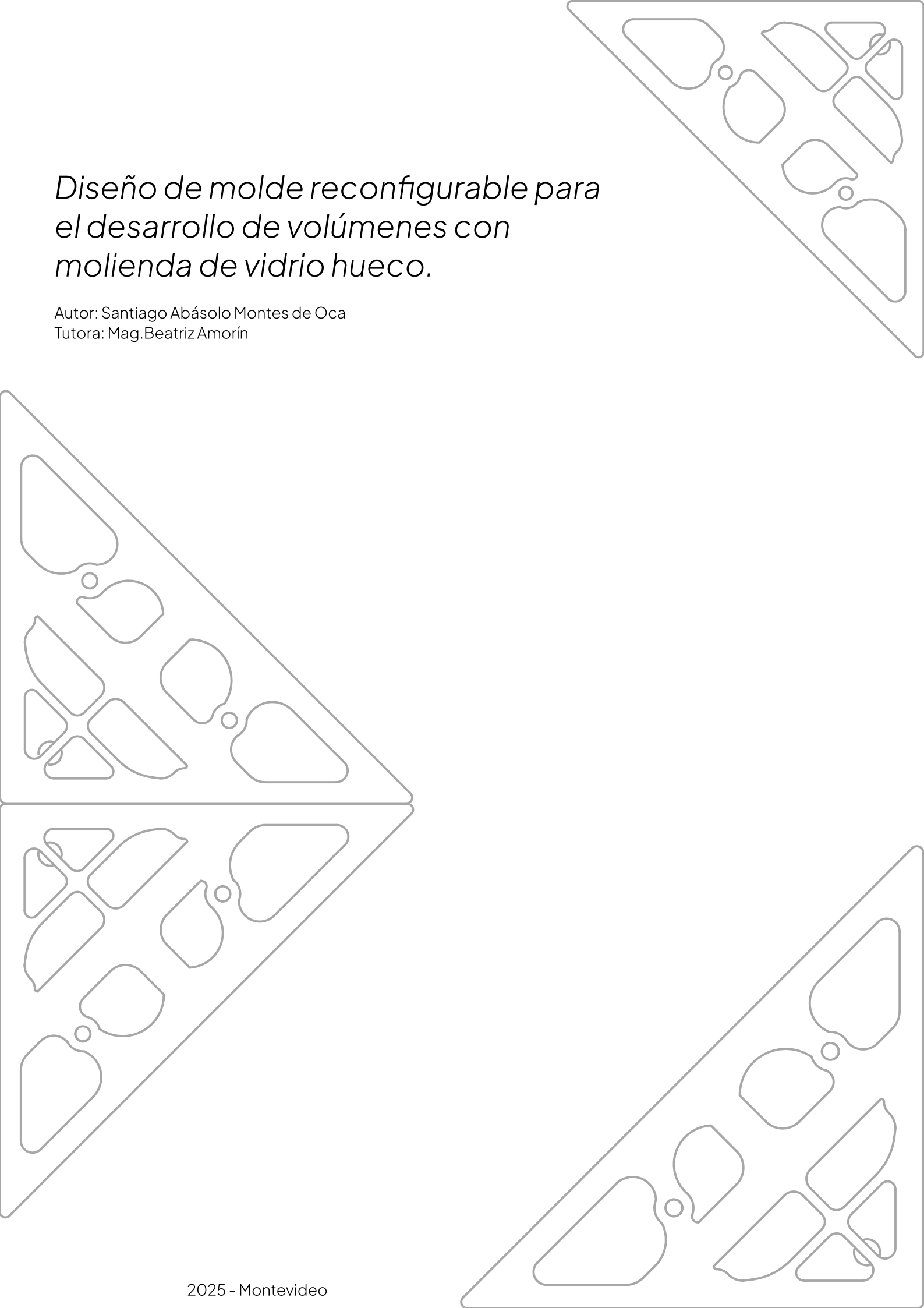


Diseño de molde reconfigurable para el desarrollo de volúmenes con molienda de vidrio hueco.

Autor: Santiago Abásolo Montes de Oca
Tutora: Mag. Beatriz Amorín



Para mis padres y mi hermano, por su amor y apoyo incondicional.

Universidad de la República

Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo
Escuela Universitaria Centro de Diseño



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Facultad de Arquitectura,
Diseño y Urbanismo
UDELAR



Escuela Universitaria
Centro de Diseño

***Diseño de molde reconfigurable para el
desarrollo de volúmenes con molienda de
vidrio hueco.***

Trabajo Final de Grado

Licenciatura en Diseño Industrial • Perfil producto

Estudiante - Santiago Abásolo Montes de Oca
Tutora - Mag. Beatriz Amorín
2025 - Montevideo, Uruguay

Resumen

El presente trabajo surge a partir de la identificación de limitaciones en las técnicas tradicionales de moldeo para vidrio reciclado en contextos artesanales y semi-industriales. Se reconoció una oportunidad de diseño en la creación de un sistema de molde que permitiera prescindir del uso de moldes desechables y facilitara la repetición y variación de piezas a partir de una misma matriz base. El objetivo principal fue el desarrollo de un molde reconfigurable y reutilizable específicamente orientado a la técnica de casting con molienda de vidrio hueco.

El sistema fue concebido como una herramienta modular, adaptable a distintas configuraciones geométricas, capaz de soportar las altas temperaturas necesarias para la fusión del vidrio. A partir de herramientas de modelado digital e impresión 3D se diseñó la matriz, permitiendo evaluar en laboratorio diversas combinaciones y variantes formales. Las pruebas realizadas incluyeron la construcción de prototipos, el relevamiento de formalidades y el análisis del comportamiento del material en distintas condiciones.

Durante el proceso se relevaron insumos y proveedores locales para asegurar la viabilidad del sistema en el contexto de producción nacional. Se registraron metodologías para la fabricación del molde, tratamiento superficial, uso de separadores. Asimismo, se propusieron criterios técnicos para el diseño de piezas que optimicen la compatibilidad entre los módulos y la eficiencia del proceso.

Como resultado, se consolidó un sistema de piezas que permite explorar, repetir y adaptar formas en vidrio fundido sin necesidad de fabricar un nuevo molde para cada pieza. El dispositivo plantea un aporte al campo del diseño desde una perspectiva técnica, experimental y sostenible, habilitando nuevas posibilidades para la producción con vidrio reciclado.

Índice

1	Introducción
1	Oportunidad de Diseño
2	Justificación del Tema
3	Sustentabilidad y Reciclaje de Vidrio
3	Ciclo de Vida del Vidrio y sus Implicaciones Ambientales
4	Beneficios Económicos y Sociales
5	El vidrio como Material Escultórico
6	Propiedades Ópticas y Físicas
7	Técnicas de Conformación
8	Consideraciones Técnicas
9	El Vidrio como Territorio de Exploración
10	Antecedentes de moldes para Vidrio
13	Tendencias Emergentes y Perspectivas Futuras
14	El Proyecto
15	Metodología de Trabajo
16	Curvas de Temperatura
17	Brief de Diseño
18	Materialidad
20	Proceso de Fabricación Digital
22	Proyección del Sistema y Desarrollo
26	Diagrama de flujo
27	La Base
29	Paredes
31	Separador
33	Tapa
35	Positivo
39	Molde Cerámico
41	Reconfigurabilidad
43	Proceso de Fabricación
53	Conclusiones del proceso
55	Secuencia de Uso
56	Aportes al Diseño
58	Referencias Bibliograficas

Introducción

El trabajo con vidrio reciclado en contextos artesanales y semi-industriales ha cobrado relevancia en Uruguay a partir de la necesidad de desarrollar prácticas sostenibles.

Entre las técnicas utilizadas para conformar piezas volumétricas, el casting con molienda de vidrio hueco reciclado permite aprovechar residuos post-consumo transformándolos en productos de valor agregado.

A diferencia del termomodelado, que trabaja con hojas de vidrio plano industrial (Villegas, 2016), el casting implica el uso de moldes capaces de contener y fundir el material particulado a altas temperaturas.

Una de las principales limitaciones del casting tradicional es la utilización de moldes de yeso refractario bajo el principio de molde perdido, lo cual impide su reutilización y genera residuos constantes. Este modelo de producción no solo encarece el proceso y lo vuelve ineficiente para la fabricación seriada, sino que también restringe la experimentación formal y la adaptabilidad en las etapas de diseño (Amorín, Frabasile, Demaría, Moreira, Ronca y Ramos, 2021).

En respuesta a estos desafíos, el presente proyecto se propuso desarrollar un molde reconfigurable y reutilizable para el trabajo con molienda de vidrio hueco reciclado. A partir de herramientas de modelado digital e impresión 3D, se diseñó un sistema modular capaz de adaptarse a diferentes configuraciones geométricas. Este enfoque busca optimizar el uso del vidrio reciclado, reducir la generación de desechos secundarios y fomentar procesos de producción flexibles, replicables y sostenibles.

Oportunidad de Diseño

El tema de investigación tiene como foco el desarrollo de un molde reconfigurable para trabajar piezas en volumen de molienda de vidrio hueco. El vidrio hueco puede ser reducido a diferentes granulometrías utilizando diversas técnicas, sin embargo, al emplearlo para crear productos con volumen, surgen dificultades como son el vertido dentro de moldes, la estructura del molde al momento del horneado, y la repetición de resultados.

Una característica adicional y significativa en la técnica de casting tradicional es el uso generalizado de moldes de yeso refractario que funcionan bajo el principio de molde perdido. Estos moldes deben ser destruidos después de cada uso para extraer la pieza de vidrio, lo que genera grandes cantidades de residuos de yeso.

Esta práctica no solo tiene un impacto ambiental negativo, sino que también representa una ineficiencia económica y técnica, ya que cada nueva pieza requiere la fabricación de un nuevo molde, incluso cuando se desea reproducir exactamente el mismo diseño. Además, esta limitación dificulta la experimentación iterativa y la producción en series, aspectos fundamentales para el desarrollo de productos comercialmente viables y para la exploración artística.

El trabajo con piezas de molienda implica diversos aspectos que deben ser abordados para lograr un proceso de producción eficiente y de alta calidad. Uno de los principales radica en la ausencia de moldes configurables diseñados específicamente para molienda de vidrio hueco. Según la revisión bibliográfica, se utilizan técnicas como moldes sólidos, cera pérdida, o moldes de arena para realizar trabajos en serie y obtener productos volumétricos. A diferencia del trabajo con vidrio plano, para el cual existen antecedentes y moldes configurables, el trabajo con molienda requiere un molde que se adapte a las temperaturas elevadas de más de 800 grados y que permita el trabajo con la molienda en pequeñas dimensiones.

Justificación del Tema

Según el Plan de Gestión de Envases se generan un total de 17,373 toneladas de vidrio hueco, convirtiéndose en el segundo material más arrojado a vertederos a nivel nacional, representando el 24% del total de residuos.

Sin embargo, esta problemática ofrece una valiosa oportunidad tecnológica para el desarrollo de herramientas que permita transformar la molienda de vidrio hueco reciclado en una amplia gama de productos.

Se propone como oportunidad el uso de tecnologías de fabricación digital en el desarrollo del molde. Este enfoque implica el modelado 3D detallado de las piezas del molde, seguido por la impresión 3D de los positivos que servirán como base para la fabricación del molde final. A diferencia de los métodos tradicionales de diseño y fabricación, este proceso permite visualizar y ajustar el diseño con gran precisión antes de su materialización física. La impresión 3D de los positivos ofrece ventajas significativas, como la posibilidad de crear geometrías complejas que serían difíciles de lograr con métodos convencionales, y la capacidad de realizar iteraciones rápidas del diseño para optimizar el molde. Este método se centra en la creación de prototipos físicos que pueden ser evaluados y refinados antes de la producción final del molde reconfigurable.

El presente proyecto pretende desarrollar un nuevo molde reconfigurable para la producción de piezas de molienda de vidrio hueco, e innovar en el ámbito del diseño de productos con molienda de vidrio.

La elección de utilizar molienda de vidrio hueco como materia prima se basa en investigaciones previas realizadas durante el trabajo final de la unidad curricular Laboratorios de Vidrios 2 y el Proyecto de Investigación PAIE **Creación de una familia de Productos con molienda de vidrio hueco**, en este trabajo, se exploró la compatibilidad de distintas composiciones de vidrio, su comportamiento bajo diversas temperaturas y granulometrías.

Además, la molienda de vidrio hueco ofrece la posibilidad de trabajar con colores diversos, los cuales son empleados en la composición de las botellas de vidrio. Esta característica permite la combinación de colores, e incluso la variación de la textura superficial de la pieza final dependiendo del tamaño de la molienda.

El desarrollo de un molde reconfigurable y reutilizable no solo reducirá la generación de residuos de yeso, sino que también permitirá una mayor experimentación y facilitará la producción en serie, aspectos esenciales para la viabilidad comercial de los productos de vidrio. La posibilidad de ajustar el molde para diferentes configuraciones sin necesidad de fabricar uno nuevo para cada variación representa un avance significativo en términos de sostenibilidad, eficiencia y versatilidad en el trabajo con vidrio.



Figura 1: Fotografía de proceso de moldes perdidos
Fuente: Elaboración Propia



Figura 2: Fotografía de descarte de Yeso
Fuente: Elaboración Propia

Sustentabilidad y Reciclaje de Vidrio

Contexto del Vidrio Hueco en Uruguay

El sector del vidrio hueco para envases en Uruguay presenta características específicas que determinan su potencial como material reciclable y su impacto ambiental. Según el Ministerio de Industria, Energía y Minería (2018) la industria ha experimentado transformaciones significativas, con creciente énfasis en la recuperación de materiales post-consumo. La disponibilidad de vidrio reciclado representa una oportunidad para desarrollar aplicaciones que reduzcan la dependencia de materias primas importadas.

La estructura del mercado uruguayo, con pequeños, medianos y grandes productores, crea un ecosistema donde las soluciones basadas en materiales reciclados generan beneficios múltiples. La accesibilidad del vidrio reciclado en diferentes regiones constituye un factor determinante para proyectos que incorporen este material, especialmente donde el acceso a materiales especializados es limitado (Amorín, Frabasile, 2021).

A su vez, iniciativas desarrolladas desde el ámbito universitario, como las impulsadas por la Escuela Universitaria Centro de Diseño (FADU), exploran activamente las potencialidades del vidrio reciclado como recurso técnico, expresivo y sustentable. Ejemplo de ello es el proyecto de PAIE (CSIC)* *Diseño de una familia de productos a partir de botellas de vidrio de un solo uso*, en el que se estudió la viabilidad de aplicar técnicas de casting utilizando molienda obtenida a través de choque térmico. Este proyecto, además de validar procesos de reutilización de residuos en productos funcionales, expone los desafíos técnicos asociados a la compatibilidad de composiciones, la estabilidad térmica y la fragilidad del material procesado (Irurueta Rivero, L. S., Martínez Ríos, L., Trelles Falcón, M., Caja Ducasse, J., & Abásolo Montes de Oca, S., 2024).

Ciclo de Vida del Vidrio y sus Implicaciones Ambientales

Características de Reciclabilidad

La estructura molecular del vidrio permite su fusión y reordenamiento de estas moléculas repetidas veces, manteniendo sus propiedades físicas y químicas fundamentales. Esta característica lo distingue de otros materiales que se degradan con cada ciclo de reciclaje, posicionándose como recurso valioso para la economía circular.

La utilización de vidrio reciclado o *cullet** reduce significativamente el consumo energético en la producción. Cada 10% de *cullet* incorporado representa aproximadamente un 2-3% de reducción energética (Gonella, F., Muñoz, J., & Wallace, C. 2009), debido principalmente a la disminución de la temperatura de fusión necesaria, con reducciones de hasta 30°C por cada 10% de vidrio reciclado incorporado (Ministerio de Industria, Energía y Minería, 2018).

En el contexto uruguayo, las investigaciones realizadas en el Laboratorio de Vidrio de la EUCD han profundizado en el estudio del comportamiento térmico del vidrio reciclado, generando conocimiento técnico aplicado sobre curvas de horneado, granulometría, tratamientos superficiales y resistencia estructural de las piezas moldeadas (Amorín, Frabasile, 2021).

Impacto Ambiental

La producción de vidrio con materias primas vírgenes requiere aproximadamente 4.5 GJ de energía por tonelada, mientras que con 50% de vidrio reciclado se reduce a 3.3 GJ (Gonella et al., 2009), representando beneficios económicos y reducción en la huella de carbono.

El vidrio no se descompone en condiciones normales de disposición final, manteniendo su estructura molecular intacta por siglos (Fernández Navarro, 1991), lo que subraya la importancia de sistemas efectivos de recuperación y reutilización.

La extracción de materias primas (arena de sílice, carbonato de sodio y caliza) genera impactos ambientales significativos. En Uruguay, donde muchas de estas materias deben importarse, el impacto se amplifica por las emisiones asociadas al transporte internacional, reforzando el valor estratégico del aprovechamiento de recursos locales.

Beneficios Económicos y Sociales

La integración del vidrio reciclado en nuevos procesos productivos transforma residuos en recursos valiosos. Los sistemas que incorporan materiales reciclados generan beneficios que trascienden la dimensión ambiental, creando valor económico y social a múltiples niveles, particularmente relevante en Uruguay, donde el aprovechamiento de recursos disponibles representa una prioridad estratégica.

Desde el punto de vista del diseño, la valorización de materiales residuales ha generado líneas de trabajo interdisciplinarias que integran a estudiantes, docentes y comunidades. Tal como demuestra la experiencia del Laboratorio de Vidrio de la FADU, estos espacios funcionan como plataformas de transferencia de conocimiento, formación técnica y experimentación proyectual, con foco en la viabilidad de pequeñas producciones descentralizadas.

Impacto Social y Transferencia de Conocimiento

El desarrollo de tecnologías que aprovechan materiales reciclados fomenta la responsabilidad ambiental y promueve una cultura de sostenibilidad, particularmente relevante en contextos de enseñanza donde la demostración práctica de principios de economía circular impacta en la formación profesional.

Además, investigaciones como la tesis de Sanz Lobo (2005) han demostrado que es posible trabajar con vidrio reciclado en técnicas escultóricas como fusión, termoformado y casting utilizando hornos cerámicos y recursos accesibles. Esto abre un campo de exploración donde el vidrio deja de ser solo un desecho industrial para convertirse en un vehículo de expresión artística, democratización tecnológica y producción localizada.

El vidrio como Material Escultórico

Introducción a la Dualidad del Vidrio

El vidrio como material escultórico representa un fascinante estudio de contrastes y posibilidades expresivas que han cautivado a artistas y artesanos a lo largo de la historia. Su naturaleza dual constituye quizás su característica más definitoria, manifestándose en múltiples dimensiones que enriquecen su potencial creativo.

F. A. Veer, R. Nijse (2017) analizan esta interacción entre transparencia y opacidad, presentando un espectro completo de posibilidades expresivas que constituye una de las propiedades más versátiles para la expresión artística. Esta gradación permite al artista controlar la revelación u ocultamiento de elementos, jugando con la percepción del espectador de maneras imposibles con otros materiales.

La aparente contradicción entre fragilidad y resistencia representa otro aspecto fundamental de esta dualidad. A primera vista, el vidrio evoca una sensación de vulnerabilidad que contrasta con su notable resistencia estructural, especialmente a la compresión. Oikonomopoulou, F., Bristogianni, T., Veer, F. A., & Nijse, R. (2017) documentan en sus investigaciones cómo esta tensión entre lo aparentemente frágil y lo sorprendentemente resistente ha sido explorada conceptualmente por numerosos artistas contemporáneos, convirtiendo una característica física en un recurso expresivo.

Quizás la dualidad más transformadora desde la perspectiva técnica sea la que existe entre rigidez y fluidez. En el trabajo de Frabasile (2021) se describe cómo el vidrio, normalmente percibido como un material rígido e inflexible, experimenta un estado de transición que permite manipulaciones que en otros materiales resulta difícil técnicamente. Esta capacidad de transformación entre estados sólidos y fluidos abre posibilidades técnicas y expresivas únicas, permitiendo capturar movimientos y gestos que permanecen congelados en el tiempo una vez que el material se enfría y solidifica.



Figura 3 : Pieza escultórica realizada en Vidrio soplado.
Fuente: *Architectural Glass Fantasies - Utopia Materialized at Heller Gallery (NYC), sept.-oct 2018*

Propiedades Ópticas y Físicas

La relación del vidrio con la luz constituye quizás su característica más distintiva como material escultórico. Su capacidad de transmisión, refracción y reflexión crea efectos visuales que, según los estudios de Oikonomopoulou et al. (2017), transforman la experiencia perceptiva de manera única. A diferencia de materiales opacos que solo interactúan con la luz en su superficie, el vidrio establece un diálogo tridimensional con ella, permitiéndole penetrar, transformarse y emerger modificada. Esta interacción crea piezas que, como documenta Frabasile (2021), modifican su apariencia visual con el cambio de posición del observador, generando experiencias perceptivas dinámicas que evolucionan con el movimiento.

La posibilidad de crear efectos cromáticos internos mediante inclusiones y capas superpuestas amplía aún más este potencial expresivo. Sanz Lobo (2005) ha estudiado cómo estas técnicas permiten crear gradaciones, contrastes y armonías cromáticas que existen no solo en la superficie sino a través del volumen completo de la pieza. Esta característica permite al artista trabajar con el color de manera volumétrica, creando composiciones que se revelan gradualmente a medida que la mirada penetra en la masa vítrea.

La espacialidad del vidrio representa otra dimensión fundamental de su potencial escultórico. Su capacidad de contener espacio visible mientras mantiene límites físicos definidos crea lo que en la investigación de Oikonomopoulou et al. (2017) se analiza como la paradoja de lo sólido transparente. Esta cualidad permite establecer límites visuales con continuidad espacial, generando efectos perceptivos específicos que desafían la comprensión convencional del volumen escultórico. Como propone Frabasile (2021), esta característica permite crear piezas donde los conceptos de contenedor y contenido se fusionan y redefinen constantemente.

El color y la textura en el vidrio presentan posibilidades que trascienden las de otros materiales escultóricos. La incorporación de color en la masa o superficie, como analiza Sanz Lobo (2005), permite crear efectos de profundidad y superposición que transforman la experiencia visual de la obra. Las texturas internas y superficiales, controlables mediante diversas técnicas de procesamiento, añaden dimensiones táctiles y visuales que enriquecen la experiencia perceptiva de la obra, creando contrastes entre áreas pulidas y mateadas, transparentes y translúcidas, lisas y texturadas.

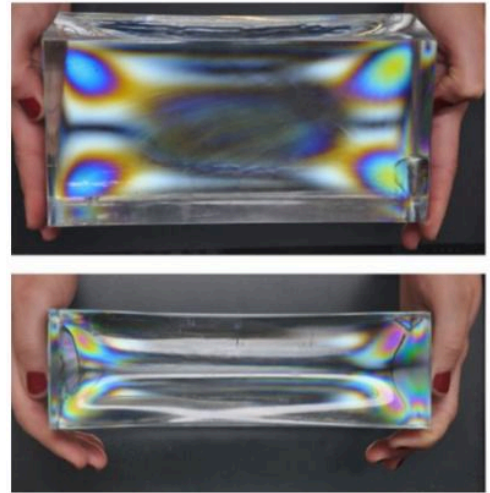


Figura 4. Birrefringencia en bloques de vidrio termomodelado.
Fuente. Adaptado de Oikonomopoulou et al. (2017, fig. 9), *Glass Structures & Engineering*.

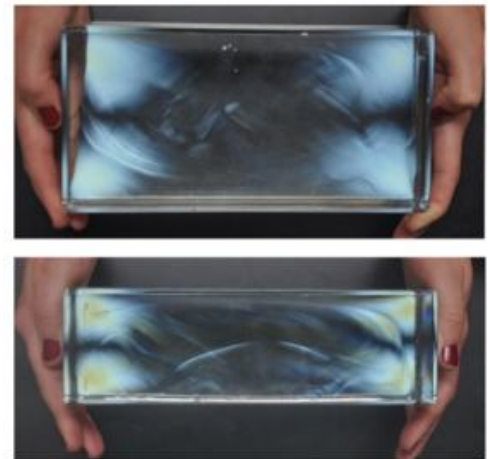


Figura 5. Birrefringencia en bloques de vidrio termomodelado.
Fuente. Adaptado de Oikonomopoulou et al. (2017, fig. 9), *Glass Structures & Engineering*.

Técnicas de Conformación

La creación de volumen y forma en el vidrio abarca un espectro de técnicas que combinan tradiciones milenarias con innovaciones contemporáneas. Según las investigaciones de Oikonomopoulou et al. (2017), el control preciso de la temperatura y el proceso de enfriamiento resulta fundamental para lograr piezas de alta calidad. El proceso de recocido, que puede extenderse por días o incluso semanas para piezas de gran formato, es esencial para eliminar tensiones internas y garantizar la estabilidad estructural del material.

El modelado de masas sólidas mediante casting ofrece posibilidades completamente diferentes. Este proceso, permite trabajar el vidrio de manera similar a la escultura en otros materiales, pero con resultados ópticos únicos. La capacidad de controlar la transparencia, las inclusiones y los efectos cromáticos internos distingue el casting en vidrio de técnicas similares en otros materiales, permitiendo crear piezas con complejidades internas visibles.

La deformación controlada mediante termoformado constituye otra aproximación fundamental que Sanz Lobo (2005) describe en sus estudios como un proceso de transformación que preserva la transparencia mientras modifica la geometría. Esta técnica, que trabaja con láminas de vidrio calentadas hasta su punto de reblandecimiento, permite crear formas curvas y onduladas que mantienen la claridad óptica del material original, creando piezas que parecen capturar movimientos fluidos en un estado permanente.

Como señala Sanz Lobo (2005), las acumulaciones representan otra técnica significativa en la creación escultórica con vidrio, donde múltiples teselas de vidrio compatible, formando torres unas junto a otras son sometidas a procesos de cocción controlada para conseguir que las distintas piezas se fusionen, pero sin perder completamente su disposición y volúmenes iniciales. Esta aproximación permite crear estructuras complejas que preservan la identidad individual de cada elemento mientras generan una unidad visual y estructural coherente.

Los acabados y efectos en el vidrio representan un campo de exploración técnica y expresiva en sí mismo. Como estudia Sanz Lobo (2005), técnicas decorativas como la aplicación de esmaltes vitrificables coloreados permiten crear superficies con características táctiles y ópticas particulares, expandiendo las características formales disponibles para el artista. La combinación estratégica de diferentes técnicas de acabado permite crear contrastes visuales y táctiles que enriquecen la experiencia perceptiva de la obra, estableciendo jerarquías visuales y dirigiendo la atención del espectador.



Figura 6. Moldes de casting dentro de un horno cerámico a 900 °C.
Fuente. Reproducido de Sanz Lobo (2005, p. 434), *El vidrio como materia escultórica: técnicas de fusión, termoformado, casting y pasta de vidrio* (tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid).

Consideraciones Técnicas

El control del material representa quizás el aspecto más desafiante del trabajo escultórico en vidrio. En los estudios realizados por Oikonomopoulou et al. (2017), se analiza cómo la comprensión del comportamiento térmico resulta fundamental para evitar tensiones y roturas, requiriendo conocimientos precisos sobre tasas de calentamiento y enfriamiento que varían según el volumen y composición del vidrio. El manejo de tensiones internas, identificado por estos autores como uno de los principales desafíos técnicos en la escultura en vidrio, exige procesos meticulosos de recocido que pueden extenderse por días o incluso semanas para piezas de gran formato.

Sanz Lobo (2005) destaca la importancia de los procesos térmicos controlados, describiendo que durante la primera etapa de la fase de fusión ocurre la reacción de los componentes y formación del vidrio. Al elevar la temperatura, la mezcla vitrificable experimenta transformaciones y reacciones químicas que la convierten en una masa vítrea. Este conocimiento técnico resulta esencial para comprender y controlar los procesos de transformación del material y alcanzar los resultados deseados.

La compatibilidad entre diferentes tipos de vidrio constituye otra consideración crítica, especialmente en técnicas de fusión. Sanz Lobo (2005) señala cómo las diferencias en coeficientes de expansión térmica pueden generar tensiones que eventualmente provocan fracturas, incluso semanas o meses después de completada la pieza. Esta realidad técnica impone restricciones que deben integrarse en el proceso creativo desde sus etapas iniciales.

El proceso de producción en la escultura en vidrio requiere una planificación detallada que Frabasile (2021) considera esencial debido a la irreversibilidad de muchas técnicas. A diferencia de materiales como la arcilla o la madera, donde ciertos errores pueden corregirse durante el proceso, el vidrio a menudo no permite rectificaciones una vez alcanzadas ciertas etapas. Esta característica impone una disciplina particular que combina precisión técnica con visión artística.

La experimentación controlada constituye una metodología fundamental para desarrollar efectos específicos y soluciones técnicas innovadoras. Los estudios de Oikonomopoulou et al. (2017) enfatizan la importancia de este enfoque sistemático, donde cada variable se modifica de manera controlada para comprender plenamente su impacto en el resultado final. Este proceso iterativo de prueba y documentación resulta especialmente valioso en un material donde los accidentes pueden ser importantes como reveladores de nuevas posibilidades expresivas.

El Vidrio como Territorio de Exploración

El vidrio como material escultórico representa un territorio de exploración técnica y expresiva en constante evolución. Como muestran los estudios de Oikonomopoulou et al. (2017), sus propiedades duales, su interacción única con la luz y su capacidad para integrar innovaciones tecnológicas lo posicionan como un material de extraordinaria versatilidad en el panorama del diseño y escultórico contemporáneo. La tensión entre tradición e innovación que caracteriza su desarrollo actual refleja la riqueza de un material que continúa revelando nuevas posibilidades expresivas.

La comprensión de sus propiedades físicas y ópticas, investigada por Sanz Lobo (2005), combinada con el dominio técnico de sus procesos de transformación, permite a los artistas y diseñadores contemporáneos utilizar su potencial expresivo.

Las innovaciones tecnológicas, como analiza Frabasile (2021), están transformando radicalmente las posibilidades del vidrio como medio escultórico. La integración de técnicas digitales con métodos tradicionales no solo mejora la precisión y reproducibilidad de los procesos, sino que también abre nuevas vías para la experimentación artística y la innovación técnica.

El diálogo constante entre las cualidades inherentes del vidrio y las intenciones expresivas del artista genera un proceso creativo donde las restricciones técnicas se transforman en oportunidades para la innovación. Como revelan los estudios de Oikonomopoulou et al. (2017), esta dinámica de colaboración entre artista y material constituye quizás la característica más definitoria de la escultura en vidrio contemporánea, un campo donde el conocimiento técnico y la visión artística se entrelazan para crear obras que capturan y transforman la luz de maneras únicas.

Antecedentes de moldes para Vidrio

Clasificación General de Moldes para Vidrio

Moldes de Un Solo Uso

El yeso refractario constituye uno de los materiales más utilizados para moldes de un solo uso en el trabajo con vidrio. Según Sanz Lobo (2005), estos moldes deben incluir sílice y otros materiales refractarios para resistir las altas temperaturas sin deteriorarse excesivamente. La proporción típica incluye yeso y sílice, con adiciones de materiales refractarios para mejorar la resistencia estructural. Una ventaja significativa de este material es su amplia disponibilidad en mercados locales de casi cualquier región, lo que lo convierte en una opción accesible para artistas y pequeños talleres.

Este tipo de molde ofrece excelente capacidad para reproducir detalles finos, pero presenta fragilidad estructural que limita su uso a piezas relativamente pequeñas. Su fabricación requiere consideraciones especiales para la evacuación de humedad, incluyendo ciclos de secado graduales que pueden extenderse por varios días para moldes de gran formato. La accesibilidad de los componentes básicos para su elaboración representa una ventaja considerable, especialmente en contextos donde el acceso a materiales especializados puede ser limitado.

Los materiales orgánicos también se emplean frecuentemente como moldes de un solo uso. Sanz Lobo (2005) describe los moldes de madera como una técnica tradicional que aprovecha la combustión controlada del material. La madera se carboniza durante el proceso, creando una capa protectora que permite completar el ciclo antes de que el molde se destruya completamente. Otros materiales como papel, fibras vegetales y diversos materiales orgánicos se utilizan para crear texturas específicas, aprovechando su descomposición durante el proceso (Frabasile, 2021). La ventilación de gases durante la combustión resulta crítica para evitar defectos en la pieza final, requiriendo sistemas de evacuación cuidadosamente diseñados. La principal ventaja de estos materiales radica en su disponibilidad universal y bajo costo, permitiendo experimentación incluso en contextos con recursos limitados.



Figura 7. Molde de arena impreso colapsado tras la colada; se aprecia la delgada cáscara generada por el recubrimiento de sílice-yeso.
Fuente. Adaptado de Damen et al. (2022, fig. 28), *Glass Structures & Engineering*.
<https://doi.org/10.1007/s40940-022-00181-1>

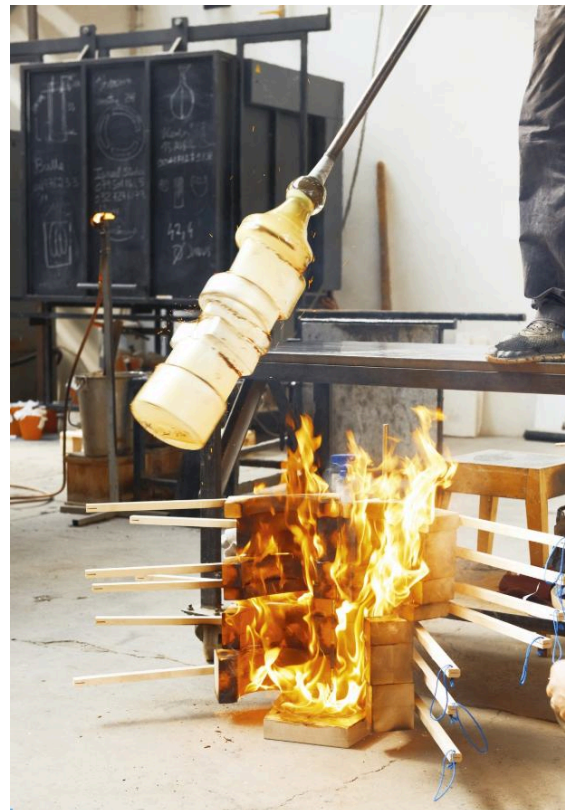


Figura 8. "Mould in Motion", molde de madera en combustión durante el soplado de vidrio (Philipp Grundhöfer, 2012).
Fuente. Reproducido de Chin, A. (19 de septiembre de 2012). *Hot tools: explorations in glassblowing at Gallery Libby Sellers*. Designboom. <https://www.designboom.com/design/hot-tools-explorations-in-glassblowing-at-gallery-libby-sellers/>

Moldes Reutilizables

Los moldes metálicos representan una categoría fundamental dentro de los moldes reutilizables. El acero inoxidable presenta durabilidad en ciclos térmicos repetidos (Frabasile, 2021). Las aleaciones más utilizadas incluyen AISI 304 y 316*, seleccionadas por su resistencia a la oxidación a altas temperaturas. Aunque estos materiales suelen estar disponibles en mercados locales de zonas urbanas, su costo puede resultar alto para artistas independientes o pequeños talleres, lo que subraya la importancia de considerar alternativas más accesibles o sistemas que optimicen su uso.

La conductividad térmica de estos moldes constituye un factor crítico que afecta la distribución de temperatura en la pieza. El acero presenta una conductividad moderada (16–24 W/m·K), que permite un enfriamiento controlado pero puede requerir precalentamiento para evitar choques térmicos. En términos de durabilidad y mantenimiento, los moldes metálicos ofrecen ventajas económicas a largo plazo, con moldes que pueden soportar cientos o incluso miles de ciclos con mantenimiento adecuado, lo que compensa su mayor inversión inicial si se consideran los costos a lo largo de su vida útil.

Los moldes de grafito constituyen otra opción dentro de los moldes reutilizables, con propiedades específicas que incluyen excelente conductividad térmica y resistencia a la oxidación a temperaturas moderadas hasta 400°C en atmósfera controlada, como indica Sanz Lobo (2005). Estos moldes pueden lograr acabados superficiales extremadamente lisos, con rugosidades inferiores a 0.5 μm , facilitando el desmoldeo y produciendo piezas con alto brillo. Sin embargo, presentan limitaciones relacionadas con su oxidación a temperaturas muy elevadas, lo que restringe su aplicación a ciertos procesos y requiere atmósferas protectoras en algunos casos (Sanz Lobo, 2005). La disponibilidad de grafito de alta calidad puede ser limitada en muchos mercados locales, lo que representa un desafío para su implementación en contextos con acceso restringido a materiales especializados.



Figura 9. Enfriamiento rápido de ladrillos de vidrio fundido (de 1200 °C a ~700 °C).
Fuente. Adaptado de Oikonomopoulou et al. (2017, fig. 8), *Glass Structures & Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40940-017-0039-4>



Figura 10. Vertido de vidrio fundido en un molde de grafito para fabricar marcos estructurales.
Fuente. Adaptado de Oikonomopoulou et al. (2017, fig. 27), *Glass Structures & Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40940-017-0039-4>

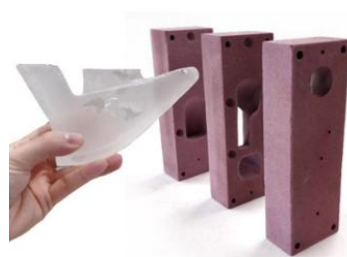


Figura 11. Elemento de vidrio colado con un molde de arena impreso en 3D.
Fuente. Adaptado de Damen et al. (2022, fig. 29), *Glass Structures & Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40940-022-00181-1>

Materiales y Propiedades

La selección de materiales para moldes de vidrio debe considerar características esenciales. La resistencia térmica resulta fundamental para mantener la integridad estructural a temperaturas que pueden alcanzar los 900°C en procesos de casting (Fernández Navarro, 1991). La estabilidad dimensional constituye otro factor crítico para la precisión de las piezas.

El acabado superficial determina la textura final de la pieza de vidrio, con la capacidad de reproducir detalles de hasta 0.1 mm en los sistemas más precisos, como indica Sanz Lobo (2005). La durabilidad resulta especialmente importante en producción en serie, donde el costo amortizado del molde depende directamente de su vida útil.

Las consideraciones técnicas incluyen el coeficiente de dilatación térmica, que debe ser compatible con el del vidrio para prevenir fracturas por estrés térmico durante el enfriamiento, como señala Sanz Lobo (2005). La conductividad térmica afecta directamente la velocidad y uniformidad del calentamiento y enfriamiento, con valores óptimos que varían según la técnica específica.

La ventilación resulta esencial para la evacuación de gases y la prevención de burbujas, especialmente en procesos de casting donde pueden quedar atrapados gases entre el vidrio y el molde. La facilidad de desmoldeo es un factor determinante para la integridad de piezas complejas, especialmente aquellas con contrasalidas o detalles finos. El impacto ambiental debe evaluarse considerando todo el ciclo de vida del molde, desde la obtención de materias primas hasta su disposición final.

La disponibilidad local de materiales emerge como un factor crítico adicional que, aunque no siempre se menciona explícitamente en la literatura especializada, determina en gran medida la viabilidad práctica de diferentes sistemas de moldeo. Los materiales que pueden obtenerse fácilmente en el mercado local no solo reducen costos logísticos y tiempos de espera, sino que también facilitan la reparación y mantenimiento de los moldes, aspectos fundamentales para la continuidad de los procesos productivos.

Moldes para Casting

Los moldes para casting requieren un diseño y construcción que considere la contracción del vidrio durante el enfriamiento, que puede variar entre 0.3% y 0.9% dependiendo del tipo de vidrio, como señala Sanz Lobo (2005). La ventilación y llenado constituyen aspectos críticos para evitar defectos como burbujas y líneas de flujo, que requieren canales estratégicamente ubicados. El control de temperatura debe ser especialmente preciso en piezas de gran volumen, con curvas de calentamiento y enfriamiento cuidadosamente programadas para evitar tensiones internas.

Tendencias Emergentes y Perspectivas Futuras

La literatura académica consultada identifica varias tendencias emergentes que probablemente definirán el futuro desarrollo de los moldes para vidrio. La integración de principios de economía circular, aprovechando materiales reciclados y diseñando para la reutilización, representa una dirección prometedora especialmente relevante en contextos donde la sostenibilidad no es solo una consideración ética sino también económica.

Los sistemas híbridos combinan elementos fijos para funciones estructurales con componentes ajustables para la reconfigurabilidad como muestra Frabasile (2021). Esta aproximación resulta particularmente relevante en contextos con acceso limitado a tecnologías avanzadas, permitiendo desarrollar soluciones que combinen componentes especializados en áreas críticas con materiales locales en elementos secundarios.

La adaptación de tecnologías avanzadas a contextos con recursos limitados representa un desafío creativo y técnico, pero también una oportunidad para desarrollar soluciones innovadoras específicamente adaptadas a condiciones y necesidades regionales. Esta aproximación no solo responde a limitaciones prácticas, sino que puede generar innovaciones que, precisamente por estar desarrolladas en contextos con restricciones, ofrezcan ventajas en términos de eficiencia, adaptabilidad y sostenibilidad.

Reconfigurabilidad como Tendencia Emergente

La reconfigurabilidad en moldes para vidrio representa una tendencia emergente que transforma la relación entre inversión, flexibilidad productiva y sostenibilidad. Estos sistemas optimizados representan un nuevo enfoque de diseño para componentes monolíticos de vidrio, permitiendo producir múltiples variaciones con un solo sistema.

Las ventajas económicas resultan significativas, con Frabasile (2021) destacando la reducción de costos al permitir producir diversas formas con un único dispositivo, disminuyendo la cantidad de moldes necesarios. Esta reducción adquiere especial relevancia en contextos de enseñanza y talleres pequeños, donde los recursos para inversión en equipamiento suelen ser limitados. La optimización de espacio resulta especialmente relevante en talleres con limitaciones de área, donde el almacenamiento de múltiples moldes fijos representaría un problema logístico considerable.

Desde la perspectiva creativa, los sistemas reconfigurables permiten explorar variaciones sutiles dentro de una serie, facilitando procesos iterativos de diseño que serían prohibitivamente costosos con moldes tradicionales. Esta flexibilidad resulta particularmente valiosa en contextos de experimentación artística y enseñanza, donde la exploración formal constituye un componente esencial del proceso creativo.

El Proyecto

Objetivo General

Desarrollar un molde reconfigurable para trabajar con molienda de vidrio hueco que permita diversas aplicaciones volumétricas en la técnica de casting.

Objetivos Específicos

1. Incorporar tecnologías de fabricación digital para el desarrollo del molde

Utilizar software de modelado 3D para diseñar con precisión las piezas del molde reconfigurable
Crear prototipos mediante impresión 3D de los positivos que servirán como base para la fabricación del molde
Optimizar el diseño del molde mediante iteraciones de modelado e impresión 3D antes de la fabricación final
Documentar el proceso de transición del diseño digital a la fabricación física del molde

2. Realizar pruebas y ajustes en el prototipo de molde

Fabricar un prototipo funcional basado en los modelos 3D e impresiones desarrolladas
Evaluar el rendimiento del molde con diferentes configuraciones
Optimizar la eficiencia del molde en la producción de volúmenes con molienda de vidrio hueco

3. Reducir la generación de residuos asociados a los moldes tradicionales de casting

Desarrollar un sistema de molde reutilizable que elimine la necesidad de destruir el molde después de cada uso
Cuantificar la reducción de residuos de yeso en comparación con la técnica tradicional de molde perdido
Evaluar la durabilidad del molde reconfigurable a lo largo de múltiples ciclos de uso

Metodología de Trabajo

La metodología aplicada en este proyecto se basó en una lógica proyectual-experimental orientada a validar la viabilidad formal, funcional y productiva de un sistema modular de moldeo para la técnica de casting. Se priorizó un enfoque iterativo que integra el diseño paramétrico digital con técnicas de fabricación aditiva y ensayos físicos controlados.

El desarrollo del sistema se abordó desde la generación de geometrías adaptables mediante software CAD* con capacidad de modificación paramétrica, lo que permitió explorar variaciones morfológicas sin necesidad de reconstrucción total del modelo.

Esta estrategia respondió a la necesidad de contar con una herramienta proyectual flexible, capaz de adaptarse a distintos requerimientos formales sin incrementar significativamente el costo o la complejidad del proceso. La fabricación de los componentes del sistema se realizó mediante impresión 3D en PLA 850*, permitiendo evaluar directamente las condiciones técnicas del conjunto: encastres, tolerancias, estabilidad estructural y mecanismos de fijación. A partir de estas piezas se moldearon los dispositivos refractarios utilizando una mezcla cerámica de formulación propia, diseñada para mantener su integridad a altas temperaturas. La elección de esta materialidad respondió tanto a criterios de disponibilidad local como a requisitos térmicos y mecánicos.

El sistema se validó a través de ensayos controlados en contexto de laboratorio, considerando variables como la facilidad de montaje, la estabilidad del molde durante el vertido y la resistencia posterior al horneado. Los resultados se registraron mediante fichas comparativas que facilitaron el análisis técnico y formal del sistema, priorizando criterios de eficiencia, repetibilidad y capacidad de reconfiguración.

Se entendió la reconfigurabilidad no solo como una condición técnica, sino como un criterio metodológico que guió la toma de decisiones durante el proceso proyectual, orientando el diseño hacia soluciones modulares, combinables y reutilizables.



Figura 12. Fotografía del Laboratorio de Vidrio
Fuente: Elaboración Propia

Curvas de Temperatura

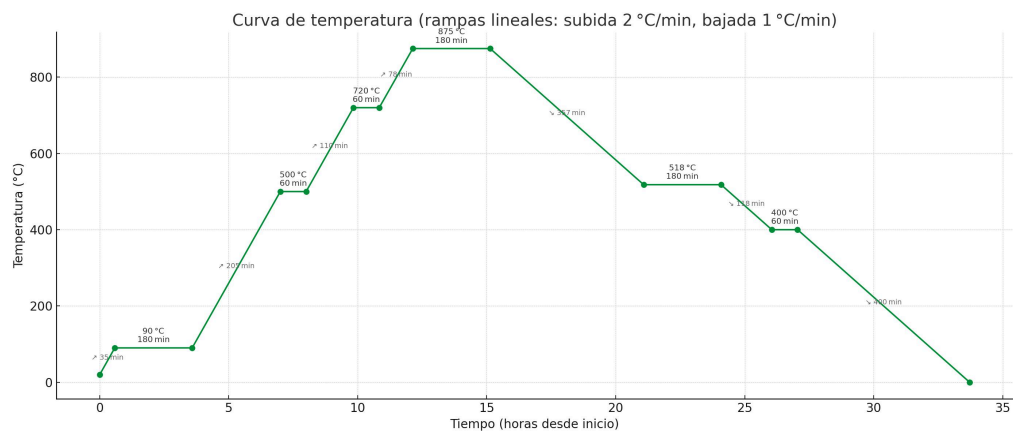


Figura 13. Curva de temperatura para Casting (Amorín, Frabasile, 2023)
Fuente: Elaboración Propia, extraída del Laboratorio de Vidrios

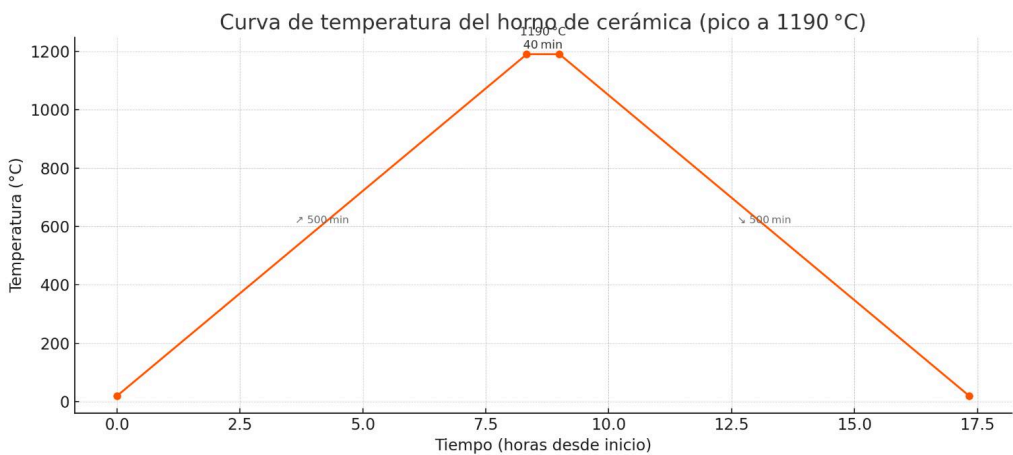


Figura 14. Curva de temperatura Horno de Cerámica (Pilar Irureta)
Fuente: Elaboración Propia, extraída del Laboratorio de Cerámicas

Brief de diseño

Concepto de diseño

Sistema que se utiliza para trabajar la técnica de casting, mediante una serie de piezas modulares este sistema productivo será reconfigurable y reutilizable

Explicación ampliada del concepto de diseño

Este sistema será desarrollado para facilitar el trabajo con la técnica de casting a través de un conjunto de piezas modulares que permiten reconfigurar la forma del dispositivo utilizado en cada colada. Al estar compuesto por partes que pueden ser reorganizadas, el sistema permite la reutilización de la Matriz, reduciendo la necesidad de fabricar nuevos moldes para cada forma. Esto no solo optimiza el uso de materiales y tiempos, sino que también habilita la exploración formal desde una lógica sistemática y eficiente.

Tabla de Requisitos Indispensables, Deseables u Opcionales

Requisitos	I	D	O	Justificación
Resistencia a altas temperaturas (>900°C)	x			El proceso de fusión del vidrio requiere temperaturas entre 700-900°C. El material cerámico refractario debe mantener su integridad estructural durante múltiples ciclos de calentamiento sin degradarse, como señala Sanz Lobo (2005).
Sistema reconfigurable y modular	x			Permite adaptar módulos y fabricar múltiples geometrías sin nuevos herramentales, reduciendo costos, tiempo y residuos; es la base operativa del proyecto.
Estabilidad dimensional durante ciclos térmicos	x			La precisión del molde depende de que mantenga sus dimensiones durante el calentamiento y enfriamiento, evitando deformaciones que alterarían el resultado final.
Disponibilidad de materiales en el mercado local	x			Seleccionar materiales fácilmente accesibles reduce costos, tiempos de espera y facilita la replicabilidad del sistema.
Geometrías optimizadas para fabricación digital	x			El diseño debe considerar las limitaciones y fortalezas de los procesos de fabricación digital disponibles localmente, evitando voladizos excesivos, ángulos imposibles y otras restricciones técnicas.
Sistema de ventilación integrado		x		Permite el escape de aire o gases durante la fusión del vidrio, evitando defectos en la pieza final, o roturas del molde en el horno.
Transportabilidad del sistema			x	Un diseño transportable facilita su uso en diferentes talleres o contextos educativos, ampliando sus posibilidades de aplicación.
Diseño paramétrico en software 3D		x		Permite realizar ajustes dimensionales y estructurales de forma rápida y eficiente, optimizando el proceso iterativo de diseño.
Durabilidad y ciclo de vida prolongado		x		Pensar en la máxima durabilidad del sistema facilita el reemplazo de partes individuales y mejora la sostenibilidad general del producto..
Visualización clara de la configuración actual		x		Permite interpretar rápidamente cómo está configurado el molde, lo cual agiliza tanto la planificación como la ejecución del proceso.

Figura 15. Tabla de Requisitos
Fuente: Elaboración Propia

Materialidad

Introducción

La elección de materiales fue un aspecto fundamental en el desarrollo del proyecto, ya que cada componente del sistema requería cumplir funciones específicas dentro de un entorno de laboratorio. El proceso incluyó investigación sobre materiales disponibles localmente, pruebas con técnicas digitales y consultas con especialistas, buscando siempre un equilibrio entre funcionalidad, resistencia y viabilidad de producción.

Material del molde

La estructura de la Matriz fue diseñada para ser fabricada mediante impresión 3D con tecnología FDM*. Todas las piezas fueron modeladas con al menos una cara plana, lo que permitió colocarlas directamente sobre la base de impresión, evitando el uso de soportes y optimizando tiempo y material.

Se utilizó PLA 850, un material con mejoras respecto al PLA convencional. Su resistencia al impacto lo convierte en una opción adecuada para objetos que serán manipulados con frecuencia, especialmente en contextos de laboratorio. Esta elección respondió a la necesidad de contar con un dispositivo duradero, sin requerir materiales industriales más complejos o costosos.

Desarrollo del material para el molde

Para el molde, se buscó un material capaz de soportar altas temperaturas y de ser reutilizado varias veces sin degradarse. En el laboratorio se identificaron dos posibles materiales: el cemento granular y la cordierita. Esta última, comúnmente utilizada como soporte en hornos de fusión de vidrio, presenta buena estabilidad térmica y resistencia mecánica (Sanz Lobo, 2005).

Sin embargo, ambos materiales presentaban un inconveniente: no estaban disponibles en forma fluida, lo que impedía verterlos sobre el dispositivo para copiar su forma con precisión. Esta condición era clave para poder registrar correctamente las geometrías del modelo.

Consulta con especialista y receta cerámica

Ante esta dificultad, se consultó a la ceramista Cecilia Pagliari, quien confirmó que dichos materiales no se comercializan en Uruguay en el formato necesario. Como alternativa, compartió una receta extraída del libro El libro del ceramista de Jorge Fernández Chiti (2000), la cual había utilizado previamente con buenos resultados.

Pastas refractarias (1250-1280°):

Se usan para preparar material de horno (soportes, placas de apoyo, cacetes, crisoles). Debe premarse muy bien la pieza que se haga y se la trabajará con poca humedad. La cocción será prolongada, preferiblemente en horno túnel (si es posible, en ciclo de 20-30 horas). Las placas de horno se fabricarán con un grosor de 2,5 cm. El secado será muy lento.

PASTAS REFRACTARIAS (1250-1280°)					
arcilla blanca	30		24	20	54
caolín	30	25	16	20	16
alúmina		25		20	15,5
chamote	40	30	60	60	16
feldespato					4
talco					20

Quando se precise una pasta refractaria más dura y sonora, se elevará la temperatura de cocción o se prolongará el ciclo de hornada. La última fórmula puede hornarse a 1180°, y da un muy buen refractario usable a temperatura infrarroja, con sales muy blancas y puro (sin hierro). La primera fórmula es óptima para uso standard. Las que contienen alúmina son para servicio a temperaturas muy elevadas (1300°).

Figura 16. Extracción receta Pasta Refractaria del libro "El Libro del Ceramista"
Fuente: Fernández Chiti, J. (1994). El libro del ceramista: Curso de cerámica en un solo tomo (5.ª ed.).

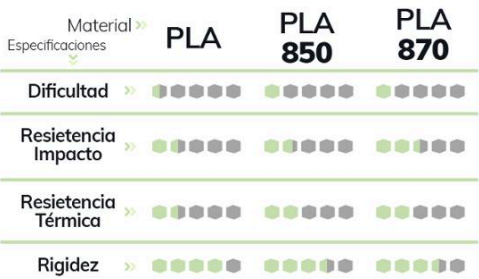


Figura 17. Características del PLA 850
Fuente: Referenciado de <https://www.impresoras3d.com/filamento-pla-consejos-caracteristicas-y-mucho-mas/>



Figura 18. Detalle de Hormigón celular
Fuente: Elaboración propia

FDM: sigla de Fused Deposition Modeling; técnica de fabricación aditiva que construye piezas extruyendo filamento termoplástico fundido capa por capa según un modelo CAD.

Materialidad

La pasta refractaria se formula en base seca con las siguientes proporciones:

- 30 % arcilla plástica Tinkar – aporta cohesión y capacidad de moldeo.
- 30 % caolín – incrementa la refractariedad y la estabilidad dimensional durante el secado.
- 40 % chamote fino – limita la retracción, mejora la porosidad y refuerza la resistencia a altas temperaturas.

Mezclada con poca agua (aproximadamente 16 - 18%), esta fórmula genera una pasta con consistencia vertible que permite reproducir detalles del modelo y, una vez seca y cocida, soporta altas temperaturas sin fracturarse. La mezcla presenta un comportamiento pseudoplástico: mantiene una alta viscosidad, fluye únicamente al aplicarse presión y conserva su forma al no aplicarle presión. Por esta razón, es necesario aplicar un proceso de prensado manual durante el vertido, para asegurar que el material se distribuya correctamente dentro del molde y copie todas las formas.

Una vez moldeada, esta pasta necesita ser cocida previamente en un horno cerámico que alcance los 1190 °C. Solo luego de esta cocción, la mezcla adquiere las propiedades mecánicas y térmicas necesarias para ser utilizada en procesos de fusión de vidrio, funcionando de forma estable como molde refractario.

Curva de temperatura de cocción del molde:

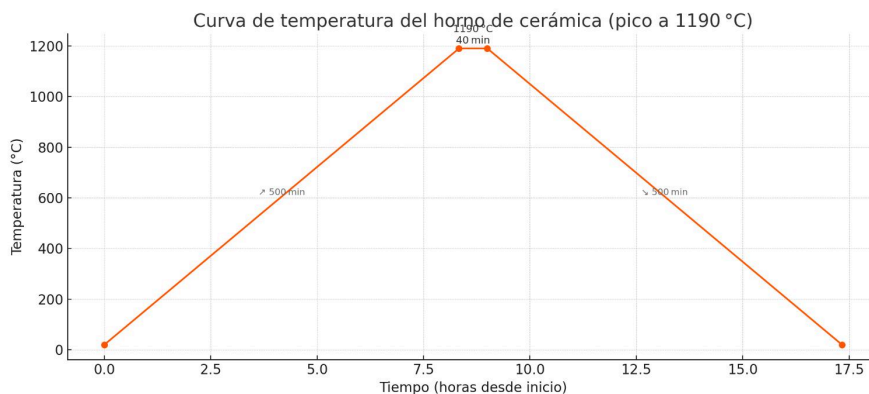


Figura 20. Curva de temperatura Horno de Cerámica (Pilar Irureta)
Fuente: Elaboración Propia, extraída del Laboratorio de Cerámicas



Figura 19. Consistencia de la Pasta Refractaria
Fuente: Elaboración Propia

Proceso de Fabricación Digital

Se utiliza el software Fusion 360 debido a su capacidad de modelado paramétrico, que permite construir geometrías en 3D mediante un historial de operaciones editable. Esto implica que cada paso del diseño queda registrado y puede ser modificado en cualquier momento, lo que facilita ajustes y modificaciones sin necesidad de rehacer el modelo desde cero.



Figura 21. Captura del Software Fusion 360, Línea de Tiempo
Fuente: Elaboración Propia

De este modo, cuando se requiere realizar un cambio en el modelo 3D, basta con editar el dibujo técnico base (Sketch*) para que las modificaciones se propaguen de forma automática al resto del modelo, optimizando así los tiempos de iteración y reduciendo errores en el desarrollo del molde.

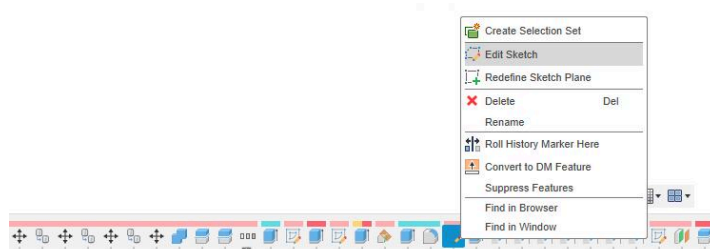


Figura 22. Captura del Software Fusion 360, Función de editar Sketch
Fuente: Elaboración Propia

En la primera parte del proceso se elaboró un primer boceto conceptual, a partir del cual se desarrolló un modelo tridimensional. Este diseño inicial presentaba ciertas complejidades estructurales y funcionales. Estaba compuesto por seis piezas con forma de hexágono que conformaban el molde, acompañadas por un esqueleto metálico externo diseñado para abrirse luego del horneado.

Este esqueleto requería un sistema de apertura mediante uniones articuladas, lo cual implicaba un diseño mecánico adicional y un incremento significativo en los costos de fabricación, dado que debía soportar las altas temperaturas propias del proceso de casting.

El prototipo fue concebido para permitir reconfigurabilidad desde sus seis caras, lo que teóricamente ofrecía un alto grado de versatilidad formal. Sin embargo, esto también introducía dificultades técnicas en la etapa de desmolde, ya que los ángulos de extracción variaban según la posición de cada pieza. Esta condición obligaba a que cada componente tuviera una ubicación fija dentro del conjunto, lo que limitaba la flexibilidad del sistema y contradecía uno de los objetivos principales del proyecto: la intercambiabilidad y modularidad.

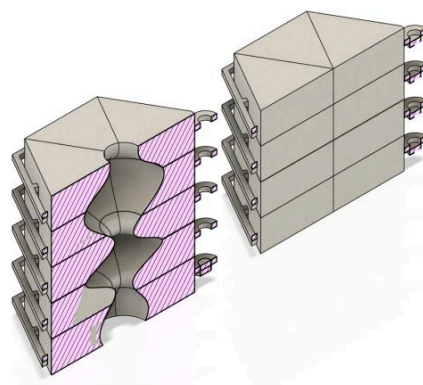


Figura 23. Captura del Software Fusion 360, Primer Prototipo.
Fuente: Elaboración Propia

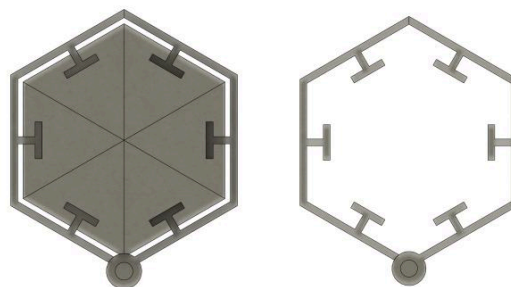


Figura 24. Captura del Software Fusion 360, Primer Prototipo, Vista Inferior
Fuente: Elaboración Propia

Una vez definido el primer prototipo, se procedió al desarrollo del dispositivo que funcionaría como molde para el vertido del cerámico refractario (véase apartado **Materialidad**). Este material, capaz de resistir las altas temperaturas del proceso de casting, debía ser vertido en estado fluido para reproducir con precisión la geometría del positivo interno previamente modelado en 3D.

Sin embargo, este primer diseño digital del molde planteó diversas interrogantes, especialmente en relación con su vinculación al esqueleto metálico externo. Dado que durante el proceso de casting el vidrio adquiere un estado plástico, desciende levemente respecto a su nivel inicial, generando una fuerza descendente que debe ser absorbida por el molde. En este contexto, la unión entre el molde cerámico y el esqueleto metálico requería contemplar tolerancias específicas que permitieran cierto movimiento entre componentes sólidos. Esta precaución buscaba evitar tensiones estructurales que pudieran derivar en la fisura del molde, especialmente durante la fase de compresión del vidrio fundido.

Tras la evaluación del prototipo a nivel digital, surgieron dudas respecto a la viabilidad del sistema y se cuestionó la pertinencia de su complejidad estructural. A partir de estas reflexiones, se retomó la fase de bocetado con el objetivo de simplificar el diseño sin comprometer su funcionalidad. De esta revisión surgió una versión optimizada del dispositivo, que resolvía varias de las problemáticas técnicas detectadas y mejoraba su factibilidad de producción, ensamblaje y uso.

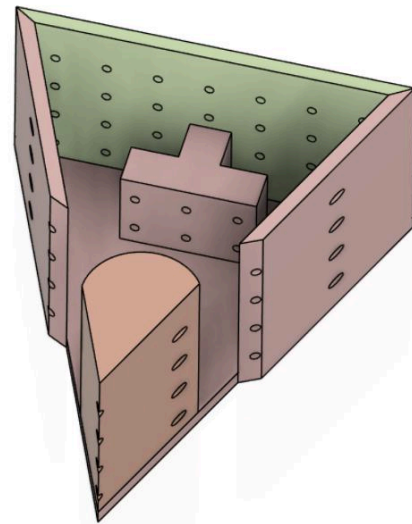


Figura 25. Captura del Software Fusion 360, Primer Prototipo de Matriz.
Fuente: Elaboración Propia

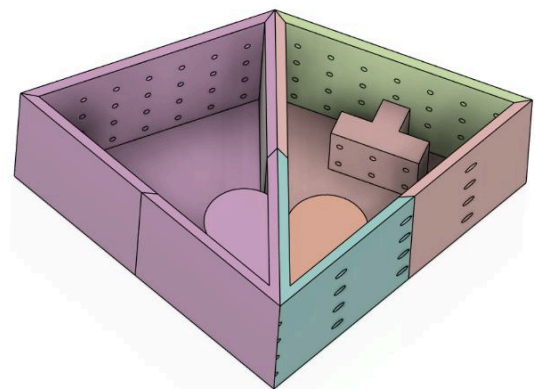


Figura 26. Captura del Software Fusion 360, Primer Prototipo de Matriz.
Fuente: Elaboración Propia

Proyección del Sistema y Desarrollo

Sistema Matriz - Molde - Positivo

El desarrollo del presente proyecto se organiza a partir de tres componentes interrelacionados, como se observa en la figura:

- Matriz (impreso en PLA*):

Es el núcleo funcional del sistema y el principal objeto de estudio de esta investigación se trata de la estructura externa que permite la conformación del molde cerámico mediante el vertido del material refractario. Su diseño modular y reconfigurable posibilita adaptaciones formales sin necesidad de construir un molde nuevo para cada variación, optimizando así recursos materiales y tiempos de producción.

- Molde (fabricado en cerámica refractaria):

Su función es contener el vidrio durante el proceso de casting, resistiendo temperaturas cercanas a los 900 °C. La geometría del molde puede modificarse mediante la reconfiguración de la matriz, lo que permite explorar diferentes configuraciones formales sin alterar la base técnica del sistema.

- Positivo (impreso en PLA 850 o resina):

Representa el resultado final del proceso de fundición. Si bien no constituye el foco central del estudio, su diseño requiere consideraciones específicas como los ángulos de desmolde y el comportamiento del vidrio en estado plástico, ya que estas variables inciden directamente en el rendimiento y la integridad del dispositivo cerámico durante el horneado.

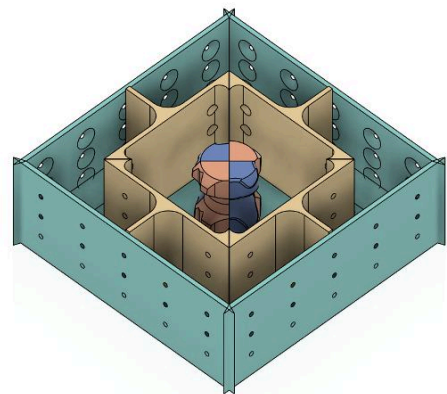


Figura 27. Esquema 3D del Sistema de Matriz
Fuente: Elaboración Propia

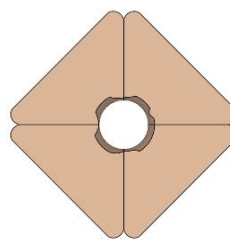


Figura 28. Esquema 3D de Vista Superior del Molde
Fuente: Elaboración Propia

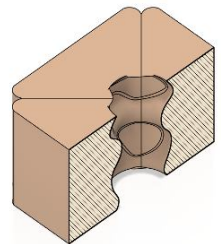


Figura 29. Esquema 3D, Corte del Molde
Fuente: Elaboración Propia

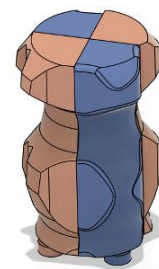
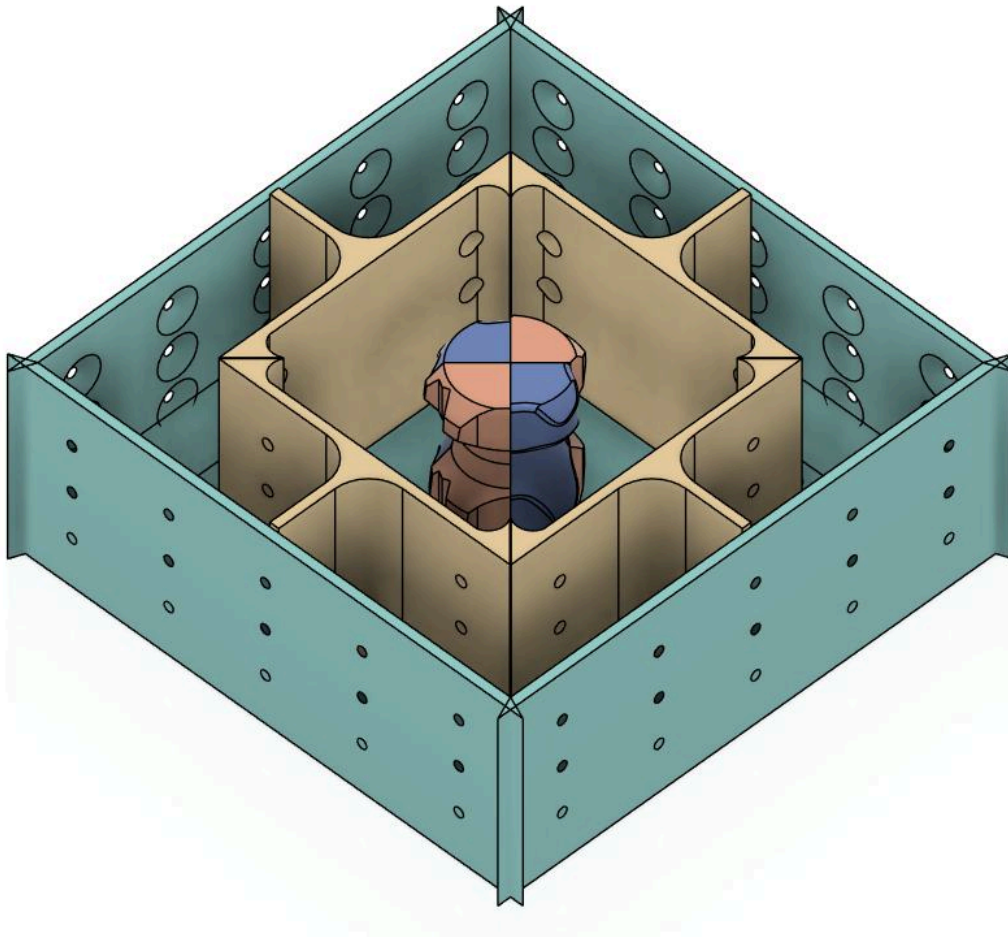


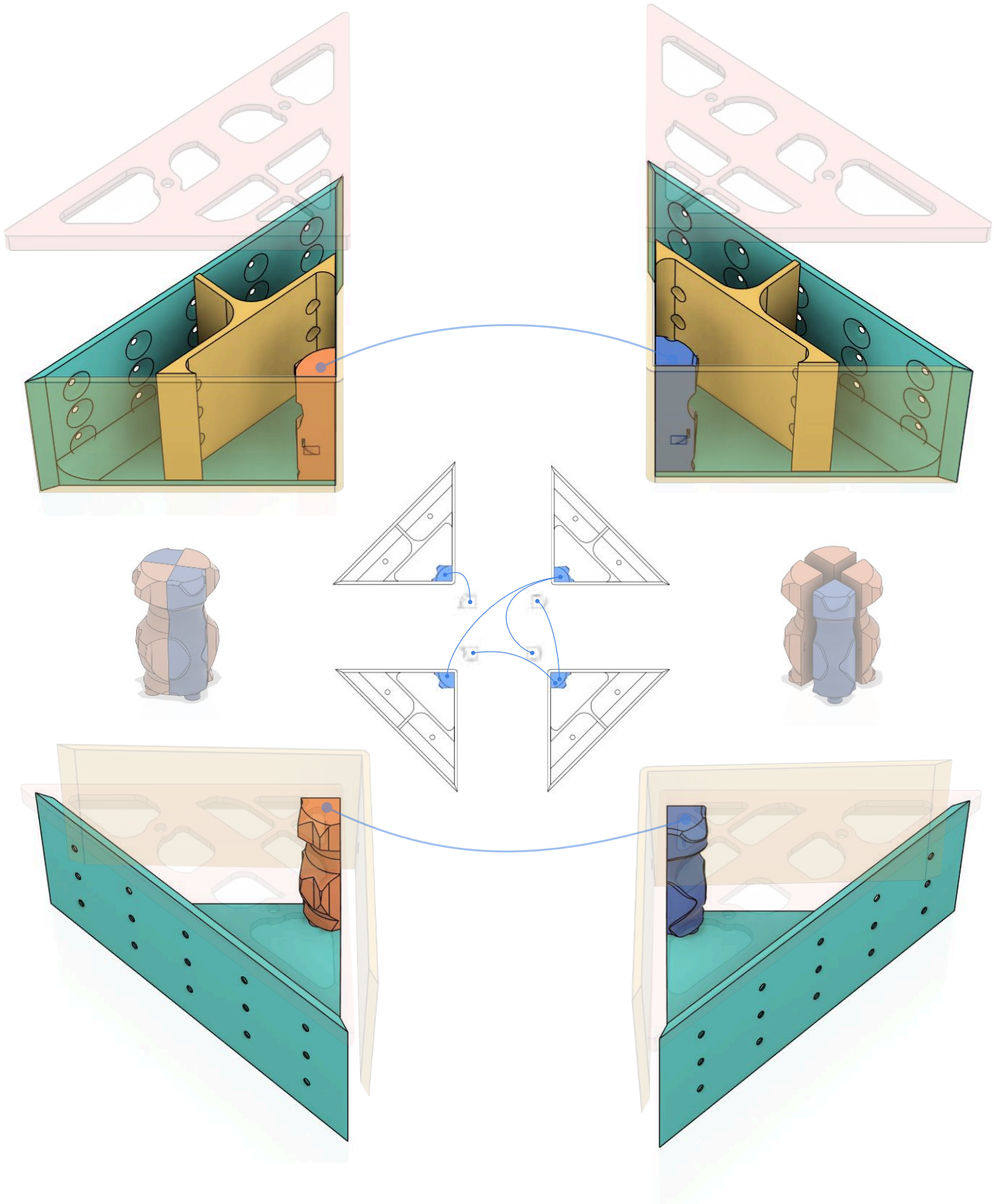
Figura 30. Esquema 3D, Positivo con Piezas Intercaladas
Fuente: Elaboración Propia

Proyección y Fabricación de la Matriz



Proyección y Fabricación de la Matriz

Se proyecta un sistema que permite intercambiar las piezas centrales partiendo de un modelo dividido en cuatro cuadrantes, este sistema permite combinar las definiciones formales del positivo y consiguiendo así un resultado diferente en cada vertido de cerámica.



Proyección y Fabricación de la Matriz

Para la fabricación de la matriz se definió un sistema compuesto por cinco piezas principales, entre las cuales se incluye el positivo. Cada una de estas partes cumple una función específica dentro del armado del conjunto, permitiendo contener el cerámico refractario durante el proceso de vertido y asegurar la correcta geometría del molde final.

Las piezas que conforman el sistema son:

- A4 • Base:** elemento inferior que sostiene y estabiliza el conjunto durante el armado y vertido, además de contener encastre para el positivo.
- A5 • Paredes:** laterales que conforman el volumen externo del molde y evitan el derrame del cerámico refractario.
- A2 • Separador:** componente que define el espesor del molde y la cantidad de material vertida.
- A3 • Positivo:** pieza central que define la forma interna deseada del molde.
- A1 • Tapa:** parte superior que permite contener el material y cerrar el conjunto, garantizando la compresión del cerámico en el volumen deseado.

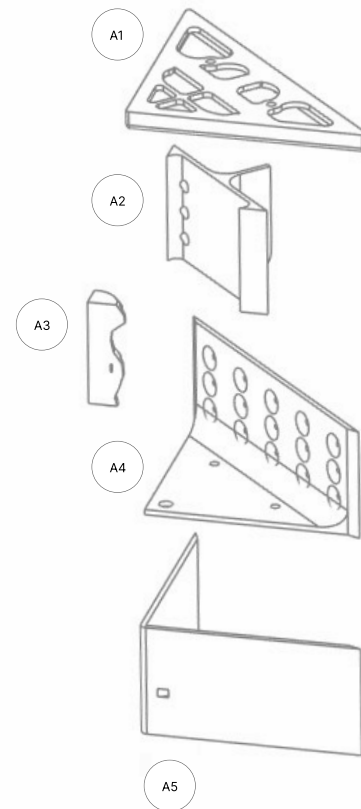
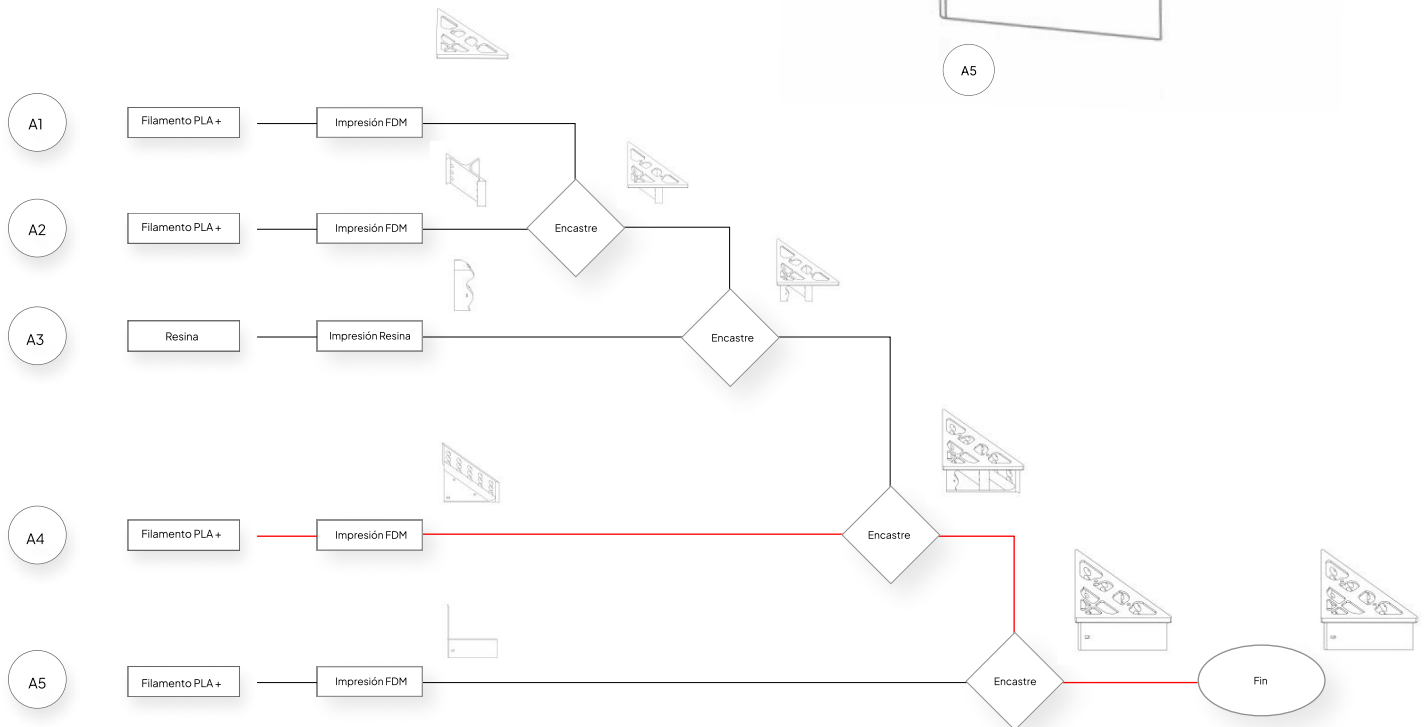
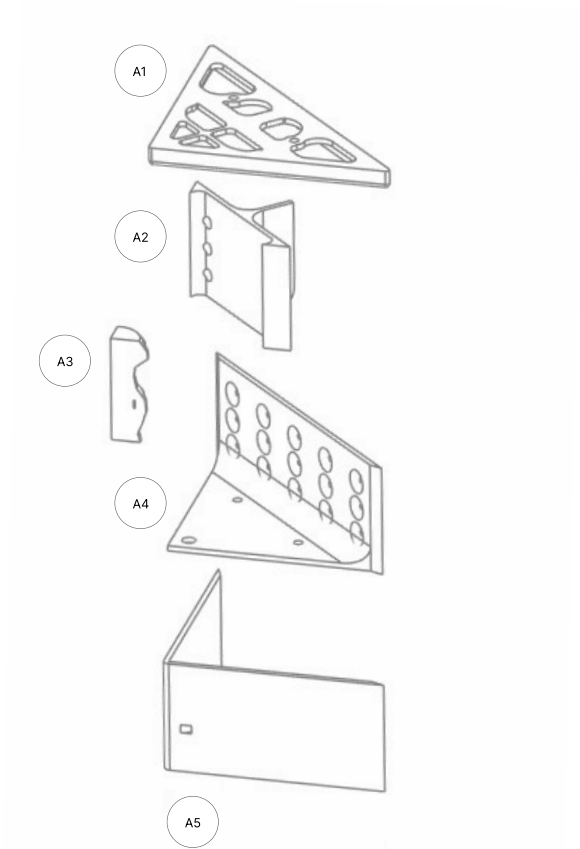
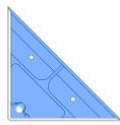


Figura 32. Esquema 3D, Vista Explotada de las piezas de la Matriz
Fuente: Elaboración Propia

Diagrama de Flujo



La Base



La base cumple una doble función estructural: actúa como plataforma de apoyo del conjunto y enmarca una de las paredes del molde, garantizando su estabilidad durante el proceso de vertido. Esta pieza fue diseñada considerando tanto los requerimientos geométricos del sistema como las condiciones del proceso de fabricación digital. Se imprimirá en PLA+, un material plástico biodegradable compatible con impresoras FDM.

Las decisiones de diseño implementadas en esta pieza son las siguientes:

- 1. Huecos en la pared vertical:** se incorporaron sustracciones circulares en el plano vertical que generan aberturas laterales. Estas aberturas están destinadas a permitir el paso de insumos cilíndricos, como alambres o varillas, que funcionarán como tomas de aire para la pieza de cerámica resultante.
- 2. Ángulo de 45 grados en la unión con las paredes:** se definió una inclinación de 45° en los extremos de contacto con las paredes laterales. Esta decisión favorece el acople entre componentes y mejora la continuidad estructural del molde una vez ensamblado.
- 3. Guías para apilamiento:** se diseñaron dos alojamientos cilíndricos que, en conjunto con elementos equivalentes en la tapa, permiten el paso de una varilla metálica de 6mm de diámetro (acero o hierro). Esta varilla funcionará como guía de alineación en caso de que se desee apilar varios moldes cerámicos, asegurando que las piezas queden correctamente enfrentadas.
- 4. Unión base-positivo:** se incorporó un encastre cilíndrico en la superficie superior de la base que permite fijar la posición del positivo dentro del molde. Esta unión, combinada con el sistema de precintos previsto en las paredes laterales, otorga rigidez al conjunto e impide que el positivo se desplace durante el vertido del cerámico fresco.

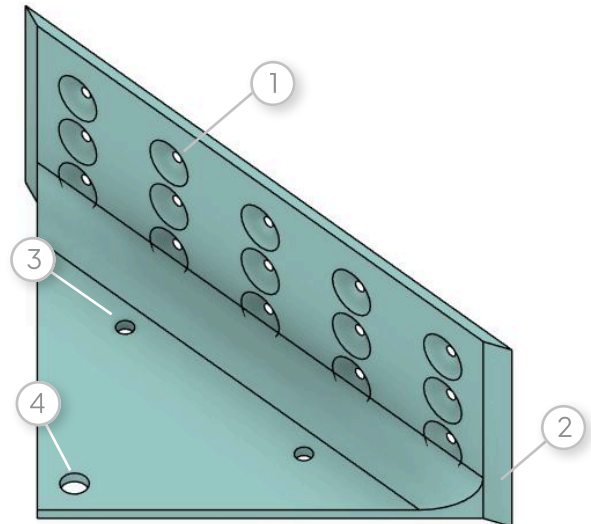


Figura 33. Esquema 3D, Base con detalles
Fuente: Elaboración Propia

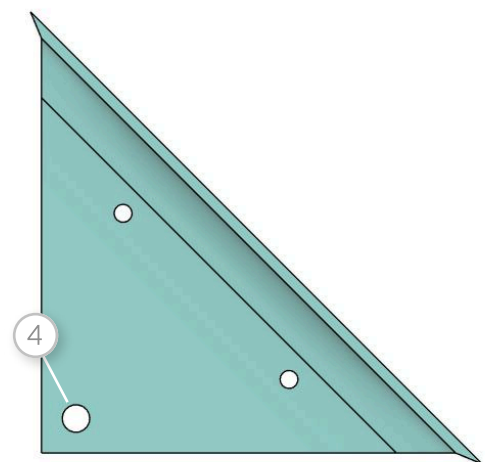


Figura 34. Esquema 3D, Base con detalles
Fuente: Elaboración Propia

Dimensiones Generales y Fotografías

Fotografías

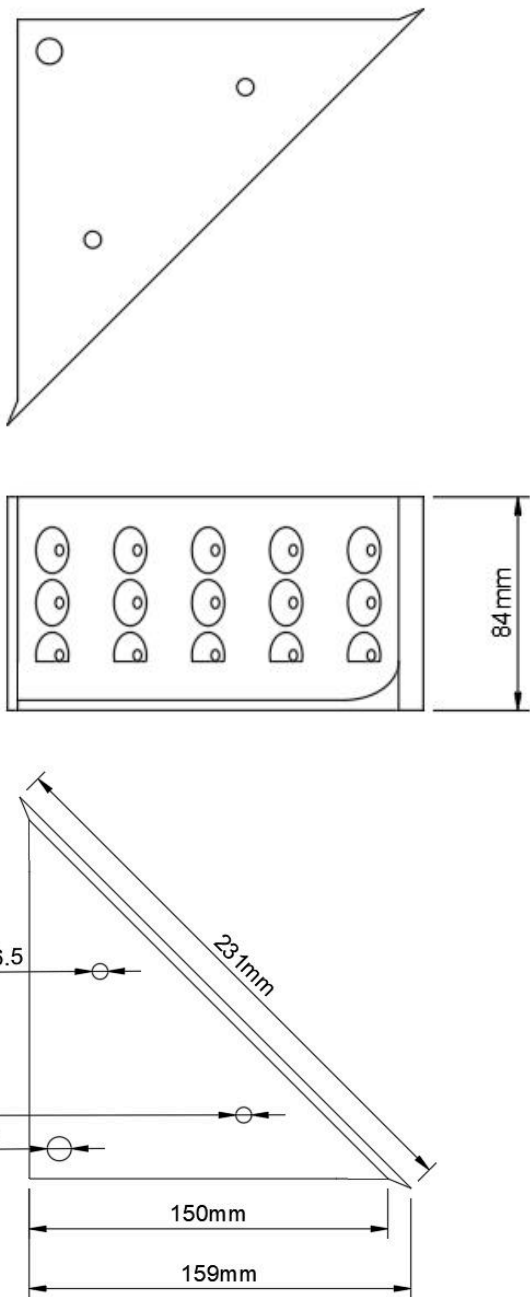
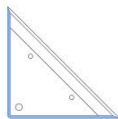


Figura 35. Fotografía de la Base
Fuente: Elaboración Propia



Figura 36. Fotografía de la Base
Fuente: Elaboración Propia

Paredes



Las paredes del molde presentan dos características fundamentales que aseguran la estabilidad del conjunto y la correcta contención del material durante el vertido del cerámico refractario.

1. Canal para precinto de sujeción: se diseñó un orificio que, en conjunto con una geometría correspondiente en el positivo, conforma un canal pasante visible en los cortes técnicos. Este canal permite insertar un precinto plástico que actúa como mecanismo de sujeción, ejerciendo presión sobre el positivo y manteniéndolo en contacto con las paredes. Esta presión, combinada con el encastre cilíndrico de la base, estabiliza todo el sistema y evita que el positivo se separe de las paredes durante el vertido del cerámico en estado plástico.

2. Ángulo de 45 grados en la unión con la base: las paredes cuentan con una inclinación de 45° donde conecta con la base, diseñada para acoplarse con precisión al ángulo correspondiente en la base. Esta decisión mejora la alineación entre piezas y refuerza la continuidad estructural del conjunto.

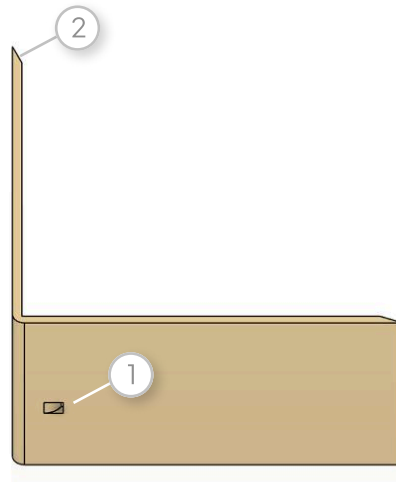


Figura 37. Esquema 3D, Paredes con detalles
Fuente: Elaboración Propia

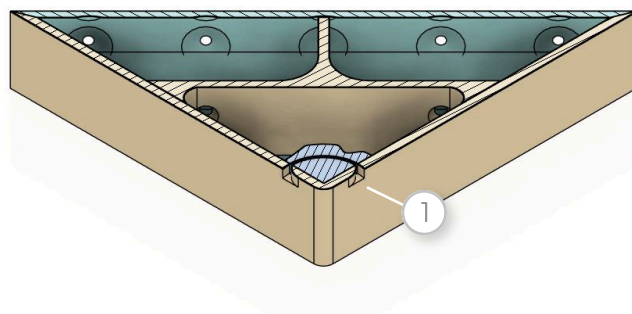


Figura 38. Esquema 3D, Paredes con detalles y corte
Fuente: Elaboración Propia

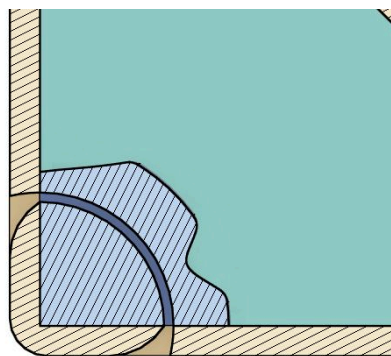


Figura 39. Esquema 3D, Paredes con detalles de corte
Fuente: Elaboración Propia

Dimensiones Generales y Fotografías

Fotografías

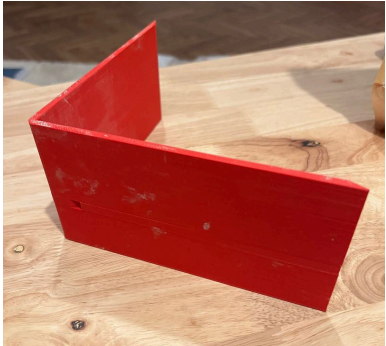
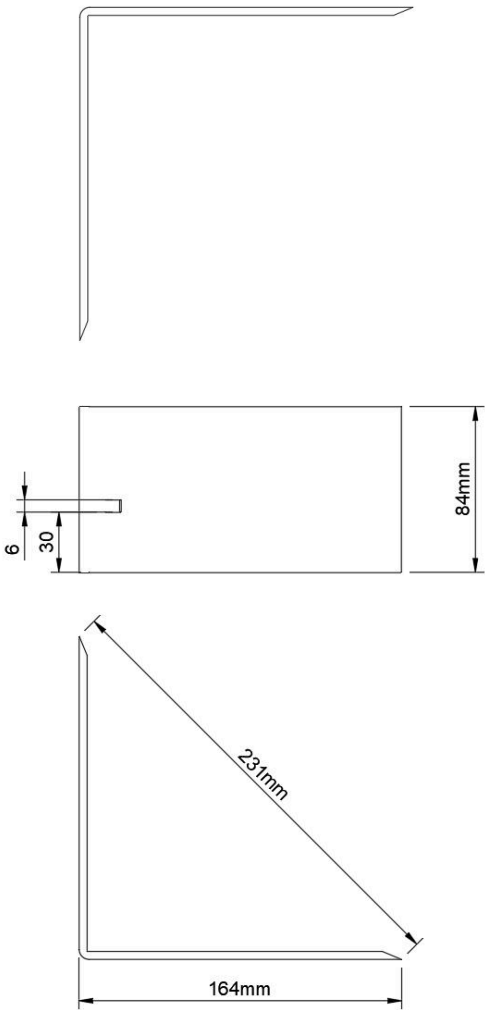


Figura 40. Fotografía Paredes
Fuente: Elaboración Propia

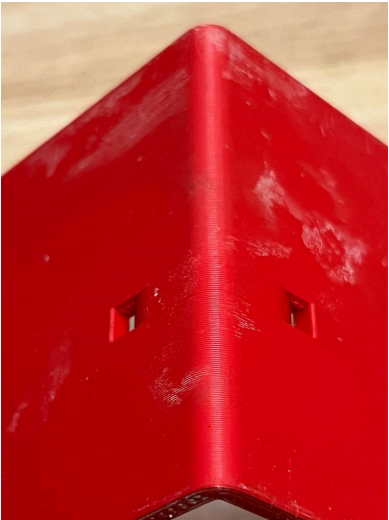
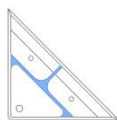


Figura 41. Fotografía de detalle del orificio
Fuente: Elaboración Propia



Figura 42. Fotografía de detalle del orificio
Fuente: Elaboración Propia

A2 Separador



El separador fue diseñado como una pieza auxiliar con una función específica: reducir el volumen interno del molde cuando se utilizan positivos de menor tamaño. El molde completo tiene una dimensión externa de 24,8 x 24,8 cm, pensada para aprovechar al máximo el espacio disponible dentro del horno de menor tamaño, permitiendo una manipulación segura y eficiente durante el proceso de horneado.

Sin embargo, en situaciones donde el positivo presenta dimensiones reducidas, no resulta necesario llenar completamente el molde con cerámico refractario, lo que implicaría un desperdicio de material y un aumento innecesario en los tiempos de secado y horneado. Frente a esta problemática, se diseñó el separador como una solución modular que permite ajustar el volumen interno del molde, adaptándolo a diferentes tamaños de positivos y optimizando el uso de material.

Este componente presenta los siguientes elementos funcionales:

- 1. Aberturas alineadas con la base:** se incorporaron perforaciones que coinciden con los orificios de la base, permitiendo el paso de insumos cilíndricos destinados a funcionar como tomas de aire en el molde cerámico resultante.
- 2. Tope de posicionamiento:** una pieza perpendicular actúa como tope estructural, encajando con la base y garantizando que el separador se mantenga en la posición deseada durante el vertido.
- 3. Sistema de encastre con la tapa:** el diseño incluye un encastre superior que permite fijar el separador a la tapa del molde, asegurando su estabilidad vertical durante el proceso (ver apartado Tapa).

El separador contribuye a la versatilidad del sistema, permitiendo adaptarse a distintos formatos de producción sin comprometer la eficiencia ni la funcionalidad del molde.

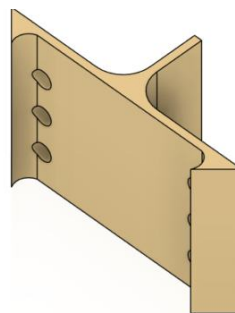


Figura 43. Esquema 3D, Separador
Fuente: Elaboración Propia

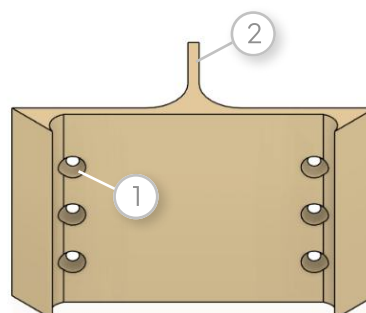


Figura 44. Esquema 3D, Separador con detalles
Fuente: Elaboración Propia

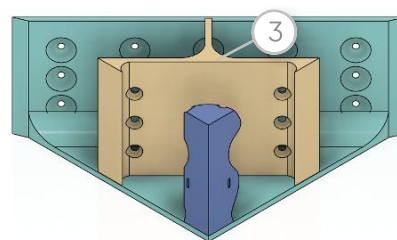


Figura 45. Esquema 3D, Separador con detalles y unión con base
Fuente: Elaboración Propia

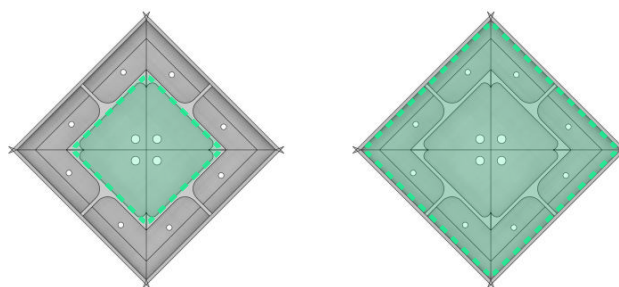
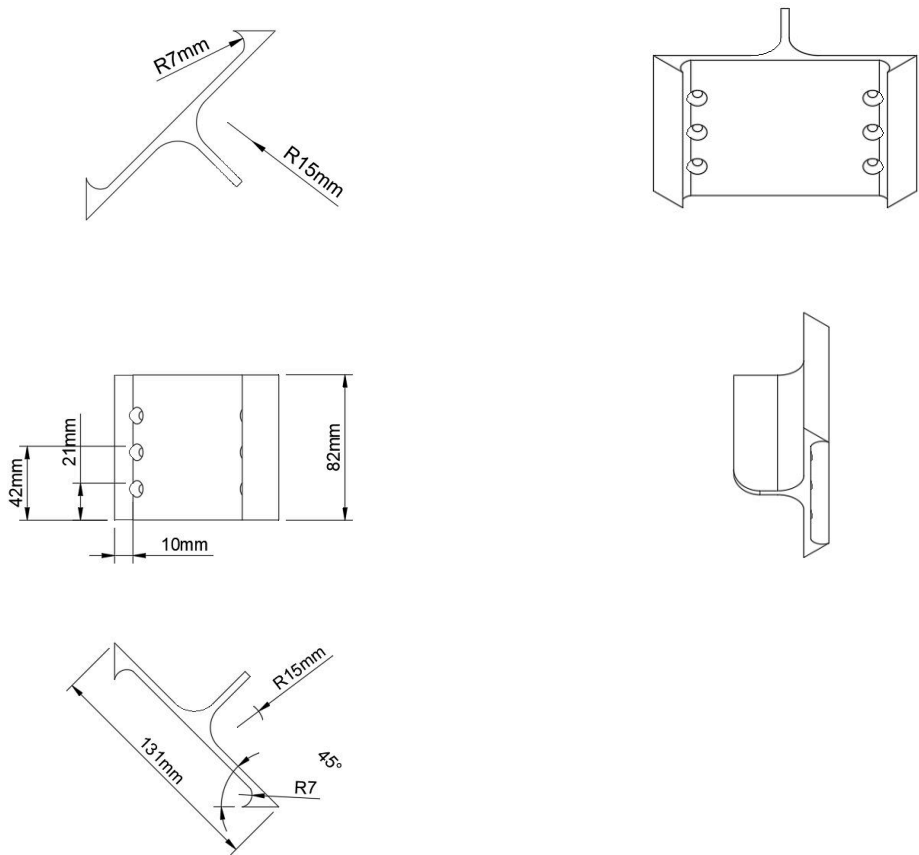


Figura 46. Esquema, Matriz en sus dos configuraciones, con y sin Separador
Fuente: Elaboración Propia

Dimensiones Generales y Fotografías



Fotografías



Figura 47. Fotografía del Separador

Fuente: Elaboración Propia



Figura 48. Fotografía del Separador

Fuente: Elaboración Propia



Figura 49. Fotografía del Separador

Fuente: Elaboración Propia

Tapa



La tapa fue diseñada para cumplir tres funciones principales dentro del sistema de molde.

1. Permitir la respiración del material:

se incorporaron aberturas superiores que permiten la liberación de aire y vapor durante el fraguado del cerámico refractario. Esta es la única pieza del conjunto que contempla esta condición, lo que la convierte en un componente clave para asegurar un curado adecuado del material y evitar acumulaciones de presión interna.

2. Alojjar elementos estructurales adicionales:

la geometría de la tapa contempla espacios específicos para futuras implementaciones, como guías de varillas metálicas que permitirían el apilado vertical de los moldes cerámicos, y un sistema de encastre diseñado para fijar el separador en su posición. Este encastre asegura que el separador permanezca estable durante el proceso de vertido, evitando desplazamientos no deseados.

3. Asegurar la estabilidad del conjunto:

la tapa actúa como cierre superior del sistema, manteniendo todas las piezas unidas y garantizando que el molde no se desarme durante el llenado con cerámico fresco. Su correcta colocación y ajuste con las demás piezas proporciona rigidez estructural y contención volumétrica, esenciales para el éxito del proceso.

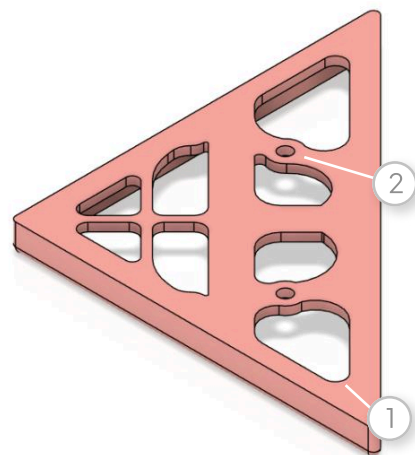


Figura 50. Esquema 3D, Tapa con detalles
Fuente: Elaboración Propia

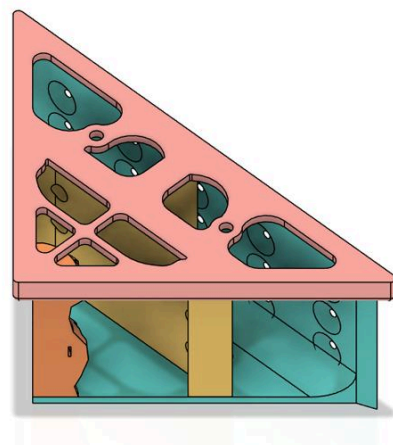
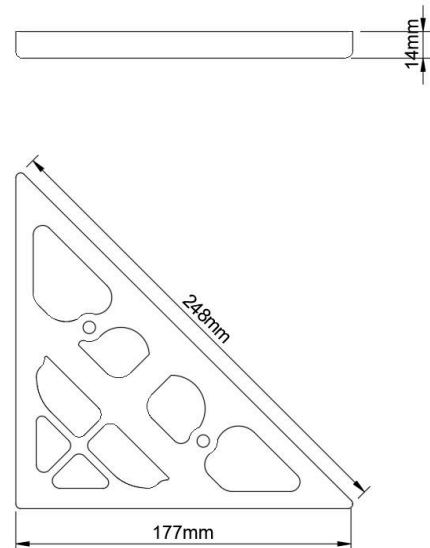
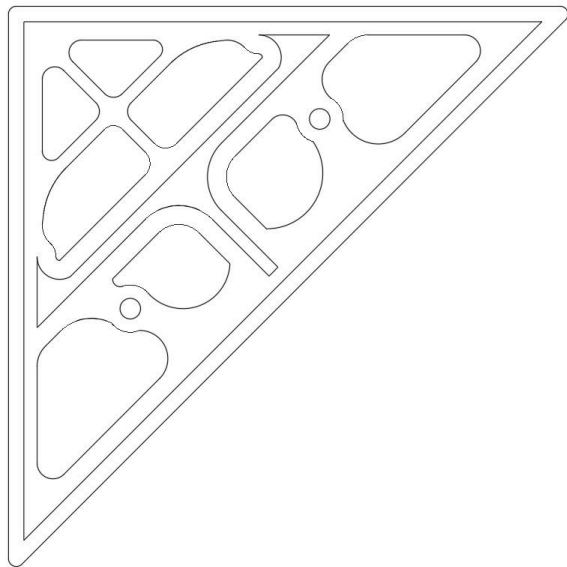


Figura 51. Esquema 3D, Encastre con demás piezas
Fuente: Elaboración Propia



Figura 52. Esquema 3D, detalle encastre con separador
Fuente: Elaboración Propia

Dimensiones Generales y Fotografías



Fotografías



Figura 53. Fotografía de la pieza Tapa
Fuente: Elaboración Propia

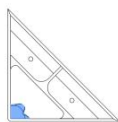


Figura 54. Fotografía de la pieza Tapa
Fuente: Elaboración Propia



Figura 55. Fotografía de la pieza Tapa
Fuente: Elaboración Propia

Positivo



Durante el desarrollo del sistema se proyectaron tres prototipos de positivo con el objetivo de testear diferentes formalidades del conjunto y la viabilidad técnica del proceso de casting. Aunque el positivo no constituye el foco conceptual del proyecto, su correcta definición geométrica resulta fundamental para el funcionamiento de la matriz y del molde cerámico.

Las características que se tuvieron en cuenta para su diseño son las siguientes:

1. Canal para precinto de sujeción:

el positivo incorpora un canal longitudinal que permite el paso de un precinto plástico, el cual presiona la pieza contra las paredes internas del molde durante el vertido del cerámico, asegurando su fijación y evitando desplazamientos (ver figura 55).

2. Encastres inferiores con la base:

en la parte inferior del positivo se diseñaron tres puntos de anclaje que permiten su correcta alineación y fijación respecto a la base del molde. Estos encastres garantizan la repetibilidad del proceso y mejoran la estabilidad estructural del sistema.

3. División modular en cuatro cuadrantes:

la pieza fue diseñada considerando la estructura del molde cerámico, compuesto por cuatro cuartos. Esta lógica se traduce en una geometría divisible que puede ser analizada o combinada desde una perspectiva modular.

4. Capacidad de apilamiento:

el volumen del positivo fue proyectado para permitir su conexión vertical con otros positivos. Esto se traduce en una continuidad formal entre la base y el tope de cada pieza, habilitando configuraciones escultóricas o seriadas a partir de una misma lógica de encastré.

5. Optimización de los ángulos de desmolde:

como se destaca en la figura con líneas rojas, se ajustaron los perfiles laterales y superiores del positivo para permitir una extracción segura tanto del molde cerámico como de la pieza final de vidrio. Estos ángulos fueron definidos para evitar zonas de atrapamiento, facilitar el desmolde y minimizar el riesgo de fracturas durante la extracción.

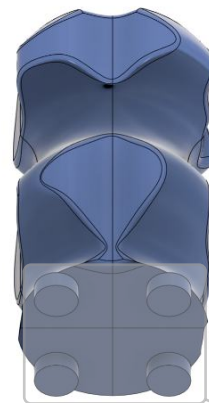


Figura 56. Esquema 3D, Positivo, Unión con la Base
Fuente: Elaboración Propia

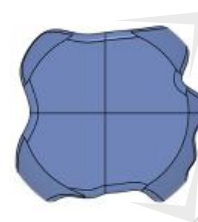


Figura 57. Esquema 3D, Positivo, Ángulos de desmolde
Fuente: Elaboración Propia

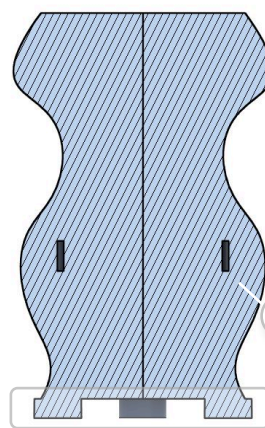


Figura 58. Esquema 3D, Positivo, Detalle de corte
Fuente: Elaboración Propia

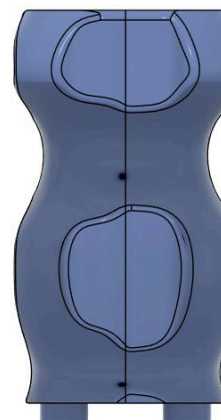


Figura 59. Esquema 3D, Positivo, Ángulos de desmolde
Fuente: Elaboración Propia

Positivo

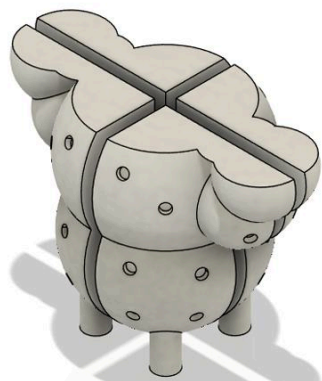


Figura 60. Esquema 3D, Positivo 1
Fuente: Elaboración Propia



Figura 61. Esquema 3D, Positivo 1
Fuente: Elaboración Propia



Figura 62. Esquema 3D, Positivo 2
Fuente: Elaboración Propia

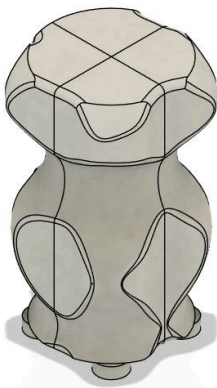


Figura 63. Esquema 3D, Positivo 2
Fuente: Elaboración Propia

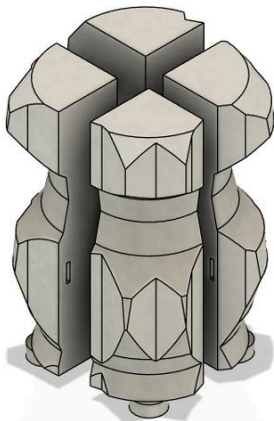


Figura 64. Esquema 3D, Positivo 3
Fuente: Elaboración Propia

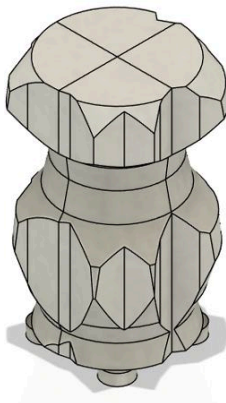


Figura 65. Esquema 3D, Positivo 3
Fuente: Elaboración Propia

Fotografias



Figura 66. Fotografía 1 cuadrante Positivo 1

Fuente: Elaboración Propia



Figura 67. Fotografía, cuadrantes Positivo 1

Fuente: Elaboración Propia



Figura 68. Fotografía, cuadrantes Positivo 3

Fuente: Elaboración Propia



Figura 69. Fotografía, cuadrantes, Positivo 3

Fuente: Elaboración Propia



Figura 70. Fotografía, Positivos 2 y 3

Fuente: Elaboración Propia



Figura 71. Fotografía, cuadrantes Positivo 2 y 3

Fuente: Elaboración Propia

Proyección del Sistema y Desarrollo

Sistema Matriz - Molde - Positivo

El desarrollo del presente proyecto se organiza a partir de tres componentes interrelacionados, como se observa en la figura:

- Matriz (impreso en PLA*):

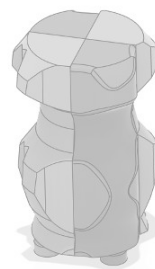
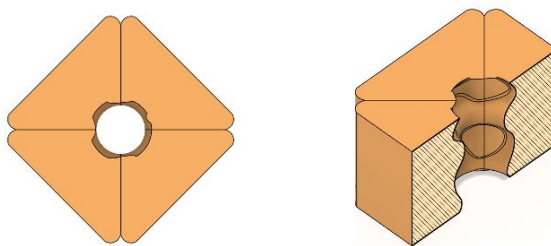
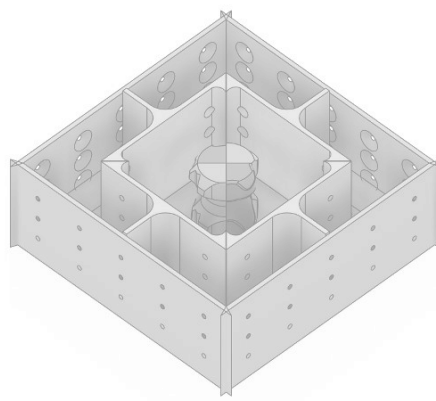
Es el núcleo funcional del sistema y el principal objeto de estudio de esta investigación se trata de la estructura externa que permite la conformación del molde cerámico mediante el vertido del material refractario. Su diseño modular y reconfigurable posibilita adaptaciones formales sin necesidad de construir un molde nuevo para cada variación, optimizando así recursos materiales y tiempos de producción.

- Molde (fabricado en cerámica refractaria):

Su función es contener el vidrio durante el proceso de casting, resistiendo temperaturas cercanas a los 900 °C. La geometría del molde puede modificarse mediante la reconfiguración de la Matriz, lo que permite explorar diferentes configuraciones formales sin alterar la base técnica del sistema.

- Positivo (impreso en PLA 850 o resina):

Representa el resultado final del proceso de fundición. Si bien no constituye el foco central del estudio, su diseño requiere consideraciones específicas como los ángulos de desmolde y el comportamiento del vidrio en estado plástico, ya que estas variables inciden directamente en el rendimiento y la integridad del dispositivo cerámico durante el horneado.



Molde

El Molde final retoma principios estructurales del prototipo 1.0, pero los refina y simplifica para alcanzar una solución más eficiente, versátil y funcional.

El sistema se basa en una lógica de cortes modulares, que permiten configurar distintas geometrías a partir de un mismo conjunto de piezas (ver apartado Reconfigurabilidad). Esta estrategia no solo facilita la personalización del volumen de las piezas producidas, sino que también habilita su apilamiento vertical, ampliando las posibilidades productivas del sistema.

La imagen muestra el ensamble completo del molde, compuesto por cuatro sectores de paredes. Cada bloque que conforma el molde posee un diseño diferente dependiendo del positivo copiado en el proceso de fraguado del cerámico, lo que permite su reutilización en diferentes posiciones. Este es el factor de reconfigurabilidad explicado en el apartado de modularidad y es lo convierte en un molde reconfigurable.

El Positivo central —visible en sección— se proyecta como un volumen continuo que puede variar en altura, lo cual responde a dos objetivos principales:

1. Explorar diferentes configuraciones formales a partir de una misma base modular.
2. Permitir la fabricación de piezas apilables o con continuidad vertical, lo que amplía el espectro funcional del molde.

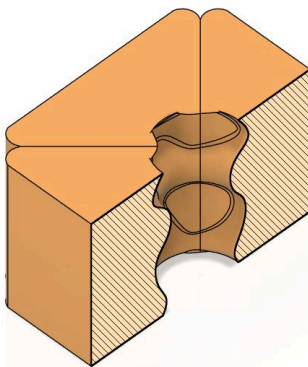


Figura 72. Esquema 3D, Corte del molde mostrando el negativo del positivo 3
Fuente: Elaboración Propia

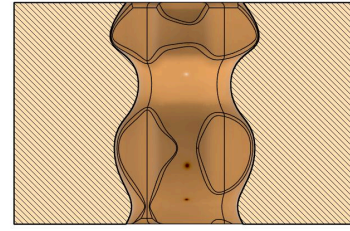


Figura 73. Esquema 3D, Corte del molde mostrando el negativo del positivo 3
Fuente: Elaboración Propia

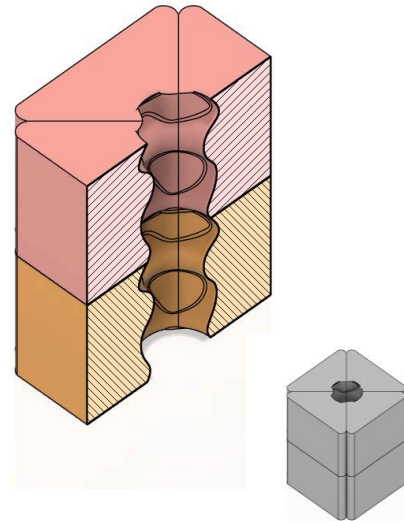


Figura 74. Esquema 3D, Corte del molde mostrando capacidad de apilamiento
Fuente: Elaboración Propia

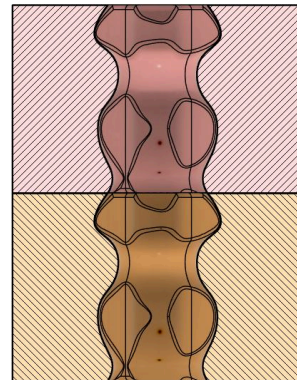
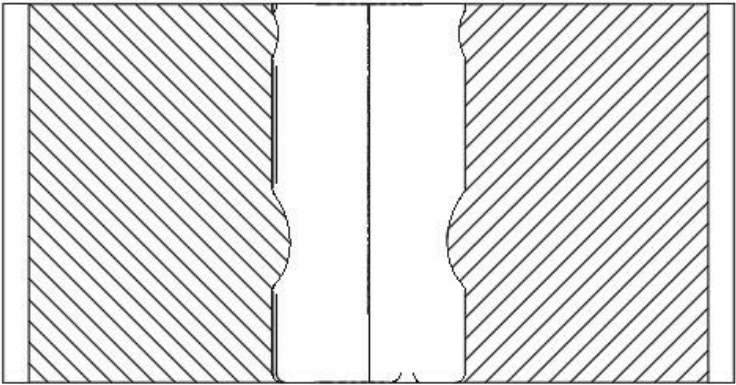
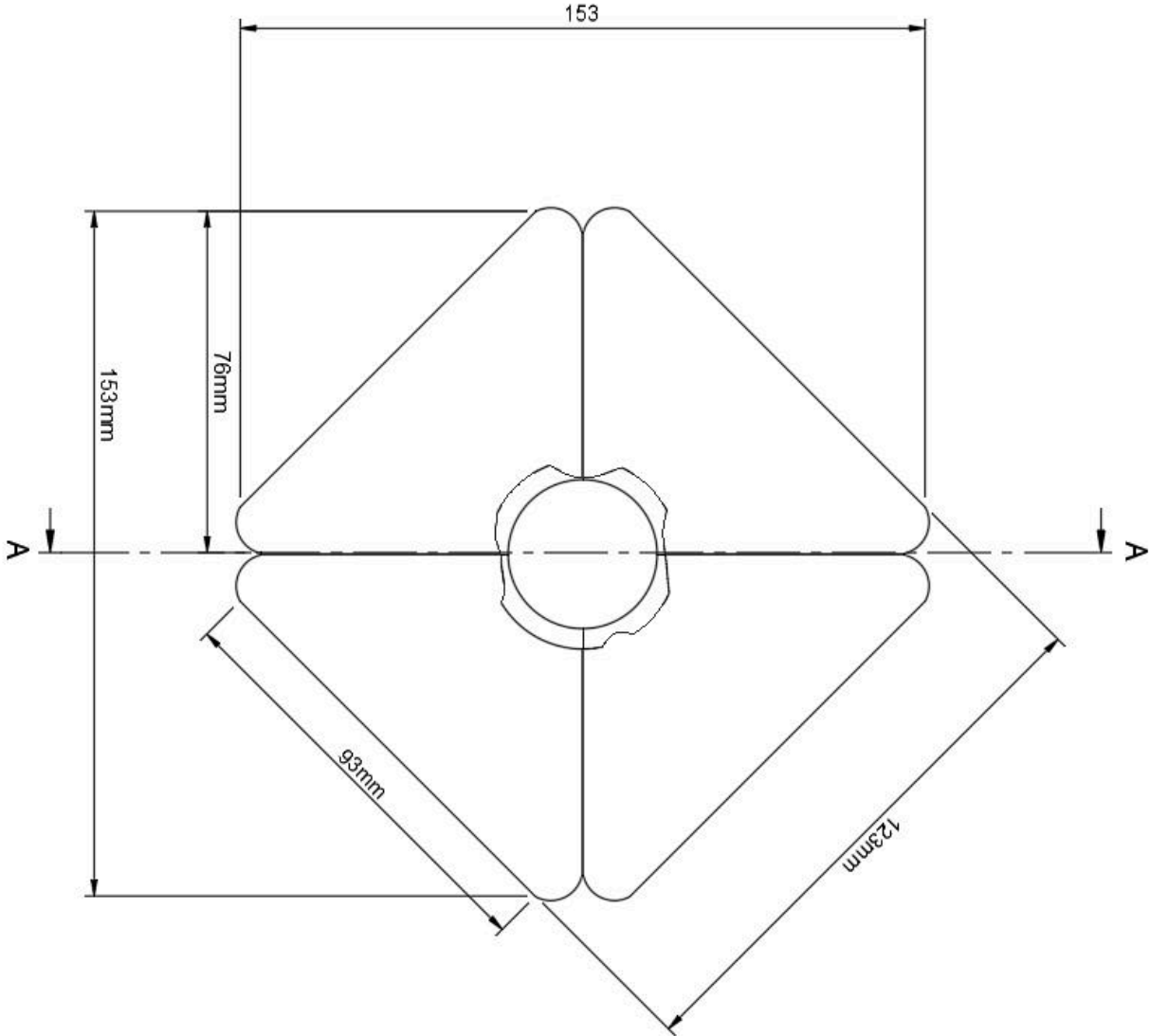


Figura 75. Esquema 3D, Corte del molde mostrando el negativo del positivo 3
Fuente: Elaboración Propia

Dimensiones



A-A (1)

Reconfigurabilidad

El término reconfigurabilidad refiere a la capacidad de un sistema, dispositivo o estructura de modificar su configuración interna o externa sin necesidad de ser completamente reconstruido. En el campo del diseño y la fabricación, esta cualidad está vinculada a la adaptabilidad funcional, la optimización de recursos y la versatilidad formal, permitiendo ajustar el sistema a diferentes necesidades o contextos de uso con mínimas intervenciones estructurales.

Desde una perspectiva técnica, la reconfigurabilidad implica la existencia de módulos, componentes o piezas intercambiables que, al ser combinados o desplazados, generan nuevas configuraciones. Esta lógica ha sido aplicada históricamente en sistemas mecánicos, arquitectónicos e industriales, y recientemente ha cobrado relevancia en procesos de producción artesanal y semi-industrial en base al desarrollo de tecnologías digitales de modelado y fabricación.

En el marco del proyecto presentado, la reconfigurabilidad se manifiesta como eje central del sistema de moldeo propuesto. El molde cerámico, fabricado a partir de un molde modular y reutilizable, permite modificar su forma interna sin la necesidad de producir un nuevo molde desde cero. Esto se logra mediante un conjunto de piezas ensamblables que pueden ser intercambiadas o reordenadas para generar distintas configuraciones geométricas del volumen de fundición (ver figura 76 y 79).

La reconfigurabilidad en este sistema actúa en dos niveles fundamentales:

1. Reconfiguración de la Matriz:

La Matriz está compuesta por una base, paredes modulares, tapa y separadores, todos fabricados con impresión 3D en PLA+. Esta construcción modular permite cambiar las dimensiones internas del molde, adaptar el volumen de cerámico a verter según la escala del positivo, y experimentar con formas diversas manteniendo la estructura base constante. De esta forma, una misma base de producción permite generar múltiples dispositivos cerámicos con geometrías diferenciadas.

2. Reconfiguración del positivo:

como se observa en las figuras 77 y 78, el positivo fue diseñado a partir de una lógica segmentada en cuadrantes, lo que habilita su descomposición formal y su modificación interna. Además, su geometría está preparada para la apilabilidad, lo que permite pensar en configuraciones verticales en serie que combinan múltiples piezas (figura 76). Esta posibilidad abre una vía para la creación de composiciones modulares en vidrio reciclado, potenciando la expresividad formal y funcional de las piezas finales.

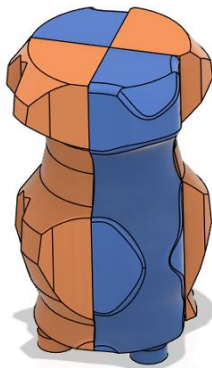


Figura 76. Esquema 3D, Positivo 2 con cuadrantes del positivo 3
Fuente: Elaboración Propia



Figura 77. Esquema 3D, Positivo 3
Fuente: Elaboración Propia



Figura 78. Esquema 3D, Positivo 2
Fuente: Elaboración Propia

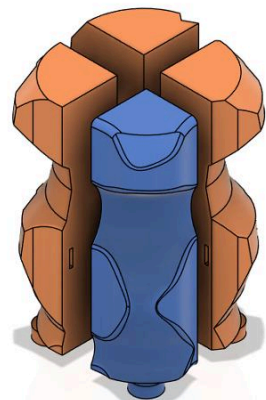


Figura 79. Esquema 3D, Positivo 2 con 1 cuadrante del positivo 3
Fuente: Elaboración Propia

La propuesta se inscribe dentro de una línea de pensamiento ya abordada en experiencias previas.

En Diagnóstico del residuo de vidrio hueco centrado en su recircularización en el contexto local (Amorín & Frabasile, 2024) se subraya la necesidad de desarrollar tecnologías apropiadas que permitan reutilizar sistemas en contextos de baja escala, donde los recursos son limitados pero la creatividad proyectual es alta. La capacidad de adaptar un molde sin desecharlo después de cada uso constituye una innovación crítica para viabilizar procesos sostenibles y económicamente accesibles.

Asimismo, Lab de vidrio. Bitácora (Amorín et al., 2020) enfatiza la importancia de contar con herramientas que faciliten la experimentación formal sin depender de infraestructura industrial compleja. Ambos antecedentes refuerzan la pertinencia de un molde reconfigurable capaz de ajustarse sin ser desechado, alineando sostenibilidad, economía y flexibilidad proyectual.

Desde una mirada metodológica, el concepto de reconfigurabilidad también aparece vinculado a los sistemas de fabricación multipunto y moldes adaptativos, donde se destaca la posibilidad de modificar parámetros formales sin reconstrucciones completas, algo que aquí se traduce al campo del casting con vidrio reciclado.

Impacto proyectual y productivo

El sistema propuesto se presenta, por tanto, como una **plataforma de exploración formal**, donde la forma final del vidrio no depende de un molde único e irrepetible, sino de un conjunto de decisiones reconfigurables que se pueden ajustar, rotar o combinar según los objetivos del proyecto. Esto representa una apertura metodológica relevante para el diseño con materiales reciclados, que suele estar condicionado por herramientas rígidas y poco adaptables.

Además, esta lógica permite **reducir significativamente los costos** asociados a la fabricación de moldes y disminuir la generación de residuos, ya que se evita la destrucción sistemática del molde luego de cada ciclo de producción.

Esto convierte a la reconfigurabilidad en un principio no solo proyectual, sino también ético y sostenible.

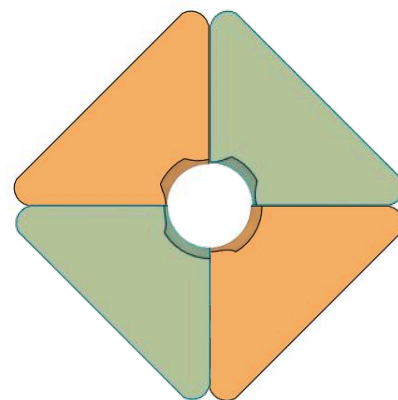


Figura 80. Esquema 3D. Molde con dos piezas negativas del positivo 2 y dos del positivo 3
Fuente: Elaboración Propia

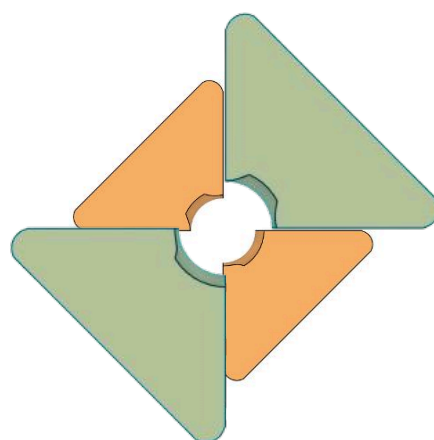


Figura 81. Esquema 3D. Molde con dos piezas negativas del positivo 2 y dos del positivo 3, coladas sin el separador
Fuente: Elaboración Propia

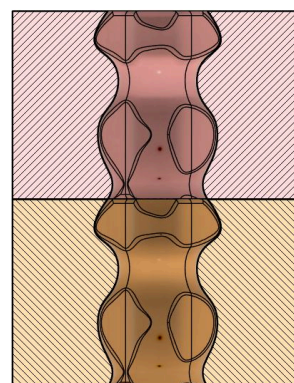


Figura 82. Esquema 3D. Modularidad Vertical
Fuente: Elaboración Propia

Proceso de Fabricación



Figura 83. Fotografía, Molde luego de horneado con Positivo de molienda de Vidrio Hueco sin desmoldar
Fuente: Elaboración Propia

Proceso de Fabricación

Para la fabricación del sistema proyectado primero se procedió a imprimir los moldes en el material seleccionado PLA 850, se hizo con el proveedor Rincón Maker.

La impresión salió de buena calidad en el primer intento gracias a las consideraciones tenidas al momento del planteo y diseño digital.

Tabla de Insumos	Proveedor	Precio	Cantidad
Precintos 3.6x150mm	Ferreteria Ferremundo	\$ 120	100
Arcilla Tinkar Z Molida	Yaro 975	\$ 118	1Kg
Caolín Sur del Río	Yaro 975	\$ 162	1Kg
Chamote Fino	Comaco	\$ 423	5Kg

Figura 83. Tabla de Insumos Utilizados con proveedores y precios (2025)
Fuente: Elaboración Propia

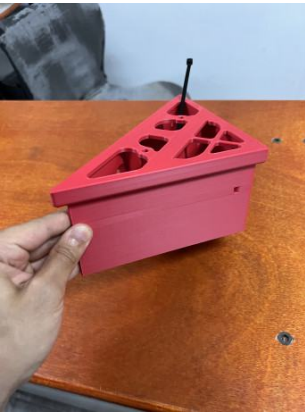


Figura 84. Fotografía, Matriz Completa impresa en PLA 850
Fuente: Elaboración Propia



Figura 85. Fotografía, Encastre Tapa con Separador
Fuente: Elaboración Propia

Luego de impreso el sistema se pasó a comprar los insumos nombrados en la tabla y a preparar el sistema completo.

También se procedió a imprimir el positivo 1

Luego de obtenido el molde impreso en 3D se pasó a trabajar en el Laboratorio de Vidrio, en este proceso se llevaron fichas de pre testeo para llevar el proceso de pruebas.



Figura 88. Fotografía, Positivo 1
Fuente: Elaboración Propia

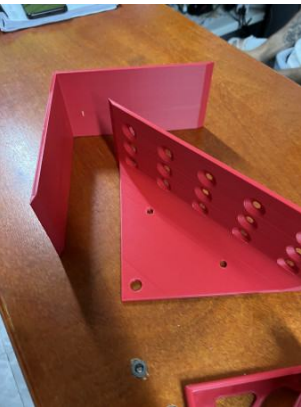


Figura 86. Fotografía, Base y Paredes de la Matriz
Fuente: Elaboración Propia

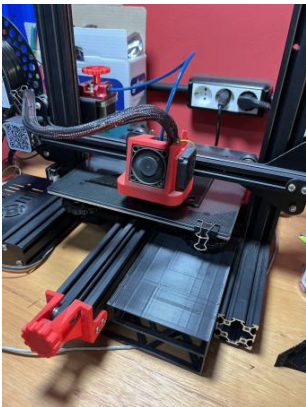


Figura 87. Fotografía, Proceso de impresión FDM de la Matriz
Fuente: Elaboración Propia

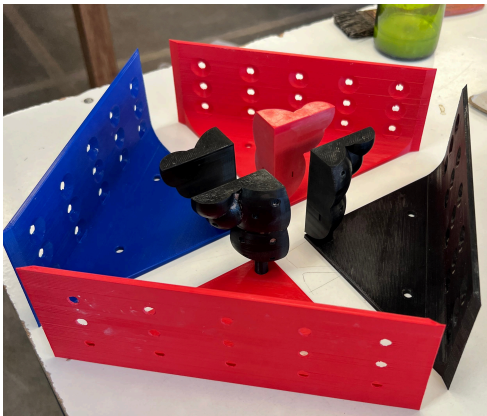


Figura 89. Fotografía, Base encastrada con los positivos
Fuente: Elaboración Propia

Proceso de Vertido y Secado:

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
X			O			

- X Vertido
- Δ Desmolde parcial
- Horneado
- O Desmolde completo

Fotografías de la preparación



Tratamiento del Molde utilizado:

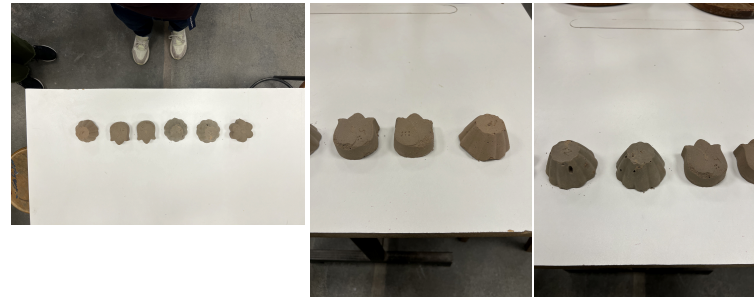
Se utilizó un molde de silicona originalmente destinado a repostería, con el objetivo de evaluar la consistencia de la mezcla cerámica en condiciones controladas. Para ello, se ensayaron diferentes combinaciones de porcentajes de materiales, las cuales fueron debidamente identificadas en cada muestra.

Las variantes probadas incluyeron tanto formulaciones sugeridas en la bibliografía consultada como otras experimentales, incorporando yeso y chamote fino en distintas proporciones.

Conclusiones:

Al desmoldar las piezas, se observó que las texturas superficiales presentaban una terminación ligeramente grumosa, lo cual contrastó con la expectativa de obtener un material más compacto y uniforme. Esta condición sugiere una posible falta de homogeneización en la mezcla o una granulometría inadecuada de los componentes utilizados.

Fotografías del resultado



Fichas de pre testeos

Horno Chico 40*40cm

Prueba Número: 2

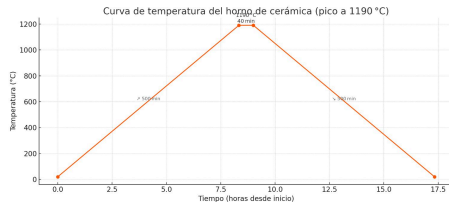
Proceso de Vertido y Secado:

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐

× Vertido
△ Desmolde parcial
◻ Horneado
○ Desmolde completo

Consideraciones del horneado

Se le dio una curva de 1190 Grados para confirmar la resistencia.



Conclusiones:

Al momento de retirar las piezas, únicamente la mezcla recomendada logró conservar la consistencia deseada. Las demás variantes comenzaron a desgranarse durante la manipulación, evidenciando una falta de cohesión estructural. Este resultado confirmó que la mezcla seleccionada era la más adecuada para los testeos en combinación con el prototipo plástico.

Fotografías previo al horneado



Fotografías Post horneado



Proceso de Vertido y Secado:

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
X		O				

- X Vertido
- Δ Desmolde parcial
- Horneado
- O Desmolde completo

Tratamiento del Molde utilizado:

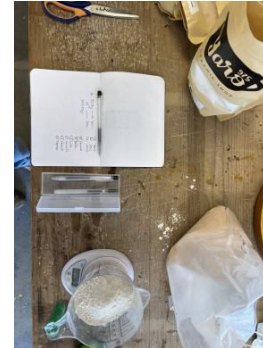
Sin tratamiento en el molde

Conclusiones:

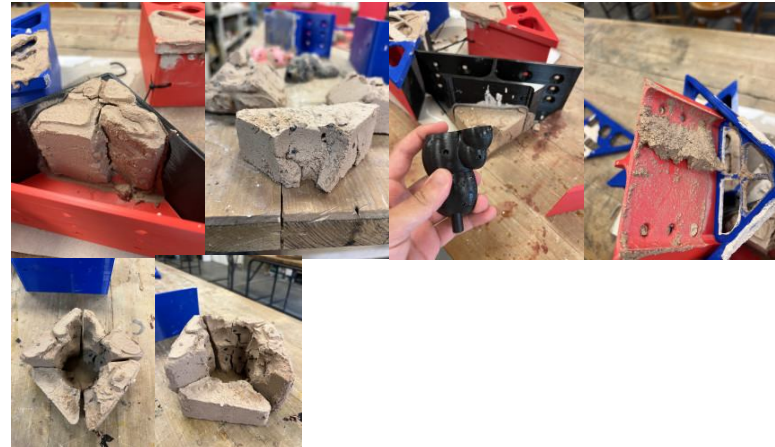
Al momento de retirar la pieza se identificaron varias observaciones relevantes para el ajuste del proceso:

1. La compresión ejercida sobre la pasta cerámica dentro del molde no fue suficiente para lograr la cohesión adecuada entre las partículas, lo que resultó en una estructura interna débil y fragmentada.
2. Las paredes de la Matriz, al estar realizadas en un material plástico no poroso, impidieron una correcta evaporación de la humedad contenida en la pasta. Esta retención de humedad provocó una fuerte adherencia entre la pasta y las paredes, lo que generó desprendimientos y deterioro parcial del molde al intentar desmoldar.
3. La consistencia de la mezcla cerámica no fue la adecuada, presentando una hidratación insuficiente. Esto se evidenció en la textura grumosa y de apariencia arenosa, indicativa de una distribución deficiente del agua en la preparación de la pasta.

Fotografías de la preparación



Fotografías del resultado

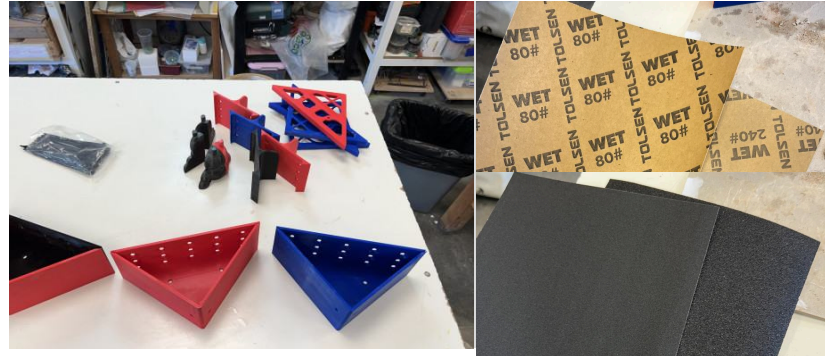


Proceso de Vertido y Secado:

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
X			O	□		

X Vertido
△ Desmolde parcial
□ Horneado
O Desmolde completo

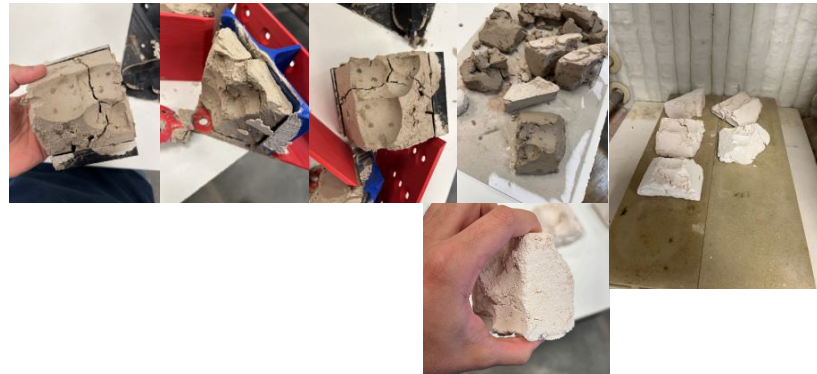
Fotografías de la preparación



Tratamiento del Molde utilizado:

Se realizó un tratamiento sobre las paredes de la Matriz utilizando lija al agua, con el objetivo de reducir parcialmente las marcas dejadas por el proceso de impresión 3D. Esta intervención buscó suavizar la superficie y mejorar el contacto con la pasta cerámica durante el moldeo.

Fotografías del resultado



Conclusiones:

Si bien se logró una mezcla con mayor resistencia mecánica, el problema de adherencia a las paredes del molde persistió. No obstante, se decidió avanzar con el horneado de estas pruebas, dado que la pasta presentaba las condiciones deseadas en cuanto a hidratación y tiempo de secado, lo que permitía evaluar su comportamiento térmico y su integridad estructural en etapas posteriores del proceso.

Proceso de Vertido y Secado:



Fotografías de la preparación



Tratamiento del Molde utilizado:

El molde en esta prueba cuenta con dos tratamientos, primero se preparó una mezcla con el fin de actuar como desmoldante esta mezcla fue hecha casera con materiales del laboratorio.

Se utilizó jabón líquido y aceite girasol, esta mezcla fue luego aplicada en la parte interna de la pieza.

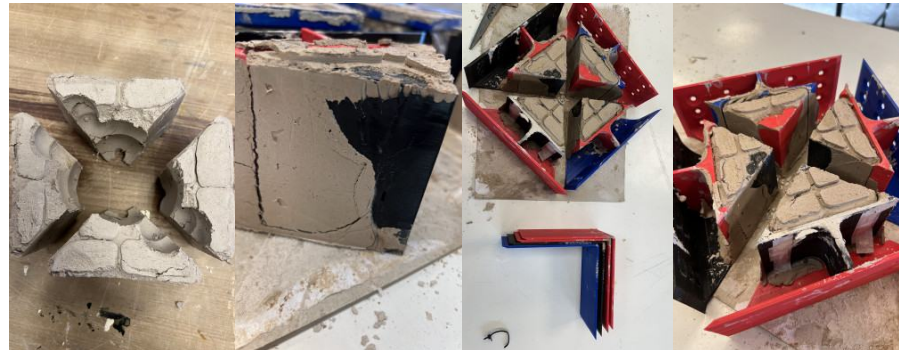
A su vez en esta prueba se incluyó el uso de un nylon (recomendación de la docente Pilar Irureta de Cerámica), para la cobertura de las paredes, esta cobertura genera que el cerámico no se adhiera a las paredes plásticas de la Matriz, pero a su vez genera que la pieza se mantenga húmeda por más tiempo, por lo tanto hay que realizar un desmolde parcial a los 2 días.

Luego se deja secar al aire normalmente como en las demás pruebas

Conclusiones:

Esta fue la prueba con mejor estructura formal y mayor comprensión del material. El secado se dio de manera uniforme, y se puede observar que el uso de nylon facilitó significativamente el desmolde previo al secado final.

Fotografías del resultado



Fichas de pre testeos

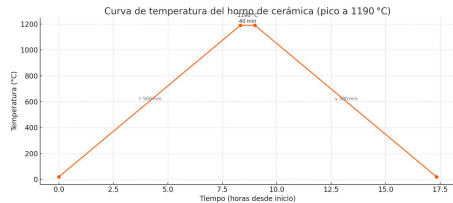
Prueba Número: 6

Horno de Cerámica

Proceso de Vertido y Secado:

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
☒	☐	☒	☐	☐	☐	☐

- ☒ Vertido
- ☐ Desmolde parcial
- ☐ Horneado
- ☒ Desmolde completo



Conclusiones:

Este primer horneado, correspondiente a la prueba 4, confirmó que la estructura resultante tras la cocción presenta una solidez y resistencia adecuadas para su manipulación y uso. Se trata del primer acercamiento exitoso a un molde cerámico funcional, validando tanto la formulación de la mezcla como el comportamiento del material en condiciones térmicas reales.

Fotografías previo al horneado



Fotografías Post horneado



Fichas de pre testeos

Prueba Número: 7

Horno Chico 40*40cm

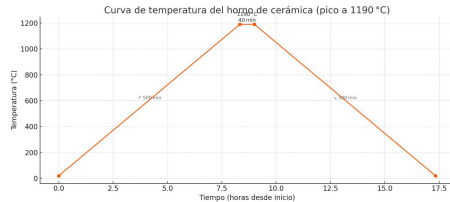
Proceso de Vertido y Secado:



Fotografias previo al horneado



Fotografias Post horneado



Conclusiones:

La horneara correspondiente a la prueba número 5 resultó exitosa, manteniendo la estructura íntegra y funcional del molde cerámico. A partir de esta validación, se procedió a realizar el primer horneado con vidrio, marcando así el inicio de la etapa experimental vinculada al proceso de fusión.

Fichas de pre testeos

Prueba Número: 8

Horno Chico 40*40cm

Proceso de Vertido y Secado:

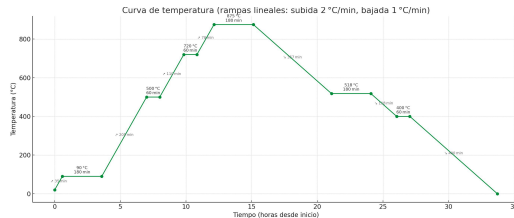


- ✕ Vertido
- △ Desmolde parcial
- Horneado
- Desmolde completo

Fotografias previo al horneado



Curva de Temperatura Utilizada



Fotografias Post horneado



Conclusiones:

El molde obtenido fue formalmente funcional, entregando un objeto de vidrio macizo tal como se esperaba. Este resultado demuestra la operatividad total del sistema propuesto, validando tanto el diseño del molde como la resistencia del material tras el proceso de fusión. El molde se mantuvo íntegro luego de la horneada, cumpliendo con éxito el objetivo central de la investigación.

Conclusiones Del Proceso

El desarrollo del molde reconfigurable para trabajar con molienda de vidrio hueco resultó en un proceso completo que integró de manera cohesiva herramientas digitales, exploración material y sostenibilidad. A través del uso de softwares de modelado 3D e impresión en *FDM*, se logró diseñar y prototipar con precisión un sistema modular, capaz de adaptarse a distintas configuraciones formales. Las iteraciones digitales permitieron optimizar el diseño antes de su fabricación física, permitiendo confirmar el funcionamiento y conexión de las piezas previas a ser impresas.

Las pruebas realizadas con el prototipo confirmaron la viabilidad técnica del sistema. El molde demostró un desempeño adecuado al momento de generar un molde cerámico. Esta etapa de validación también facilitó ajustes puntuales que mejoraron aún más su rendimiento.

Por otro lado, la propuesta alcanzó avances significativos en la reducción de residuos, uno de los objetivos clave del proyecto. La naturaleza reutilizable del molde permitió evitar la destrucción del mismo tras cada uso, como sucede en la técnica de molde perdido.

En conjunto, el proyecto consolidó una alternativa técnica y sostenible para proceso productivo en vidrio mediante la técnica de casting, abriendo nuevas posibilidades para aplicaciones experimentales y seriadas dentro del campo del diseño y la fabricación.

Posibles exploraciones y consideraciones futuras

Existen diversos aspectos técnicos que no fueron abordados durante el desarrollo inicial del molde cerámico, pero que representan oportunidades significativas para futuras exploraciones.

En primer lugar, durante el proceso de fusión, el vidrio sufre una notable reducción de volumen. Esta contracción se debe a los espacios vacíos generados al verter la molienda de vidrio en el molde, lo cual provoca un descenso en la altura final de la pieza obtenida. Una estrategia para mitigar esta pérdida volumétrica consiste en incorporar un agregado en forma de embudo al sistema del molde. Este componente adicional permitiría contener una mayor cantidad de material, compensando dicha reducción si se calcula previamente el volumen del objeto deseado a partir de la densidad del vidrio seleccionado.

Otro campo de interés a desarrollar es la fabricación y validación de distintos tipos de pisos dentro de la Matriz. En el presente proyecto se propuso un sistema de apilado para permitir una futura modulación del espesor o altura del conjunto cerámico. En este contexto, se sugiere incorporar varillas de guía que aseguren el correcto alineamiento del sistema dentro del horno, favoreciendo tanto la estabilidad estructural como la repetibilidad en procesos seriados.

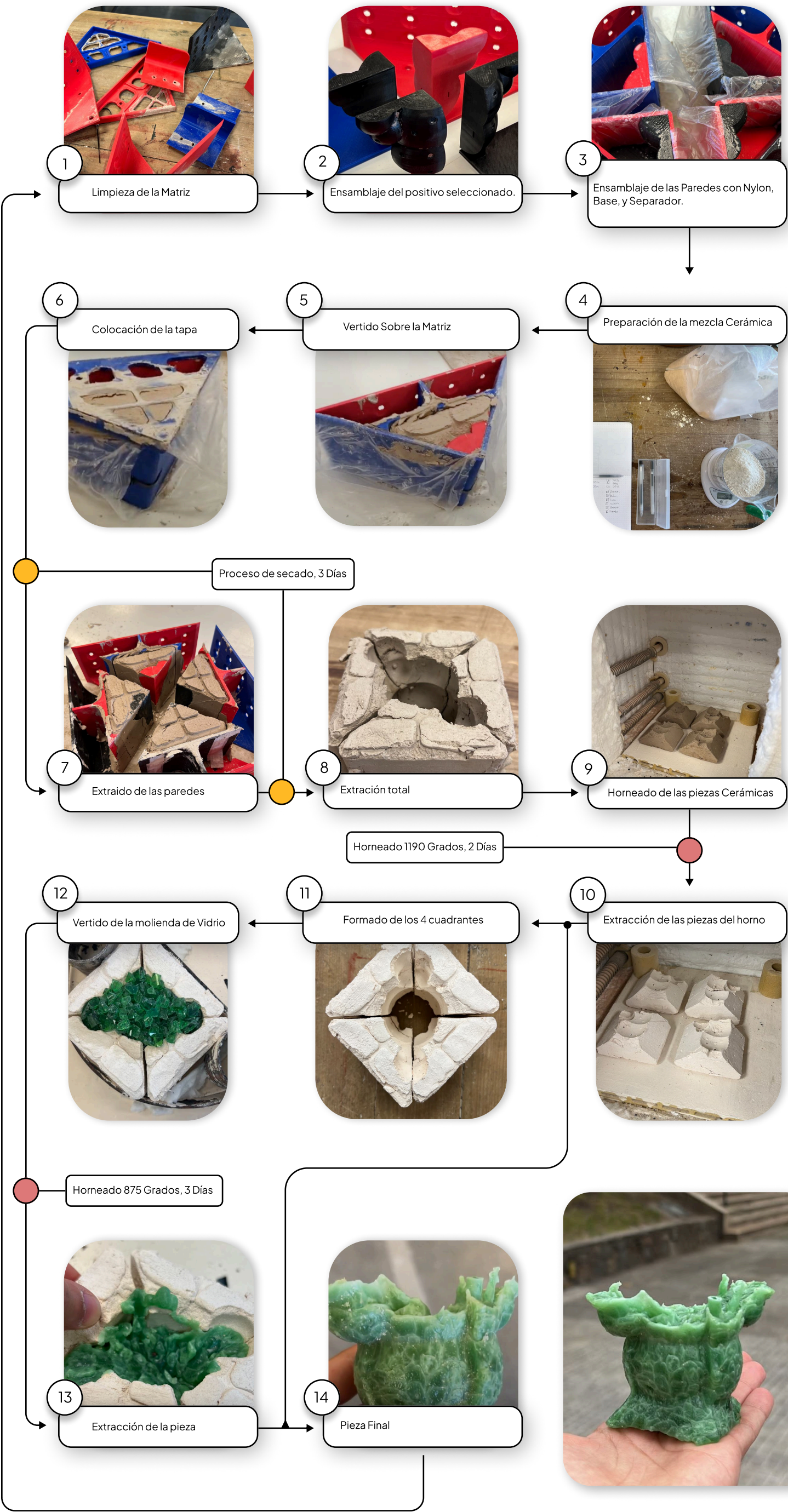
Asimismo, una línea de avance altamente significativa consiste en establecer un flujo de trabajo que integre fases manuales y digitales para la generación del positivo. Si bien en este proyecto se partió de una geometría modelada en software 3D y luego dividida en cuadrantes, es viable introducir un paso anterior basado en modelado manual. La pieza inicial puede concebirse en materiales maleables como plastilina o arcilla, ser digitalizada mediante escaneo 3D, y finalmente importada a un entorno CAD para aplicar la lógica de segmentación, vinculación con paredes y base del molde. Este enfoque híbrido permitiría expandir las posibilidades expresivas y sumar flexibilidad a la herramienta de diseño formal

Secuencia de Uso



Figura 90: Molde luego de horneada de Casting y extracción del vidrio interior.
Fuente: Elaboración Propia

Secuencia de Uso



Aportes al Diseño

Este proyecto aporta al campo del diseño industrial desde una perspectiva metodológica, conceptual y material, al proponer un sistema modular reconfigurable orientado a la producción de moldes cerámicos para técnicas de fusión de vidrio. Se plantea una herramienta de experimentación adaptable, reutilizable y combinable que permite explorar una diversidad formal sin la necesidad de construir nuevos moldes para cada pieza.

El concepto de reconfigurabilidad, central en esta propuesta, refiere a la capacidad de un sistema de modificar su configuración sin alterar su estructura base, permitiendo múltiples combinaciones a partir de un conjunto limitado de componentes. En este sentido, el molde cerámico propuesto no es una forma cerrada sino un sistema abierto, cuya lógica remite a los principios de diseño generativo y adaptable (Gershenfeld, 2005), así como a prácticas proyectuales basadas en sistemas modulares y de exploración iterativa.

Este principio ha sido trabajado por autores como Frabasile (2022), quien en su trabajo final desarrolla una herramienta modular para termoformado de vidrio, destacando el valor del diseño adaptable como puente entre la práctica artesanal y los sistemas de diseño contemporáneo. Asimismo, Damen et al. (2022) exploran la optimización topológica en moldes de vidrio fundido, incorporando estrategias paramétricas y de reutilización material para minimizar los residuos y aumentar la precisión formal. La propuesta presentada aquí dialoga con ambas aproximaciones, pero en un contexto de baja tecnología y accesibilidad económica.

Además, el proyecto permite combinar diferentes moldes y positivos reconfigurables para generar familias de productos derivadas. Este enfoque posibilita pensar la producción en términos de un espacio expandido de cuatro dimensiones: altura, base, formalidad superficial y conexión con otros elementos, lo que genera un potencial compositivo que estimula la creatividad proyectual. Este tipo de sistema permite no solo la replicabilidad, sino también la creación de híbridos formales que surgen de la combinación entre configuraciones previas. Como señalan autores como Sanz Lobo (2005), el vidrio como materia escultórica se potencia cuando se lo considera desde su relación con el molde y la técnica como parte del proceso expresivo.

Desde una perspectiva de enseñanza, este tipo de dispositivos promueve el aprendizaje activo y la comprensión profunda de las variables que intervienen en procesos de casting, al permitir iteraciones sucesivas con un bajo costo y alta adaptabilidad. En la misma línea, El proyecto PAIE Diseño de una familia de productos a partir de botellas de vidrio de un solo uso, Irurueta et al. (2024) subraya la importancia de generar procesos sistematizados que habiliten la exploración formal sin sacrificar recursos o tiempo excesivo en cada iteración, especialmente cuando se trabaja con vidrio recuperado.

Finalmente, el aporte radica también en la articulación entre diseño, arte y producción. El sistema desarrollado no solo opera como una herramienta técnica, sino que introduce una metodología de diseño centrada en la exploración, la reutilización y la eficiencia material. Esta visión, fundamentada en prácticas proyectuales contemporáneas, posiciona al diseño como mediador entre la tradición artesanal y la innovación sostenible.

Referencias Bibliográficas

Referencias Bibliográficas

- Amorín, B., Castro, M., Frabasile, C., López, L., & Rava, C. (2020). *Lab de vidrio. Bitácora*. Universidad de la República. https://www.researchgate.net/publication/350152605_Lab-de-vidrio-bitacora
- Amorín, B., Frabasile, C., Demaría, A. P., Moreira, L., Ronca, J., & Ramos, F. (2024). *Diagnóstico del residuo de vidrio hueco centrado en su recircularización en el contexto local*. Universidad de la República.
- Amorín, B., Frabasile, C., Novick, J., & Räber, M. (2021). *Recuperación de técnicas tradicionales de vidrio, el caso Águeda Dicancro* (Investigación interna). Universidad de la República.
- Damen, K., Vogler, M., Van Dorsser, W. D., & Teuffel, P. (2022). *Topologically optimized glass cast nodes*. *Journal of Building Engineering*, 45, 103461. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103461>
- Damen, W., Oikonomopoulou, F., Bristogianni, T., & Turrin, M. (2022). Topologically optimized cast glass: A new design approach for load-bearing monolithic glass components of reduced annealing time. *Glass Structures & Engineering*, 7(2), 267–291. <https://doi.org/10.1007/s40940-022-00181-1>
- Fernández Navarro, J. M. (1991). *El vidrio*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas/Fundación Centro Nacional del Vidrio.
- Fernández Chiti, J. (1994). *El libro del ceramista: Curso de cerámica en un solo tomo* (5.ª ed.). Ediciones Condorhuasi / Instituto de Ceramología.
- Frabasile, C., & Amorín, B. (2023). De la botella de vidrio al objeto de diseño. *Textos de Tecnología*, (06), 25–38. <https://revistas.udelar.edu.uy/OJS/index.php/RTdT/article/view/1487>
- Frabasile, C. (2021). *Diseño de dispositivo adaptable para el termomoldeado de vidrio plano* [Tesis de grado, Universidad de la República].
- Gonella, F., Muñoz, J., & Wallace, C. (2009). *Análisis y evolución del negocio del vidrio hueco para envases en el Uruguay* [Trabajo de investigación monográfico]. Universidad de la República, Facultad de Ciencias Económicas y de Administración.
- Irurueta Rivero, L. S., Martínez Ríos, L., Trelles Falcón, M., Caja Ducasse, J., & Abásolo Montes de Oca, S. (2024). *Diseño de una familia de productos a partir de botellas de vidrio de un solo uso* [Informe final de proyecto]. Escuela Universitaria Centro de Diseño, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de la República.
- Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2018). *Análisis y evolución del negocio del vidrio hueco para envases en el Uruguay*.
- Oikonomopoulou, F., Bristogianni, T., Veer, F. A., & Nijse, R. (2017). The construction of the Crystal Houses façade: Challenges and innovations. *Glass Structures & Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40940-017-0039-4>
- Potter, N., & Jackson, D. (2000). *Craft techniques for traditional buildings*. Batsford.
- Sanz Lobo, E. (2005). *El vidrio como materia escultórica: Técnicas de fusión, termoformado, casting y pasta de vidrio* [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. <http://biblioteca.ucm.es/tesis/bba/ucm-t28905.pdf>

Lecturas Consultadas

Escárzaga, A. (1994). *Porcelana, cerámica y cristal*. LIBSA.

Gerstein, M., & Wrigley, L. (1997). *The complete book of glass working*. Chilton Book Company.

Haworth-Maden, C. (1999). *Glass: A thousand years of glass making*. Chartwell Books.

Jipa, A., Meibodi, M. A., Bernhard, M., & Dillenburger, B. (2016). 3D-Printed stay-in-place formwork for topologically optimized concrete slabs. *TxA Emerging Design + Technology*, 97–107.

Jorgensen, T. (2015). *Conducting form: The use of digitally controlled jigs in the forming of complex shapes in ceramic craft and design* [Tesis doctoral, University of the Arts London].

Lundstrom, B., & Schwoerer, D. (1983). *Glass fusing: Book one*. Vitreous Publications.

Moorman, S. (1990). *The many facets of glass art*. Schiffer Publishing.

Munro, C., & Walczyk, D. (2007). Reconfigurable pin-type tooling: A survey of prior art and reduction to practice. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*.

Stone, G. (2000). *Firing schedules for glass: The kiln companion*. GDS Enterprises.

Wilson, H. (1989). *Glass: A guide for artists and craftsmen*. Van Nostrand Reinhold.

*Diseño de molde reconfigurable para
el desarrollo de volúmenes con
molienda de vidrio hueco.*

Autor: Santiago Abásolo
Tutora: Mag. Beatriz Amorín

