de L’Orme, quien considera en la práctica poco útil la teoría de Euclides (p. 16). Tampoco fue una técnica inicialmente sustentada en la geometría descriptiva. Gaspar Monge (1746-1818) no desarrolló la geometría descriptiva hasta 1798. La geometría descriptiva se desarrolló para explicar problemas de la estereotomía (Calvo, 2002; Rabasa, 2013; Galletti, 2017).



En este trabajo estableció la forma “correcta” para hacer un despiece de estereotomía, basado en (a) la ortogonalidad de las caras y que la talla debía ser fácilmente comprobable (Rabasa, 2013, p. 15). Uno de los textos más relevantes que trata los problemas de estereotomía fue el de Phillibert de l’Orme en 1567 (de l’Orme, 1567). Calvo (2002) describe la geometría descriptiva como una ciencia que “nació entre la polvareda de las lonjas de los canteros” (p. 337). Los procesos geométricos descritos en los tratados no siempre resultaban ser los procesos más eficientes (Rabasa, 2013). Tal es el caso de Amédée-François Frézier (1682-1773), donde se desarrolla la teoría geométrica, en los que se profundiza de manera abstracta las operaciones, que suelen resultar en procesos complicados (Rabasa, 2013, p. 9).

### *Estereotomía digital (ED)*

La ED o E2.0 ha sido definida por Fallacara (2018a) como una disciplina que surge en el año 2000, que combina el CAD con el CAM. La ED hace uso de herramientas de diseño digital - incluyendo el diseño digital avanzado como es el diseño paramétrico en Rhinoceros y Grasshopper- y herramientas de fabricación digital que incluye instrumentos CNC, impresoras 3D y Robots (Cavaliere & Graziano, 2024; Fallacara & Gadaleta, 2021; Kontovourkis y otros, 2020). A diferencia de la estereotomía tradicional, la ED pasa de los modelos simplificados al uso de modelos geométricos precisos y complejos, que a su vez puede ser simplificado con el uso de técnicas de diseño computacional (Fallacara, 2017).

La ED se basa en tres principios: (a) el principio técnico-geométrico, (b) el principio prefigurativo y (c) el principio estático (Fallacara, 2006, p. 1078). El principio técnico-geométrico, que permite la definición de las formas de las piezas; el principio prefigurativo, que permite definir estas piezas como parte de un todo, por medio del corte de sus partes en secciones que en conjunto conforman un sistema constructivo y el principio estático, que permite definir su cualidad de permanecer en pie al ser construido (Fallacara, 2006, p. 1078; Fallacara y Gadaleta, 2021, p.1328). Estos principios también pueden ser enunciados como: (a) formal-geométrico, (b) divisible y (c) estable.

Como una variante contemporánea de la estereotomía tradicional, la ED hereda los principios descritos en siglos pasados, como es el caso de los primeros dos principios. Sobre la estabilidad, el tercer principio, existe una controversia. Por un lado, la estereotomía conceptualmente se limita al corte de la piedra para la construcción. La etapa de ensamble es el proceso constructivo, posterior al corte de la piedra, momento en el que la estabilidad es una propiedad necesaria porque de lo contrario colapsaría la construcción. La estabilidad como una dimensión de la estereotomía, fue incluida formalmente por Gournerie (1814-1883) en el siglo XIX, primero porque en Renacimiento el concepto no se había desarrollado por completo y luego fue tratada como una propiedad de la construcción y se describía por separado (Rabasa, 2013, p. 16). En la actualidad, la estabilidad se considera fundamental en el desarrollo de la ED, ya que la manufactura debe considerar proporcionar una solución estable (Galletti, 2017, p. 75; Cavaliere y Graziano, 2024).



### ***Diferencias entre la estereotomía tradicional y la estereotomía digital***

Mientras la estereotomía tradicional buscaba la aplicación de las soluciones sencillas y eficientes para la construcción de piezas sólidas, que eran ajustadas gradualmente en procesos de ensayo-error, la ED desarrolla soluciones geométricas precisas para la construcción de las piezas, basado en sólidos conceptos integrando el CAD-CAM para el diseño y construcción con exactitud (Fallacara y Gadaleta, 2021, p. 1330). Al respecto se puede añadir que la ED busca la simplificación del proceso por medio del uso de ordenadores (p. 1330).

En cuando a la proyección formal-geométrica, en el CAD, no se realizan proyección de las formas sobre plantillas. Las proyecciones bidimensionales son elaboradas en planos definidos con base en un Sistema de Coordenadas Universales (UCS), con la posibilidad de proyectar en los planos ortogonales XY, XZ, YZ o cualquier plano oblicuo que sea de interés. Cualquier dibujo elaborado en un plano, puede ser escalado, desplazado o rotado dentro del mismo plano o desplazado a otro plano. Además, el espacio modelo es infinito.

Luego de esto, el CAD al ser virtual, no se puede tallar ni labrar ninguna pieza sólida física, por lo que se usan una serie sucesiva de comandos y operaciones para crear y editar sólidos virtuales. El sólido digital base -analogía con la cantera- se puede obtener de diversas maneras<sup>3</sup> según el software de modelado, siendo la extrusión de secciones una de las maneras más comúnmente utilizada. Para modelar las piezas específicas, se utilizan las proyecciones bidimensionales mencionadas en el párrafo anterior, que pueden ser alineadas o colocadas sobre la superficie del sólido base digital. Posteriormente, se le da forma a las piezas por medio de herramientas de edición que consiste en realizar cortes o aplicar operaciones booleanas de modelado: unión, sustracción o intersección. Hasta esta parte se pueden tener el despiece virtual, pero para obtener las piezas físicas es necesario ahora llevar estos resultados a la manufactura digital.

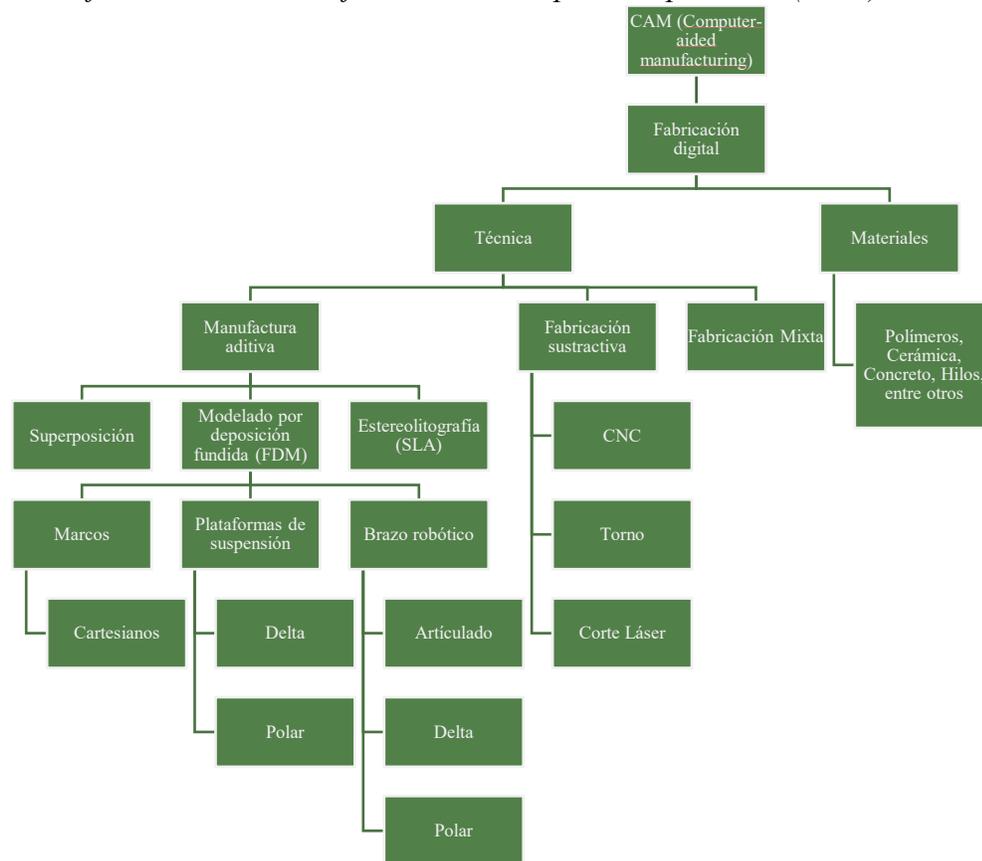
### ***Manufactura digital en la estereotomía digital***

La manufactura digital tiene diferentes formas de ejecutarse, proporcionando soluciones para diferentes tipos de problemas actualmente existente. Una forma simplificada de clasificarla es en aditiva, sustractiva o mixta (ver clasificación en Figura 1). Existen numerosas aplicaciones en arquitectura, entre las que se pueden mencionar el prototipado a escala de edificios, la enseñanza en arquitectura y construcción, así como la creación de replicas y modelos experimentales a escala (Žujović et al. 2022). El corte de la piedra es una técnica sustractiva, en la que se van quitando partes materiales para obtener así la pieza resultante. En este contexto, la analogía en manufactura digital es la fabricación sustractiva con CNC, que, aunque ha demostrado ser útil no siempre es la mejor solución (Varela y Souza, 2017). No obstante, la manufactura aditiva ha tenido excelentes resultados en la fabricación piezas, permitiendo la experimentación de materiales (Varela y Souza, 2017).



**Figura 1**

*Diagrama de la clasificación de la Manufactura Asistida por Computadora (CAM).*



*Nota.* Adaptado de *Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities* por N. Labonnote, A. Rønquist, B. Manum & P. Rüter (2016).

Basado en lo antes mencionado, el planteamiento realizar el modelo de una bóveda a escala reducida utilizando un software CAD de licencias educativas, en conjunto con la implementación de impresoras 3D de filamento, con PLA. Para lograr esto, las etapas a seguir serán el diseño de la forma geométrica con base a un modelo de referencia que se pueda identificar en la literatura. Posteriormente, se realizará el despiece siguiendo procedimientos de edición 3D. En cuanto al plan de fabricación, se seguirán recomendaciones según el material PLA indicadas en Tümer (2021), considerando la clasificación de las piezas para finalmente ensamblar el modelo y comprobar si efectivamente a quedado concluido.

**Método**

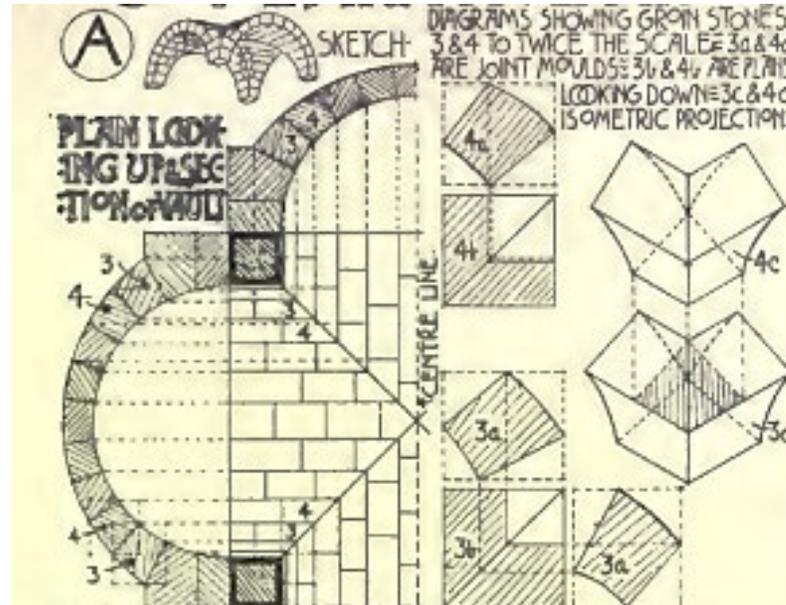
Para cumplir este objetivo, se partió del diseño digital de un modelo de una bóveda de arista a escala, pasando su despiece digital, y finalmente, un plan de fabricación digital de piezas 3D. Con base en los tres principios de la ED -(a) el principio técnico-geométrico, (b) el principio prefigurativo y (c) el principio estático- se definieron las variables de análisis en la forma geométrica, la subdivisión estrategia de fabricación y el equilibrio constructivo.



Para este experimento se utilizó una bóveda de arista. La bóveda de arista está formada por la intersección de dos bóvedas semicilíndricas con ejes perpendiculares. Se eligió la bóveda de arista porque tiene una forma relativamente simple: es un volumen simétrico en dos de sus ejes, lo que facilita el modelado y la fabricación de las piezas (dovelas), porque posee patrones que se repiten. De esta manera el modelado y la fabricación de piezas se reduce a un cuarto de la bóveda y poder explorar la manera eficiente de crear cada pieza.

## Figura 2

*Bóvedas renacentistas. Proyección en planta y en sección.*



*Nota.* Recuperado de *Comparative Diagrams of Vaults and Domes*, en Fletcher y Fletcher (1905).

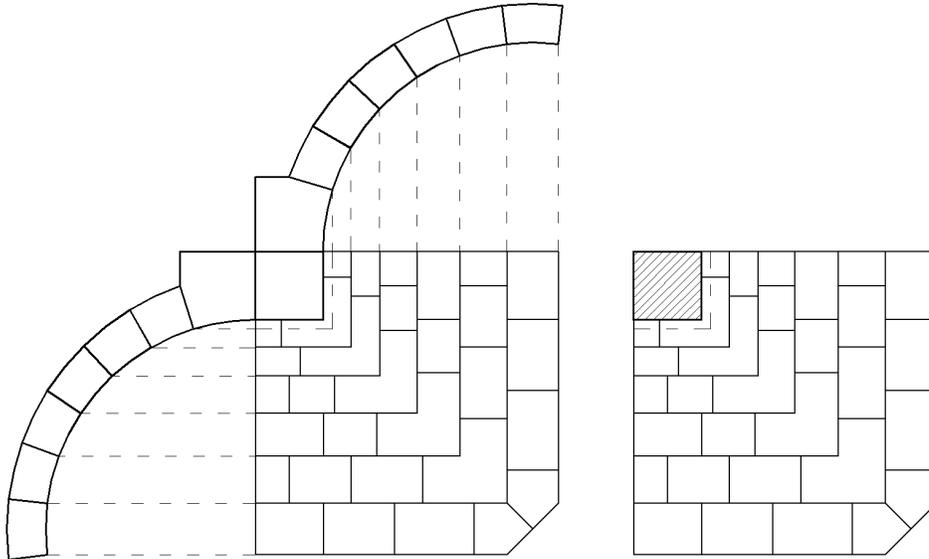
Para definir la forma geométrica se seleccionó el modelo de bóveda presentada en Fletcher y Fletcher (1905) (Figura 2). La bóveda se modeló a partir de dos cuartos de sección de uno de los arcos fajones y la mitad de la sección del arco formero y un cuarto de la proyección en planta (Figura 3). Con base en las secciones se proyectó de cada una de las piezas en planta (Figura 3). Con las proyecciones en secciones y la proyección en planta se pudo delimitar la forma de cada una de las piezas.

Posteriormente se separaron en los siguientes grupos para poderse manufacturar: (a) las cuatro bases, (b) cuatro sets de piezas que forman las claves que van desde el arco exterior hasta el centro de la bóveda, (c) cuatro sets de piezas de un cuarto de bóveda izquierda y (d) cuatro sets de piezas de un cuarto de bóveda derecha. Las piezas se enumeraron para facilitar el proceso de impresión. Con esta clasificación se procedió a establecer la estrategia de manufactura, pero antes se describen los materiales e instrumentos utilizados.



**Figura 3**

*Cuadrante de la planta sobre los que se proyectaron las dovelas desde las secciones.*



### *Materiales e instrumentos*

El material utilizado para el experimento fue filamento de PLA. Se eligió este material por las siguientes razones: el material puede ser fundido a menor temperatura en contraste con el ABS (Acrylonitrilo butadieno estireno -*Acrylonitrile Butadiene Styrene*-). Además, que el fundido del PLA no es tóxico como es ABS. Finalmente, porque el ABS también tiene implicaciones en los equipos, ya que requiere boquillas que soporten mayor temperatura, que no están incluidas en los instrumentos FDM que se utilizaron en este experimento. Las piezas fueron impresas con boquillas de latón de 4mm, las que ya traía ensambladas de fábrica. Se considerando los siguientes parámetros: Temperatura de la boquilla de 210 °C, temperatura de la cama 60°C, el relleno interior fue del 8%.

Se utilizaron dos equipos para la fabricación aditiva. Las primeras piezas de prueba y calibración fueron elaboradas con una Creality Ender-3 V2 Neo (Marlin firmware). Este equipo tiene una velocidad de impresión media de 50 mm/s. Las piezas del modelo final fueron fabricadas con una Creality Ender-3 V3 KE (Klipper Edition Firmware), el cual tiene una velocidad media de impresión de 300 mm/s (Figura 4).



## Figura 4

*Instrumentos utilizados para la manufactura aditiva.*



(a) Creality Ender-3 V2 Neo

(b) Creality Ender-3 V3 KE

*Nota.* A la izquierda el modelo Creality Ender-3 V2 Neo. A la derecha el modelo Creality Ender-3 V3 KE.

Entre los diferentes tipos de PLA. Para las pruebas se utilizó filamento PLA genérico y para las impresiones finales se optó por utilizar un filamento de la serie Hyper marca Creality con diámetro estándar de 1.75mm. El filamento genérico sirve para impresiones con velocidades hasta de 60 mm/s y el filamento Hyper es de alta velocidad, el cual permite imprimir a velocidades entre 30-600mm/s.

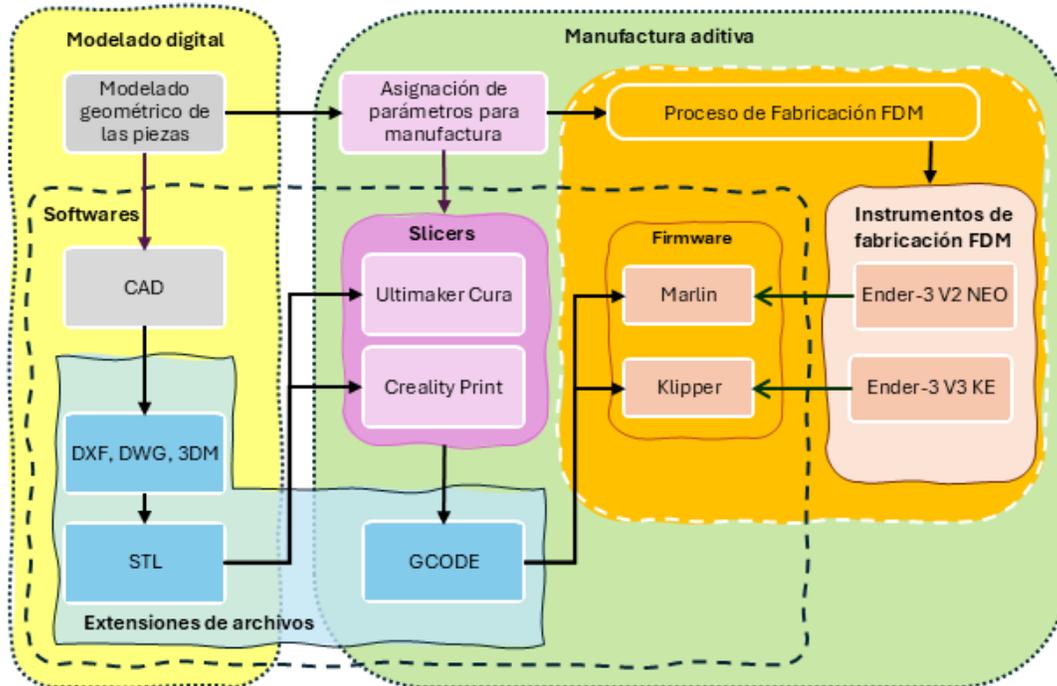
### ***Software y Workflow***

Para la modelación CAD, se utilizó el software Autodesk AutoCAD 2023 -version educativa- (Autodesk, 2022) para Windows. Luego se utilizaron dos softwares libres para hacer el laminado de las piezas - Slicer<sup>4</sup>:- Ultimaker Cura (Ultimaker, 2024) para las piezas impresas en la impresora Ender-3 V2 Neo y Creality Print (Creality, 2024) para la impresora Ender-3 V3 KE, en versiones para Windows 10 OS.

El flujo de trabajo consistió en modelar primero la bóveda y obtener el despiece geométrico de las partes en CAD. Esto se trabajó en formato DWG. Luego se exportó en formato STL para abrirlos en los programas Slicer antes mencionados. Una vez concluida la configuración del Slicer, se exportó en formato GCODE para ser impreso. Un diagrama del flujo de trabajo se ha incluido en la Figura 5.



**Figura 5**  
*Flujo de trabajo para el diseño y fabricación digital.*



Para verificar si estaba elaborado correctamente, una vez impresas las piezas, estas se armaron siguiendo la secuencia constructiva aplicada en la construcción de cubiertas de mampostería. Para construir el modelo, se clasificaron las piezas correspondientes a cada arco en secuencia de exterior a interior. En la siguiente sección se muestran los resultados.

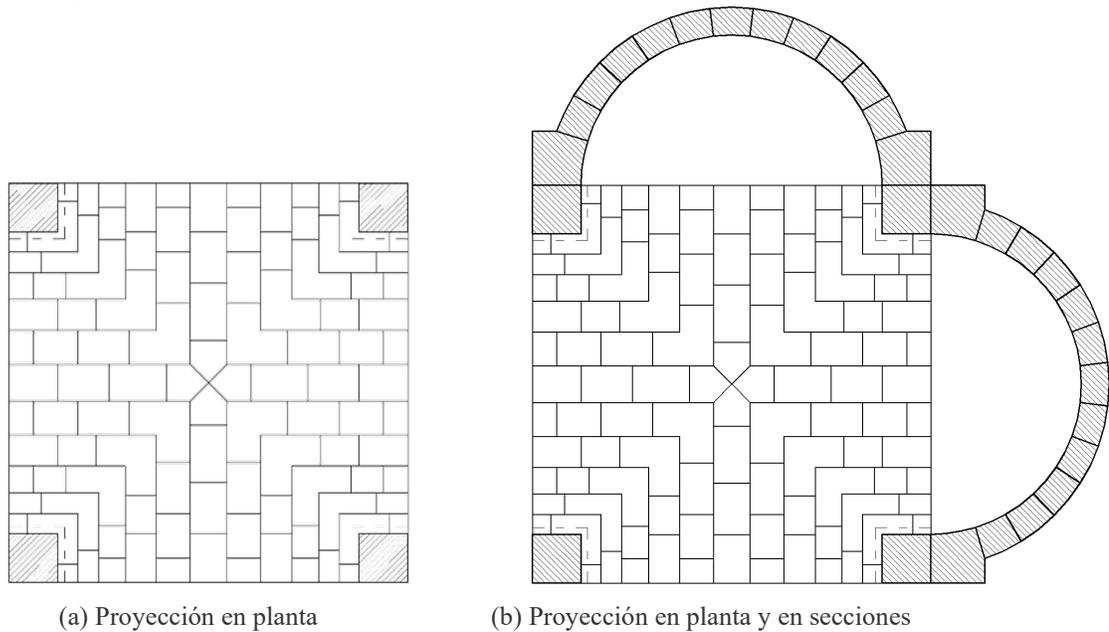
## Resultados

### *Modelado geométrico*

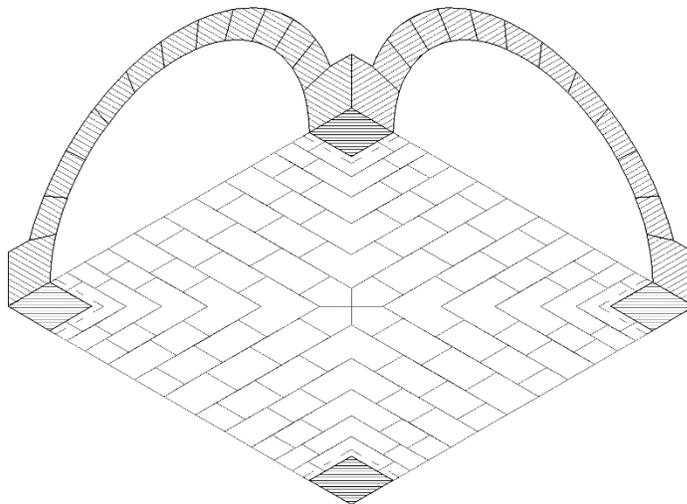
Como se mencionó en el método la forma determinada para este experimento fue la bóveda de arista con base en la proyección de Fletcher y Fletcher (1905). La planta y las dos secciones de la Figura 2, se dibujaron en CAD como polilíneas sobre el plano XY. La proyección en planta solo contiene la mitad de la proyección, sobre la cual se pudo inferir la planta completa. Se consideró como longitud del claro una distancia de 22.5cm y una altura de 11.3 cm. Se asignó una sección variante en el desarrollo de los arcos: siendo más delgado en la parte de la clave (2.15 cm) y más gruesos en las bases (3 cm) (Figura 6).



**Figura 6**  
*Proyecciones en planta y sección de bóveda de arista.*



**Figura 7**  
*Proyecciones alineadas en una visualización 3D.*



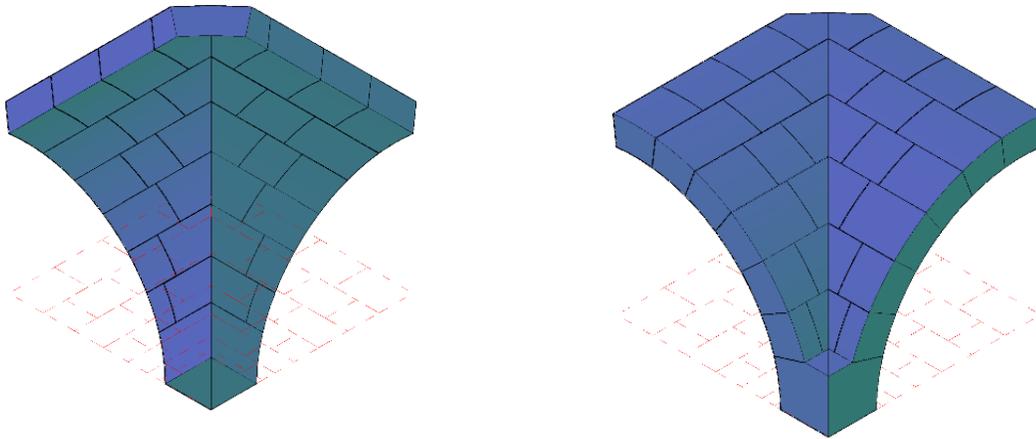
En el caso de las secciones, se detallaron cada una de las dovelas y claves de los arcos laterales. Con base en las secciones, se proyectaron cada una de las piezas en la planta, correspondientes a un cuarto de la bóveda -un cuadrante visto en planta- de tal manera que se pudiera representar los mampuestos. Una vez dibujadas las proyecciones, la planta se dejó en el plano XY y se procedió a colocar las secciones en los planos XZ y YZ (Figura 7).



Para la subdivisión del volumen para la generación de piezas, primero se procedió a extruir cada una de las dovelas dibujadas en el cuadrante de la sección con el comando “extrude”, con lo cual se formó el sólido base digital (Figura 8). Estas piezas luego fueron editadas por medio de la función de “Slice”. Con el cuadrante completo, se procedió luego a hacer el corte de cada una de las dovelas a partir de la proyección en planta. Las bases requirieron de la ejecución de operaciones booleanas y de extracción de caras para ajustar el modelo a la forma deseada (Figura 9). Para finalizar, se modeló, un rectángulo que luego fue extruido con la sustracción de piezas de las bases para poder utilizarla como superficie de soporte, para evitar que se desplazaran las bases (Figura 10).

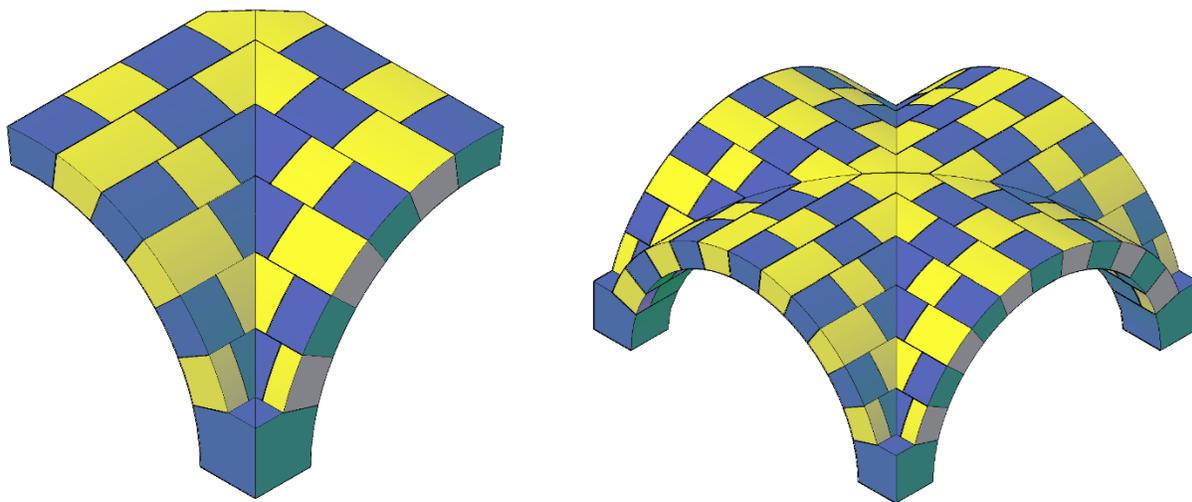
**Figura 8**

*Extrusión preliminar del cuadrante de la bóveda.*



**Figura 9**

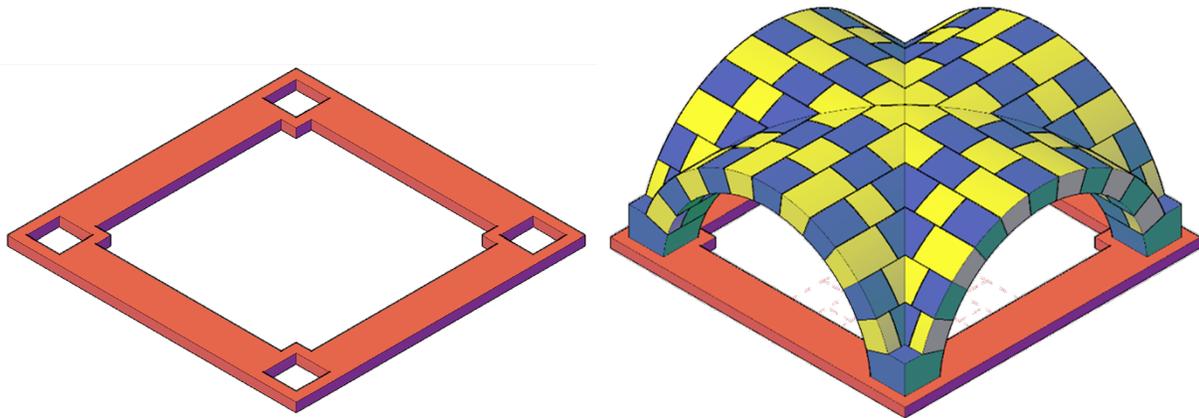
*Visualización de la bóveda*



*Nota.* A la izquierda, el cuarto de bóveda modelada. A la derecha visualización completa con todas sus piezas cortadas y ensambladas en modelo digital. Los colores alternados se colocaron para enfatizar las diferentes piezas.



**Figura 10**  
*Marco para fijar las cuatro bases.*

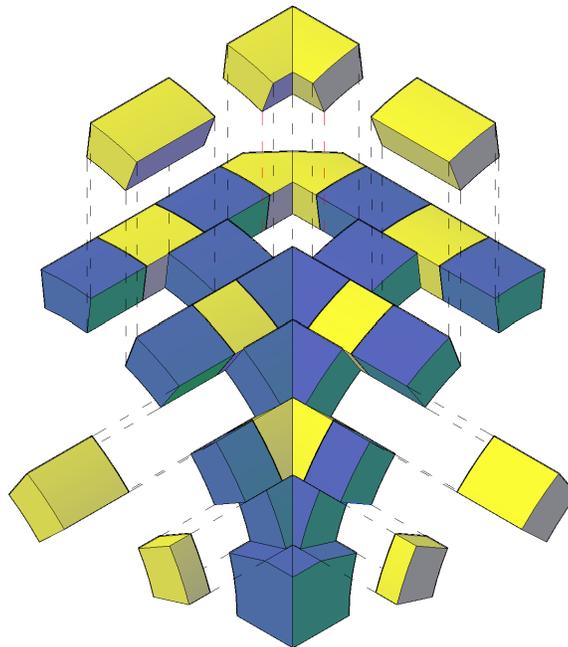


*Nota.* A la izquierda, se presenta el marco de la base. A la derecha se presenta el ensamble del marco sobre la bóveda.

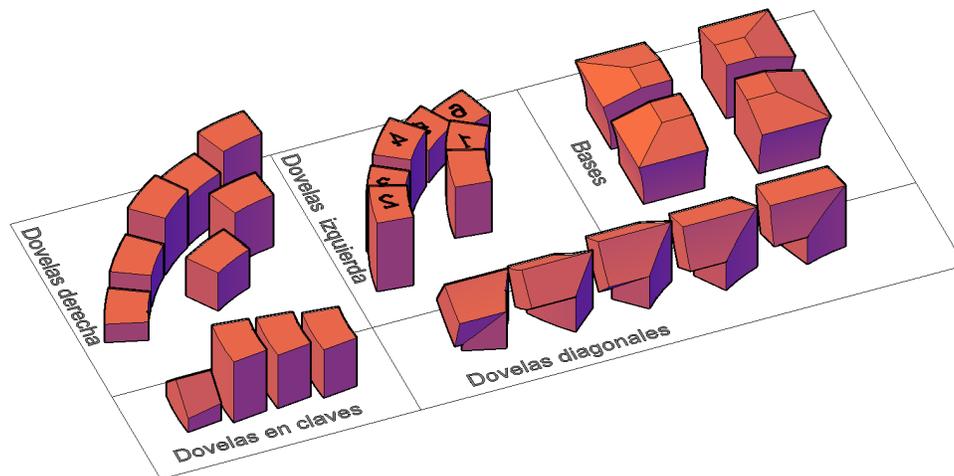
### ***Despiece CAD y clasificación de las piezas***

El proceso de despiece se logró por medio de la aplicación del comando “Move” de cada pieza editadas, que fue primeramente modelada por extrusión. En la Figura 11 se muestra una ilustración del proceso de despiece. A partir del cuarto de bóveda, las piezas se clasificaron en 4 grupos: Bases (1 pieza), claves (4 piezas), arco de la artista (4 piezas), octavo izquierdo (6 piezas) y octavo derecho (6 piezas). Cada uno de estos grupos se presentan en la Figura 12. Estas piezas fueron colocados a nivel  $Z=0$ , con el fin de que dotas estuvieran alineadas a la base, ya que para el proceso de manufactura se requieren que las piezas estén a nivel de la cama de extrusión.

**Figura 11**  
*Proceso de despiece del cuarto de bóveda.*



**Figura 12**  
*Despiece del cuarto de bóveda.*



**Modelado por deposición fundida (FDM)**

Las piezas se imprimieron por cuartos de bóveda (Figura 13). La velocidad promedio ajustada en el Slicer fue de 300mm/s. Cada cuarto demoró cerca de las 6 horas con 40 minutos. En total se imprimieron 60 piezas que se describen en la Tabla 1 (Figura 14). En la aplicación Slicer, se ajustó la impresión con soportes tipo árbol para poder soportar piezas que por su irregularidad tenían lados en voladizo, con ángulos superiores a los 45°. Otra estrategia utilizada fue bajar la velocidad de impresión hasta el 40% mientras se realizaban las capas base (4 capas) y posteriormente aumentar la velocidad de impresión una vez que terminaba las capas de la base, subiendo 125%. En total el proceso demoró cerca de 26 horas impresas en dos días.

**Figura 13**  
*Proceso de manufactura de las piezas de las bóvedas por FDM.*



**Tabla 1**

*Descripción de las piezas fabricadas.*

<b>Tipos de piezas</b>	<b>Total</b>
Bases	04
Claves	16
Dovelas	28
Arcos diagonales	25
Marco base	01
<b>Total</b>	<b>74</b>

**Figura 14**

*Piezas fabricadas digitalmente por FDM con PLA.*



### ***Experimentación de ensamble***

El primer experimento de ensamble se realizó al concluir el primer cuarto de la bóveda. Se juntaron las piezas y se colocaron de tal manera que se pudiese verificar que el proceso de manufactura era el correcto y que efectivamente las piezas tenían las dimensiones correctas.

Una vez que se tenían todas las piezas, se organizaron para ir conformando cada uno de los arcos externos e internos, así como las piezas que conformaban los arcos diagonales. Se ensambló sosteniendo las piezas con cinta adhesiva ya que no construyó una cimbra para sostener las piezas. Se ensambló desde el exterior hacia el interior hasta llegar a las claves centrales de la bóveda (Figura 15). En la Figura 16 se muestra el resultado final.



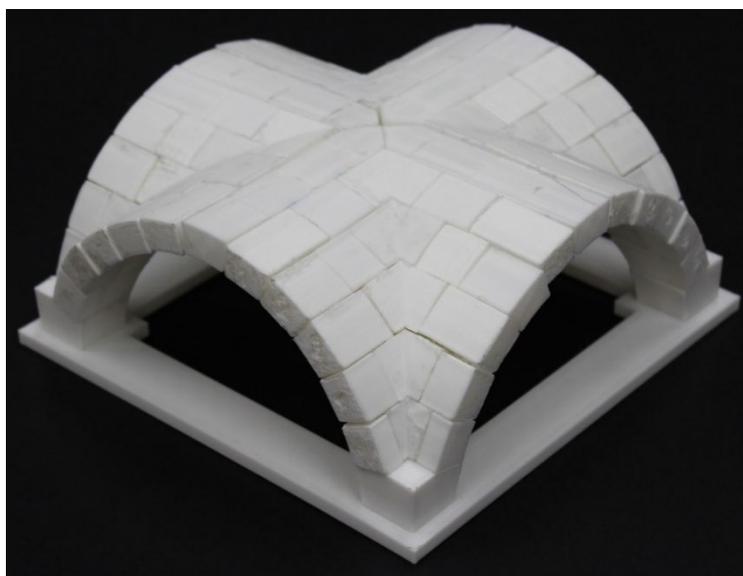
**Figura 15**

*Conformación de arcos laterales de la bóveda de arista.*



**Figura 16**

*Bóveda de arista ensamblada.*



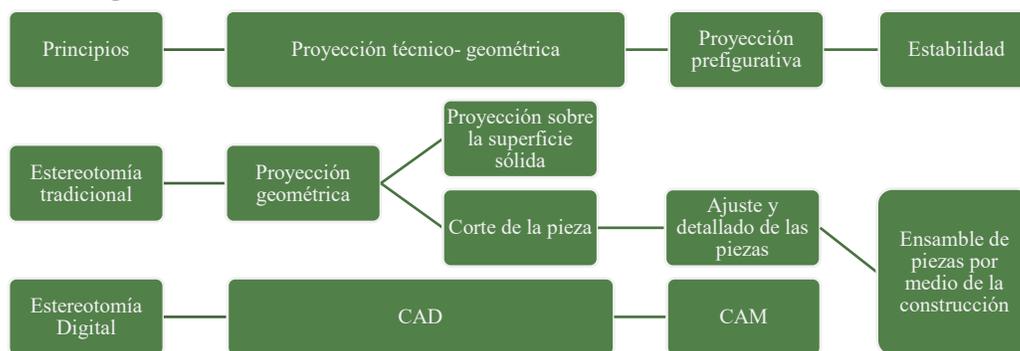
## Conclusiones

El alcance de esta investigación fue explorar los procesos constructivos. Con este experimento, se logró crear el modelo de la bóveda a escala fabricada digitalmente combinando las técnicas de CAD-CAM. Fue posible identificar parámetros básicos para poder materializar con el uso de impresoras 3D los modelos creados en CAD. Aunque se trató de un modelo bastante sencillo, fue útil para experimentar el proceso de despiece y fabricación aditiva. Finalmente, se logró obtener un modelo de la bóveda de arista construida a escala de bóveda siguiendo procesos de manufactura de bajo costo, con el cual experimentar el proceso constructivo. Se logró identificar la geometría, modelarla en piezas y posteriormente fabricarlas con estrategias de manufactura digital.

Se creó un diagrama comparativo entre los principios y los procesos en la estereotomía tradicional y la estereotomía digital en la Figura 17.

**Figura 17**

*Diagrama comparativo entre los principios y los procesos en la estereotomía tradicional y la estereotomía digital.*



La estereotomía digital continúa siendo desafiante porque requiere de destreza para su puesta en práctica. La estereotomía digital a escala reducida requiere de mucha precisión, debido a que una ligera variación en las dimensiones tiene implicaciones en la relación forma-geometría que a escala reducida es visible.

Durante este estudio se logró conocer como la técnica de la estereotomía y las variables de análisis. La revisión de literatura sirvió para conocer estos detalles sobre la técnica, desde el desarrollo en el tiempo, así como creencias que existen sobre la ejecución práctica de la misma. También sirvió para establecer una analogía que explicara las similitudes y diferencias.

En cuanto a la modelación CAD, el objetivo fue utilizar software educativo en la modelación. Aunque no es la única alternativa, este se puede considerar la herramienta viable siempre que se cuente se tenga acceso a nivel de instituciones educativas. Otras alternativas viables son Rhinoceros, especialmente con el uso de modelado paramétrico desde Grasshopper, que además permite explorar la modelación compleja desde la modelación algorítmica. El uso del modelado paramétrico como Grasshopper, hubiese sido intuitivo en términos de descripción de procesos paso a paso a nivel algorítmico. También hubiese permitido establecer por medio de parámetros la subdivisión de las dovelas de los arcos útil en los procesos de re-escalado.



Sobre el proceso de modelado se puede comentar que, la proyección bidimensional y tridimensional es muy sencilla de realizar. Claro está que, se requieren conocimiento de modelación y edición 3D, así como de proyecciones geométricas. Quizás el desafío esté asociado con la estrategia a seguir para crear cada una de las piezas, sobre todo si los modelos son más complejos. Para esto la solución está en analizar las piezas a crear y establecer el proceso a seguir. Aunque la modelación paramétrica no se aborda en este estudio, ya que uno de los objetivos fue usar software educativo, es en este paso, es donde la modelación paramétrica es más eficiente debido a que estos pasos a seguir conforman el algoritmo de diseño.

Entre las experiencias adquiridas en este experimento se puede comentar que es necesario tener presente las escalas de dibujo, ya que el paso del software CAD al Slicer requiere procesos de rescalado, ya que el Slicer presenta dimensiones en cm. Es importante que el despiece se realice de manera estructurada, porque con más piezas es posible confundirlas. Además, algo que resultó ser útil fue clasificar y enumerar, ya que al tenerlas impresas esto facilita el proceso de armado. Es necesario colocar las piezas con una de las caras planas sobre la base para poder facilitar el proceso de fabricación digital y reducir las superficies de soporte. Debido a que el comando Slice se aplica de manera perpendicular al plano, fue necesario en ocasiones hacer cambios de UCS para realizar el proceso.

Cada instrumento FDM tiene sus potencialidades y debilidades, es necesario conocerlos para poder identificar los problemas comunes y solucionarlos. Durante todo el proceso de fabricación aditiva se utilizaron tipos de filamento tipo PLA y PETG de diferentes marcas. Los parámetros de impresión van a depender del filamento, por lo que es necesario verificar las características de estos, hacer experimentos previos y realizar los ajustes requeridos. Aunque aparentemente las piezas no requerían estructura de soporte, durante el proceso de impresión fallaron las piezas con geometrías más irregulares, las cuales se tuvieron que imprimir en más de dos ocasiones.

El proceso de fabricación fue realizado en dos impresoras, principalmente para mejorar los tiempos de impresión. El cambio de modelo de impresora permitió reducir los tiempos de fabricación de manera considerablemente, pasando de 30mm/s a 300mm/s. Las condiciones ambientales tienen efecto en el proceso de fabricación. Si existe un alto contenido de humedad en el ambiente, el resultado tendrá muchos hilos de filamento suelto, problema que es conocido como retracción. Aumentar la temperatura de la cama de la cama puede tener implicaciones en que las piezas se deformen. La fabricación por FDM utiliza filamento que suele ser bastante ligero, lo que dificulta el proceso de armado. Una solución es aumentar el filamento de relleno, pero esto aumenta los tiempos de impresión.

Debido a que las piezas fueron fabricadas considerando reducir los tiempos de impresión, estas eran ligeras, al momento de armar sobre una superficie de soporte esas caían con el menor movimiento de la superficie de cimbra. Se recomienda considerar una estructura de soporte ya que es más intuitivo y práctico. Finalmente, para poderla ensamblar se tuvo que hacer uso de cinta adhesiva por la ligereza de las piezas.



Entre los experimentos que se pueden derivar, en cuanto a formas constructivas históricas se pueden mencionar la fabricación de bóvedas vaídas con hiladas verticales o hiladas cuadradas. Llama la atención los modelos de hiladas helicoidales, lo que puede representar un reto de modelado y construcción. Con las bases plantadas en este estudio, es posible explorar la fabricación de fachadas de edificios históricos, así como estructura de retablos de madera. También será necesario explorar la reproducción de casos reales a escala reducida. En cuanto a las formas complejas, la modelación en Grasshopper y optimización de secciones es una de las áreas de mayor interés en el presente, por la variedad de soluciones que se pueden lograr, optimizando por forma el diseño de las secciones.

## Agradecimientos

Este artículo fue realizado gracias al apoyo del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Fue elaborado en el marco del proyecto de investigación IPN SAPPI 2024 con registro SIP 20241224. Agradecimientos a los colaboradores del laboratorio que contribuyeron en algún proceso de los experimentos realizados: Sara Abigail Suárez-López, Adal Robles-Esquivel, Miguel Antonio Rosas-Mendoza, Luis Eduardo Delgado-Hernández, Diana Monserrat Veloz-García, Valeria Meneses-Rosales, Emilio Anaya-Arévalo, Jorge Fernando Zárate-Martínez y Susan Palos-Díaz.

## Bibliografía

- Autodesk, Inc. (2022). Autodesk AutoCAD 2023 Educational version [Computer software].  
Obtenido de <https://www.autodesk.com/education/edu-software/overview>
- Calvo López, J. (2002). Superficies regladas desarrollables y alabeadas en los manuscritos españoles de cantería. *IX Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica. Re-visión: Enfoques en docencia e investigación*, (págs. 337-342).
- Cavaliere, I., & Graziano, A. V. (2024). 3d Printing Stereotomy: Two Case Studies. En S. Gabriele, A. M. Bertetto, F. Marmo, & A. Micheletti (Edits.), *Shell and Spatial Structures* (Vol. 437, págs. 416-426). Cham: Springer Nature Switzerland.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-44328-2\\_43](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-44328-2_43)
- Creality. (2024). Creality Print (5.1.4) (Computer Software). Obtenido de <https://www.creality.com/pages/download-software>
- D'Aviler, A.-C. (1691). *Explication Des Termes D'architecture*. Paris: Langlois.
- de l'Orme, P. (1567). *Le premier tome de l'architecture*. Paris. Obtenido de <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k85636g>
- Fallacara, G. (2006). Digital stereotomy and topological transformations: reasoning about shape building. *In Proceedings of the second international congress on construction history*,



- (págs. 1075-1092). Obtenido de <https://www.arct.cam.ac.uk/system/files/documents/vol-1-1075-1092-fallacara.pdf>
- Fallacara, G., & Barberio, M. (2018a). Stereotomy 2.0: The Rebirth of a Discipline that Never Died. *Nexus Network Journal*, 20(3), 509-514. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00004-018-0408-6>
- Fallacara, G., & Gadaleta, R. (2021). Stereotomy: Architecture and Mathematics. En B. Sriraman (Ed.), *Handbook of the Mathematics of the Arts and Sciences* (págs. 1325-1344). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-57072-3\\_85](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-57072-3_85)
- Fernando, S., Saunders, R., & Weir, S. (2015). Surveying stereotomy: Investigations in arches, vaults and digital stone masonry. *Proceedings of the ARCC 2015 Conference* (págs. 82-89). Perkins+Will; Architectural Research enters Consortium.
- Fletcher, B., & Fletcher, B. F. (1905). Romanesque Vaulting. Craftsman and Amateur. En B. Fletcher, & B. F. Fletcher, *A history of architecture on the comparative method*. (5th Edition ed., pág. 284). London: B. T. Batsford.
- Gadaleta, R. (2018). New stereotomic bond for the dome in stone architecture. *Nexus Network Journal*, 20, 707–722.
- Galletti, S. (2017). Stereotomy and the Mediterranean: Notes Toward an Architectural History. *Mediterranea. International Journal on the Transfer of Knowledge*, 2, 73-120. <https://doi.org/https://doi.org/10.21071/mijtk.v0i2.6716>
- Kontovourkis, O., Tryfonos, G., & Georgiou, C. (2020). Robotic additive manufacturing (RAM) with clay using topology optimization principles for toolpath planning: The example of a building element. *Architectural Science Review*, 63(2), 105-118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/00038628.2019.1620170>
- Labonnote, N., Rønquist, A., Manum, B., & Rütger, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72(347-366). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>
- Millán-Millán, P. M., Chacón-Carretón, C., & Castela González, C. (2023). The process of digital fabrication and 3D printing as a tool in the study of heritage pathologies: Carcabuey Castle (Cordoba). *Virtual Archaeology Review*, 14(28), 81-94. <https://doi.org/https://doi.org/10.4995/var.2023.18213>



- Neumüller, M., Reichinger, A., Rist, F., & Kern, C. (2014). 3D Printing for Cultural Heritage: Preservation, Accessibility, Research. En M. Ioannides, & E. Quak, *3D Research Challenges in Cultural Heritage* (págs. 119-134). Springer.
- Rabasa, E. (2013). Estereotomía: Teoría y práctica, justificación y alarde. *Informes de la Construcción*, 65((Extra-2)), 5-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.3989/ic.13.014>
- Rippmann, M., & Block, P. (2011). Digital Stereotomy: Voussoir geometry for freeform masonry-like vaults informed by structural and fabrication constraints. *Conference: Proceedings of the IABSE-IASS Symposium 2011*. London.
- Sakarovitch, J. (2003). Sterotomy, a multifaceted techniques. *Proceedings of the First International Congress on Construction History* (págs. 69-79). Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, ETSAM.
- Sanabria, S. L. (1989). From Gothic to Renaissance Stereotomy: The Design Methods of Philibert de l'Orme and Alonso de Vandelvira. *Technology and Culture*, 30(2), 266-299. <https://doi.org/https://doi.org/10.1353/tech.1989.0092>
- Tümer, E. H., & Erbil, H. Y. (2021). Extrusion-Based 3D Printing Applications of PLA Composites: A Review. *Coating*, 11(390). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/coatings11040390>
- Ultimaker. (2024). Cura (5.6) [Computer software]. Obtenido de <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/>
- Varela, P. D., & Sousa, J. P. (2017). Fabricating Stereotomy. *ACAADe 35*. Rome.
- Žujović, M., Obradović, R., Rakonjac, I., & Milošević, J. (2022). 3D Printing Technologies in Architectural Design and Construction: A Systematic Literature Review. *Buildings*, 12(1319). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings12091319>

---

<sup>1</sup> Por ejemplo: (a) los materiales que pueden ser elaborados en serie, tales como el tabique o ladrillo de barro cocido, los bloques de concreto y prefabricados, los cuales tienen implicación en la estandarización y reducción del costo de la construcción; (b) sistemas constructivos como el concreto y el acero, que permiten construir edificios con mayor altura y cubrir claros más grandes.

<sup>2</sup> Se utiliza el término de “Estereotomía Tradicional”, para hacer referencia a la técnica de la estereotomía desarrollada en el Renacimiento y que es previa a la implementación de técnicas y herramientas digitales.

<sup>3</sup> Puede ser a partir de (a) primitivas -sólidos predeterminados como cubos, esferas, cilindros, pirámides, conos, entre otros -, (b) por extrusión de una sección, (c) por la conexión por extrusión de diferentes secciones, (d) por la revolución de secciones a partir de un eje y (e) por extracción de una sección a lo largo una línea recta o curva directriz.

<sup>4</sup> Los programas laminadores o *Slicer* son aplicaciones de escritorio que sirven para establecer parámetros necesarios para la fabricación aditiva. Estos cortan el modelo en capas para su posterior fabricación, donde por modelado por deposición fundida (Fused deposition modelling: FDM) se va creando el modelo por la superposición de capa por capa hasta obtener la forma final. Además, los laminadores funcionan para establecer la configuración de temperatura de fundido, temperatura de la cama o base de impresión, velocidad de impresión, tipo de relleno de las piezas, volumen de relleno en relación al área de la base, estructuras de soporte, entre otras.

