



Universidad Internacional de La Rioja
Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Máster Universitario en Diseño Industrial y Desarrollo de
Productos

De la impresión 3D al casting de vidrio: Análisis comparativo de filamentos

Trabajo fin de estudio presentado por: Carolina Frabasile Treutler
Tipo de trabajo: Rediseño de proceso
Director/a: Jose Maria Calvo Mozota
Fecha: 12/02/2025

Resumen

El casting de vidrio es una técnica tradicional en la que el vidrio se funde y fluye dentro de un molde para crear objetos complejos. Este proceso consiste en crear un positivo, formar un molde que lo contenga, retirar el material del positivo y someterlo a un horneado para que el vidrio adopte la forma deseada. Luego, se rompe el molde y se limpia la pieza de vidrio obtenida. Este proyecto aborda la impresión 3D como método de fabricación de positivos para la técnica de casting de vidrio, realizando un análisis comparativo entre cinco tipos de filamento. El trabajo también propone la utilización de vidrio de botellas de un solo uso, como alternativa a la escasez de vidrios artísticos en el contexto local.

El abordaje metodológico implica la realización de ensayos de laboratorio, la sistematización y análisis de los datos para determinar qué filamentos son compatibles con esta aplicación. Además, se definen cinco métodos para extraer los filamentos de dentro de los moldes dependiendo de sus propiedades.

El análisis incluye factores como el costo del filamento y tiempo de fabricación del positivo, el costo y tiempo de su extracción y la fidelidad de la pieza de vidrio al positivo. A partir del análisis, se proponen algunas piezas, que exploran capacidades expresivas y geométricas difíciles de lograr con la técnica tradicional.

Los resultados obtenidos muestran que la impresión 3D puede reducir tiempos y costos comparados con la técnica tradicional. Los filamentos con los que se obtuvieron resultados de alta fidelidad al positivo fueron el Ácido Poliláctico y Acetato de Polivinilo utilizando el método de extracción del molde mediante el quemado en hornos y disolución en agua respectivamente. La aplicación de los resultados requerirá la elección del filamento, dependiendo de las características del trabajo a realizar.

Palabras clave:

Casting, Vidrio, Impresión 3D, Diseño, Filamentos

Abstract

Glass casting is a traditional technique in which glass is melted and flows into a mold to create complex objects. This process involves creating a positive, forming a mold around it, removing the material from the positive, and subjecting it to firing to allow the glass to take the desired shape. The mold is then broken, and the obtained glass piece is cleaned. This project explores 3D printing as a method for manufacturing positive models for the glass casting technique, conducting a comparative analysis between five types of filaments. The work also proposes the use of single-use bottle glass as an alternative to the scarcity of artistic glass in the local context.

The methodological approach involves conducting laboratory tests, systematizing, and analyzing data to determine which filaments are compatible with this application. Additionally, five methods are defined for extracting the filaments from the molds, depending on their properties.

The analysis includes factors such as filament cost and positive manufacturing time, extraction cost and time, and the fidelity of the glass piece to the positive. Based on the analysis, some pieces that explore expressive and geometric capabilities difficult to achieve with traditional techniques are proposed.

The results obtained show that 3D printing can reduce time and costs compared to traditional techniques. The filaments that achieved high fidelity results to the positive were Polylactic Acid and Polyvinyl Acetate, using the mold extraction method via kiln burning and water dissolution, respectively. The application of the results will require the choice of filament, depending on the characteristics of the work to be done.

Key words:

Casting, Glass, 3D printing, Design, Filaments

Agradecimientos

Agradezco a José María Calvo Mozota, director de este Trabajo Final de Máster, por su revisión y orientación durante el desarrollo del proyecto.

A Beatriz Amorín, por su generoso acompañamiento y guía a lo largo de toda la maestría. Aunque no ocupó formalmente el rol de tutora o directora de mi Trabajo Final de Máster, asumió esas funciones con dedicación, brindándome orientación y apoyo en cada etapa del proceso. Su confianza y sus aportes han sido fundamentales para mi crecimiento académico.

A mi madre y padre, Elizabeth y Carlos, y a mi hermano Federico, por su apoyo, paciencia y confianza a lo largo de este camino. Este logro también es suyo.

A mi tía Sandra, quien, desde su experiencia en el ámbito académico, me ha respaldado y motivado, inspirándome a seguir adelante con determinación.

A Felipe, por su paciencia y apoyo constante, brindándome ánimo en los momentos más desafiantes y celebrando conmigo cada logro alcanzado.

A la Comisión Sectorial de Enseñanza, por el respaldo financiero proporcionado a través del Programa de Apoyo a Recursos Humanos en la modalidad *Apoyo a Formación de Posgrados en el Exterior*, que hizo posible llevar adelante este proyecto.

A la Escuela Universitaria Centro de Diseño, de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de la República Oriental del Uruguay, por facilitarme el uso del espacio de laboratorios de materiales, insumos y maquinarias necesarias para desarrollar los ensayos de laboratorio que este trabajo propone.

Índice de contenidos

1.	Introducción	14
1.1.	Justificación del tema elegido	14
1.2.	Problema y finalidad del trabajo	17
1.3.	Objetivos del TFE	18
1.3.1.	Objetivo general	18
1.3.2.	Objetivos específicos	18
2.	Marco teórico	20
2.1.	Estado del arte	20
2.1.1.	El Casting de vidrio	20
2.1.2.	Aspectos técnicos	21
2.1.3.	Aspectos críticos del casting de vidrio	28
2.1.4.	Tecnologías de fabricación digital: La impresión 3D	29
2.1.5.	Tipos de filamentos para impresión 3D	30
2.1.6.	Antecedentes de investigación en la aplicación de fabricación digital a la técnica de casting de vidrio	31
2.2.	Normativa	33
2.2.1.	Normativas en el vidrio.	33
2.2.2.	Manejo de materias primas en polvo para la técnica de casting de vidrio	33
2.2.3.	La impresión 3D y los filamentos	34
2.3.	Conclusiones	35
3.	Diseño y desarrollo de la propuesta	38
3.1.	Objetivos y competencias básicas de la propuesta de intervención	38
3.1.1.	Objetivo general de la propuesta	38

3.1.2.	Objetivos específicos de la propuesta	38
3.2.	Público objetivo	41
3.3.	Metodología del trabajo	42
3.3.1.	Marco institucional, equipos y materiales	42
3.3.2.	Análisis de características y propiedades de filamentos que se encuentran en el mercado local	43
3.3.3.	Determinación de método de extracción.....	43
3.3.4.	Ensayos de laboratorio de casting a partir de positivos impresos en 3D	43
3.3.5.	Comparativa de resultados de ensayos de laboratorio y análisis de datos	46
3.3.6.	Sistematización de procesos y resultados	47
3.3.7.	Diseño de piezas representativas del proceso de casting empleando positivos modelados e impresos en 3D	48
3.4.	Temporalización	48
3.4.1.	Identificación de actividades a desarrollar.....	49
3.4.2.	Dependencias de actividades y estimación de duración	49
3.4.3.	Diagrama PERT (Program Evaluation and Review Technique).....	50
3.4.4.	Diagrama de Gantt	51
3.5.	Tareas	51
3.5.1.	Relevamiento de proveedoras locales de filamentos	51
3.5.2.	Recopilación de información técnica	52
3.5.3.	Creación de una tabla comparativa de características	53
3.5.4.	Determinación de métodos de extracción del positivo del molde	53
3.5.5.	Definición del modelado primario.....	55
3.5.6.	Modelo de referencia con la técnica tradicional de modelado de cera	59

3.5.7.	Construcción manual de moldes	60
3.5.8.	Vaciado de moldes y colado de vidrio	61
3.5.9.	Desmolde y limpieza de piezas.....	66
3.5.10.	Documentación visual	66
3.5.11.	Creación de fichas de sistematización.....	67
3.5.12.	Elaboración de tablas para análisis de patrones	69
3.5.13.	Modelado de piezas representativas	69
3.5.14.	Fabricación de moldes y casting.....	72
4.	Resultados	74
4.1.1.	Análisis de características y propiedades de filamentos que se encuentran en el mercado local.....	74
4.1.2.	Fichas de sistematización	75
4.1.3.	Problemas generales del colado.....	83
4.1.4.	Tablas de análisis de patrones.....	83
4.1.5.	Resultados de piezas representativas	89
5.	Discusión y conclusiones	94
5.1.	Conclusiones.....	94
5.2.	Discusión.....	98
5.2.1.	Análisis comparativo de filamentos y métodos de extracción en el proceso de casting de vidrio	98
6.	Limitaciones y prospectiva	102
6.1.	Limitaciones.....	102
6.2.	Prospectivas.....	103
	Referencias bibliográficas.....	105

Anexo A.	Resumen extendido.....	110
Anexo B.	Preguntas de la encuesta a expertas.....	113
Anexo C.	Figuras a mayor tamaño	120
	Índice de siglas y acrónimos	128

Índice de figuras

Figura 1. Imagen mostrada a expertas para estimar los tiempos de modelado. Benchy de creado por Creative Tools	14
Figura 2. Huellas digitales en modelo de vidrio hecho a partir de la técnica de casting	22
Figura 3. Ejemplo de base de botella. Fabricante de botellas: Owen Illinois	26
Figura 4. Ejemplo de etiqueta de filamento PLA del mercado local	34
Figura 5. Gráfica de temperatura en función del tiempo	44
Figura 6. Programa 5 horno grande del Laboratorio de Vidrio	45
Figura 7. Programa 6 horno grande del Laboratorio de Vidrio	46
Figura 8. Representación del Diagrama PERT según actividades definidas	50
Figura 9. Diagrama de Gantt	51
Figura 10. Captura de pantalla de proveedora local de filamentos	52
Figura 11. Captura de pantalla de proveedora local de filamentos	52
Figura 12. Captura de pantalla de proveedora local de filamentos. Especificaciones HIPS	52
Figura 13. Captura de pantalla de tabla en elaboración	53
Figura 14. Modelo realizado en el software Inventor	57
Figura 15. Texturas en el modelo tridimensional digital	57
Figura 16. Modelo en el laminador de la impresora utilizada	58
Figura 17. Modelo de cera tallado a mano	59
Figura 18. Modelo de cera colado en molde de alginato	60
Figura 19. Modelo de cera colado en molde impreso en 3D	60
Figura 20. Construcción de un molde con mezclas fraguantes a mano	61
Figura 21. Cinco moldes con positivos de distintos filamentos en su interior	61
Figura 22. Molde con vidrio necesario para llenarlo sin extensión de boca de colada	62

Figura 23. <i>Molde con vidrio necesario para llenarlo con extensión de boca de colada</i>	62
Figura 24. <i>Botella de vidrio seleccionada</i>	64
Figura 25. <i>Marca de la fábrica en la base de la botella</i>	64
Figura 26. <i>Botella fracturada por choque térmico</i>	64
Figura 27. <i>Medición de volumen de molienda por desplazamiento de agua</i>	65
Figura 28. <i>Horno de abertura frontal cargado con los ensayos de laboratorio de este TFM</i> ..	65
Figura 29. <i>Moldes con vidrio luego de horneada</i>	66
Figura 30. <i>Proceso de apertura de molde</i>	66
Figura 31. <i>Piezas de vidrio etiquetadas previo a su limpieza</i>	66
Figura 32. <i>Conjunto de fotografías del proceso de los ensayos de laboratorio</i>	67
Figura 33. <i>Conjunto de fotografías detalladas de los resultados de los ensayos de laboratorio</i>	67
Figura 34. <i>Ficha de sistematización de ensayos de laboratorio sin datos</i>	68
Figura 35. <i>Comparación de caras con mayor dificultad de copia para uno de los métodos de extracción</i>	69
Figura 36. <i>Tornillo y tuerca modeladas en Autodesk Fusion 360</i>	70
Figura 37. <i>Cadena de eslabones con uniones tipo rótula modelada en Autodesk Inventor</i>	70
Figura 38. <i>Reinterpretación de cota de malla modelada en Rhinoceros</i>	71
Figura 39. <i>Separador cilíndrico de 4 mm en eslabones</i>	71
Figura 40. <i>Benchy con agregado de boca de colada en Fusion 360</i>	72
Figura 41. <i>Molde abierto que demuestra la falta de llenado</i>	83
Figura 42. <i>Tornillo de vidrio</i>	90
Figura 43. <i>Dos eslabones unidos por fallo en el molde</i>	92
Figura 44. <i>Dos eslabones unidos por fallo en el molde</i>	92

Figura 45. <i>Cota de malla en vidrio</i>	93
Figura 46. <i>Benchy en vidrio</i>	93

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Estimación de duración de actividades (en días)</i>	49
Tabla 2. <i>Medición de volumen de vidrio para determinar las dimensiones de la boca de colada en futuros trabajos de casting</i>	63
Tabla 3. <i>Comparativa de propiedades de filamentos</i>	74
Tabla 4. <i>Comparativa de ensayos con método de desprendimiento en caliente</i>	84
Tabla 5. <i>Comparativa de ensayos con método de disolución</i>	85
Tabla 6. <i>Comparativa de ensayos con método quemado en hornos</i>	86
Tabla 7. <i>Comparativa de ensayos con mejores resultados con la técnica tradicional de la cera perdida</i>	88
Tabla 8. <i>Comparativa de resultados de tuerca según granulometría de molienda</i>	90

Resumen

El casting de vidrio es una técnica tradicional en la que el vidrio se funde y fluye dentro de un molde para crear objetos complejos. Este proceso consiste en crear un positivo, formar un molde que lo contenga, retirar el material del positivo y someterlo a un horneado para que el vidrio adopte la forma deseada. Luego, se rompe el molde y se limpia la pieza de vidrio obtenida. Este proyecto aborda la impresión 3D como método de fabricación de positivos para la técnica de casting de vidrio, realizando un análisis comparativo entre cinco tipos de filamento. El trabajo también propone la utilización de vidrio de botellas de un solo uso, como alternativa a la escasez de vidrios artísticos en el contexto local.

El abordaje metodológico implica la realización de ensayos de laboratorio, la sistematización y análisis de los datos para determinar qué filamentos son compatibles con esta aplicación. Además, se definen cinco métodos para extraer los filamentos de dentro de los moldes dependiendo de sus propiedades.

El análisis incluye factores como el costo del filamento y tiempo de fabricación del positivo, el costo y tiempo de su extracción y la fidelidad de la pieza de vidrio al positivo. A partir del análisis, se proponen algunas piezas, que exploran capacidades expresivas y geométricas difíciles de lograr con la técnica tradicional.

Los resultados obtenidos muestran que la impresión 3D puede reducir tiempos y costos comparados con la técnica tradicional. Los filamentos con los que se obtuvieron resultados de alta fidelidad al positivo fueron el Ácido Poliláctico y Acetato de Polivinilo utilizando el método de extracción del molde mediante el quemado en hornos y disolución en agua respectivamente. La aplicación de los resultados requerirá la elección del filamento, dependiendo de las características del trabajo a realizar.

Palabras clave:

Casting, Vidrio, Impresión 3D, Diseño, Filamentos

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo surge de un interés personal y procura aportar a la convergencia de la tecnología de impresión 3D con la técnica tradicional de trabajo de Casting en vidrio, con el objetivo de explorar nuevas posibilidades de fabricación. A lo largo de este capítulo, se presentará la justificación del problema de estudio, la relevancia de mejorar la precisión y la capacidad de producción en el diseño de productos de vidrio a partir de material reciclado. Se planteará el problema de investigación, que se centra en las limitaciones de la técnica tradicional, se plantearán los objetivos generales que guiarán este trabajo y se presentarán las contribuciones que se anticipan de esta investigación.

1.1.JUSTIFICACIÓN DEL TEMA ELEGIDO

En este apartado se justifica la elección del tema, destacando los desafíos de la técnica de cera perdida, como la precisión limitada, la complejidad en patrones detallados y las restricciones para producción en serie según las consultas realizadas a personas que trabajan con la técnica de casting. Se analizan las ventajas de la impresión 3D como alternativa y se plantea el uso de vidrio de envases por tratarse de una investigación desarrollada en el contexto uruguayo. Además, se subraya la relevancia de esta investigación para aportar conocimiento en relación con las tecnologías digitales en la producción de vidrio artístico y de diseño.

Los problemas que se buscan abordar en este trabajo son los desafíos asociados con el proceso de cera perdida y la reproducción de objetos de vidrio. Se reconoce en la tradicional técnica del casting a la cera perdida la limitación en la precisión y la capacidad de trabajar patrones complejos dado que la producción detallada con cera es laboriosa y requiere práctica de trabajo. Al consultarlas, expertas¹ que trabajan la técnica de casting, en una escala

Figura 1. *Imagen mostrada a expertas para estimar los tiempos de modelado. Benchy de creado por Creative Tools*



Fuente: Elaboración propia

¹ A lo largo del presente trabajo se utilizarán las formas gramaticales femeninas como marca de lo genérico, cuidando la mayor inclusión lingüística, evitando grafismos que sobrecarguen el texto o dificulten la lectura.

del 1 al 5 siendo 1 poco precisa y 5 muy precisa, el 71,4% expresan que la cera permite un nivel 4 de precisión; sin embargo, al mostrarles una imagen de un modelo pequeño (Figura 1) y consultarles cuánto tiempo estiman que tardaría modelarla en cera el 50% expresa que tardaría más de 6 horas, y el 42,9% tardaría entre 4 y 6 horas. Esto hace un total de un 92,9% que tardaría más de 4 horas, mientras que una impresora de reciente desarrollo demoraría 15 minutos en materializarlo y una con tecnología menos avanzada entre 30 minutos y una hora. La cera, además, es un material frágil fácilmente deformable, lo que dificulta su manipulación y aumenta el riesgo de roturas o deformaciones durante el proceso. De las expertas consultadas 78,6% respondieron que al trabajar la cera se enfrentan riesgos de moderados a altos en términos de deformación por manipulación.

El proceso manual limita la repetibilidad, como lo refleja el hecho de que el 57,1% de las expertas consultadas considera que la repetibilidad en la producción con la técnica de cera perdida depende de la complejidad de las piezas. Además, el 21,4% indica que es difícil producir piezas de manera repetitiva, lo que respalda la afirmación de que este proceso tiene restricciones para la producción en serie. Si bien se puede utilizar la cera colada dentro de un molde, siempre requiere de perfeccionamientos que se realizan a mano y dependen de las habilidades de quien las desarrolla. El interés en la repetibilidad de las piezas está dividido, ya que el 42,9% de las encuestadas expresó interés, otro 42,9% respondió "tal vez", y solo el 14,3% indicó no estar interesada. En el entendido que el proceso de creación del positivo es de suma importancia en los resultados de la técnica, este trabajo se propone investigar en las posibilidades de optimizar los procesos, incluyendo tecnologías de fabricación digital que permitirán mayor nivel de detalle, la replicabilidad de los positivos, la disminución de los tiempos y de habilidades manuales requeridas.

A medida que las tecnologías de fabricación avanzan, se vuelve evidente que la integración de métodos contemporáneos, como la impresión 3D, puede ofrecer soluciones innovadoras que superen las dificultades inherentes a las técnicas tradicionales. Así se combina el modelado de cera a mano con un modelado digital que permite la reproducción exacta infinitas veces y procura no depender de la persona que lo modela. Permite mayor nivel de detalle y la materialización de piezas con geometrías complejas por tratarse de una máquina guiada por Control Numérico Computarizado (CNC). La mayoría de las encuestadas (57,1%) considera

que, en comparación con la técnica de cera perdida, los filamentos 3D son mucho más rápidos y repetibles, lo que resalta las ventajas de esta tecnología. El resto de las participantes señaló no contar con la experiencia suficiente para establecer una comparación.

El vidrio no es ajeno a estos avances tecnológicos lo que se materializa en diversidad de trabajos académicos realizados en este campo (Matthias & Jorgensen, 2012; Inamura, Stern, Lizardo, Houk, Oxman, 2017; Haley, Klein, Jorgensen y Brown, 2019) que analizan distintas aplicaciones de la impresión 3D a la producción con este material.

A pesar que diversas autoras profundizan sobre la utilización de modelos impresos en 3D para la fabricación de moldes de la técnica de casting (Thwaite 2018, Haley, Klein, Jorgensen y Brown 2019, Whittingham 2019), existen diferencias significativas en las conclusiones que se desprenden de los resultados de investigación por lo que realizar un nuevo análisis con foco en los tipos de filamento que se pueden utilizar para este proceso procura aportar al esclarecimiento de las conclusiones en este sentido.

Así también, los estudios mencionados ocupan vidrios diseñados específicamente para la fusión y creación de nuevas figuras. En Uruguay, se encuentran escasas proveedoras de vidrios artísticos para realizar este tipo de trabajos. Por lo tanto, la contribución en este sentido radica en la sistematización de la técnica y análisis de los filamentos, utilizando vidrio reciclado de botellas de un solo uso, lo que permite reducir residuos y crear objetos artísticos y de diseño que contribuyan a mitigar el impacto de disponer en canteras de residuos un material proveniente de una industria extractivista que puede ser reciclado y utilizado nuevamente sin perder sus características y propiedades. A pesar que el vidrio es un material inerte que no contamina el ambiente, su disposición final en Uruguay suele ser en canteras abandonadas o vertederos, considerando que no existen localmente industrias que lo fabriquen o reciclen y, según Amorín, Frabasile, Demarías, Moreira, Ronca, y Ramos (2024), las opciones de recircularización son, hoy en día, escasas.

Entre los beneficios de esta investigación se encuentra la optimización del proceso y hacer más accesible la técnica de casting de vidrio para diversos entornos productivos. Se procura que este trabajo aporte a la comunidad científica que presenta una vacancia académica sobre casting con vidrio reciclado de envases de un solo uso. Del mismo modo, aporte a la enseñanza

sentando las bases para proponer prácticas con este vidrio. Así también, se destaca la investigación y desarrollo en técnicas tradicionales de trabajo en vidrio integrando tecnologías de fabricación digital cuyos resultados en el campo del diseño y la fabricación de objetos de vidrio se espera sean de interés para profesionales, docentes y estudiantes en la temática.

1.2.PROBLEMA Y FINALIDAD DEL TRABAJO

En este apartado se presentará el problema que aborda esta investigación, relacionado con las limitaciones de las técnicas tradicionales de fabricación de vidrio y algunos antecedentes de exploración en el uso de filamentos de impresión 3D como positivos en el casting de vidrio. Además, se presenta la finalidad y aporte que se espera de este trabajo.

El vidrio es un material ampliamente utilizado en la producción de objetos y productos de diseño mundialmente, pero su fabricación está tradicionalmente asociada a industrias que operan a gran escala, lo que limita las oportunidades para diseñadoras locales, pequeñas empresas y artistas. Paralelamente, la impresión 3D ha surgido como una técnica efectiva para la creación de prototipos, sin embargo, su uso en la fabricación de productos de vidrio sigue siendo escaso, especialmente en el contexto uruguayo.

Entre las investigaciones académicas relevadas que se mencionaron anteriormente, no se encontraron evidencias que exploren métodos alternativos al quemado de PLA (Haley, Klein, Jorgensen y Brown; 2019) para retirar los positivos de dentro de los moldes fraguados para la realización de casting de vidrio. Este enfoque plantea desafíos en relación a la temporalidad de los procesos, el debilitamiento de los moldes por la exposición a altas temperaturas. Así también las autoras ocupan resinas específicas para este fin que reduce las posibilidades de aplicación para el público en general.

En otro sentido, se considera la variedad de propiedades que presentan los filamentos disponibles actualmente en el mercado, llevar a cabo una investigación en este sentido aporta a la construcción de conocimiento sobre la actualización de una técnica tradicional para la conformación de piezas de vidrio.

En este trabajo se llevará a cabo un análisis comparativo de las características de distintos filamentos de impresión 3D disponibles en el mercado, con el fin de evaluar su viabilidad como positivos para la creación de moldes en el proceso de casting de vidrio. Además se realizarán

ensayos de laboratorio para testear los filamentos que eviten los perjuicios para la salud y el ambiente tanto en su proceso de impresión como en el de extracción de dentro de los moldes con el objetivo general de determinar qué filamentos son adecuados para este tipo de aplicación, considerando factores clave como el costo de fabricación, la facilidad de extracción del molde, la ausencia de residuos de impresión que puedan afectar la pieza de vidrio final, y la precisión en la reproducción de detalles finos.

Se espera que esta investigación aporte hacia la optimización del proceso en términos de tiempos, precisión, eliminación de residuos y sistematización de producción, integrando nuevas tecnologías en la producción de objetos de vidrio reciclado tanto para procesos artísticos como para procesos de diseño.

1.3.OBJETIVOS DEL TFE

Este apartado procura explicitar los objetivos planteados que buscan generar conocimiento aplicable para aportar soluciones prácticas a los desafíos actuales del proceso de casting de vidrio. Este Trabajo Final de Máster tiene como propósito explorar las posibilidades que ofrece la tecnología de impresión 3D en la optimización de procesos que son tradicionalmente manuales, con foco en la selección y uso de filamentos para la creación de moldes para Casting de Vidrio. A continuación, se detallan los objetivos generales y específicos de este trabajo.

1.3.1. Objetivo general

- Rediseñar el proceso de casting de vidrio para desarrollar soluciones innovadoras que utilicen tecnologías de impresión 3D, promoviendo mejoras en eficiencia, sostenibilidad y calidad de los resultados.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Evaluar la aplicabilidad de diferentes filamentos de impresión 3D en procesos de casting de vidrio, considerando aspectos relacionados con su desempeño técnico, económico y ambiental para optimizar la creación de moldes positivos y la calidad de las piezas obtenidas.
2. Aplicar el rediseño del proceso a ensayos de laboratorio que permitan obtener resultados comparables

3. Valorar las posibilidades que ofrece el proceso en relación con la técnica tradicional de casting a la cera perdida.

2. MARCO TEÓRICO

En el siguiente capítulo se planteará el contexto de aplicación de este trabajo, presentando aspectos técnicos del proceso seleccionado para investigar, el conocimiento existente generado por estudios previos y las principales dificultades. Al finalizar el capítulo se resumirán las principales conclusiones, que influirán en el desarrollo específico del trabajo.

2.1. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se describirá la técnica del casting de vidrio, abordando las características que presentan las piezas resultantes y el proceso que permite llevarlas a cabo desde la creación del modelo, pasando por la fabricación del molde, la elección y el colado de vidrio, el desmolde y la terminación de las piezas.

2.1.1. El Casting de vidrio

El casting (colado) es una de las técnicas tradicionales de modelado tridimensional de materiales no maleables (que no se pueden tallar o esculpir a mano), entre ellos los metales y el vidrio. En vidrio, el casting en hornos se utiliza para crear objetos macizos con formas complejas. Se coloca vidrio dentro o sobre el molde y se hornea para que fluya dentro de él y tome la forma deseada. Dependiendo de la volumetría muchas veces los moldes deben ser destruidos para desmoldar la pieza luego de su horneado. El molde perdido permite materializar volúmenes con geometrías complejas pero su reproducción se ve limitada puesto que un molde nuevo (dependiendo la técnica con la que se realice) no asegura la fidelidad en la reproducción y usualmente conlleva un largo proceso de trabajo manual. El vidrio que en él se forma suele tener superficies poco brillantes debido al contacto entre ambos.

El procedimiento consiste en crear un modelo primario (positivo) con la forma que se desea obtener en vidrio, de arcilla, plastilina, cera o algún otro material. Este modelo puede crearse por adición o sustracción de material, modelando directamente con las manos o utilizando herramientas. En ocasiones se utilizan otros materiales como el alginato² para tomar una

² El alginato, un biopolímero de origen renovable y biodegradable, se caracteriza por ser biocompatible, no tóxico y soluble en agua, que se obtiene tanto de algas pardas como mediante procesos microbianos. Dentro de

copia de un objeto que no se puede o no se quiere perder para luego colar dentro del alginato la cera y lograr el modelo que luego se perderá. Este modelo puede utilizarse directamente cómo sale del molde de alginato o puede modificarse, aunque, en la mayoría de los casos, requiere ajustes o refinamientos para obtener las terminaciones deseadas y minimizar las burbujas o detalles que pueden surgir del colado de cera.

Luego, se cubre el modelo con mezclas fraguantes (se profundizará sobre esto en el subapartado 2.1.2.2 La fórmula) para crear un molde que contendrá al vidrio. Después que la mezcla fragua, se retira el modelo de dentro del molde y se llena con vidrio. El diseño del molde requiere un receptáculo o boca de colada en la parte superior donde se colocará el vidrio que luego fluirá dentro del molde. El aire entre los trozos de vidrio escapará al reblandecerse y fluir, disminuyendo el volumen total (se profundizará sobre esto en el subapartado 3.5.8.1 Determinación del porcentaje de volumen del modelo que debe contener la boca de colada.). El molde junto con el vidrio se somete entonces a un ciclo de horneado (se profundizará sobre esto en el subapartado 2.1.3.1 Las curvas de temperatura) que permitirá por la acción de la gravedad que el vidrio fluya dentro del molde tomando su forma. Es importante resaltar que en esta técnica quien la realiza no manipula el vidrio en caliente. Cuando el conjunto de vidrio y molde está a temperatura ambiente nuevamente, se retira el vidrio ya moldeado de dentro del molde y se realizan las terminaciones finales, como el corte, pulido y brillado en caso de ser necesarios.

2.1.2. Aspectos técnicos

2.1.2.1. El molde

Se destaca la importancia del molde en el proceso por ser el responsable de contener y moldear el vidrio, razón por la que se aborda en el siguiente inciso.

En el proceso de moldeo para la fabricación de objetos de vidrio, es fundamental comprender los conceptos de positivos y negativos.

sus múltiples aplicaciones se resalta su capacidad para capturar detalles precisos lo que lo convierte en una opción ideal para la elaboración de impresiones y moldes, destacándose su empleo en réplicas anatómicas y el desarrollo de prótesis personalizadas, como estructuras de silicona diseñadas a partir de moldes específicos. Hurtado, Selgas Sanchis, & Serrano Aroca (2020).

Un positivo o modelo es un volumen tridimensional idéntico al objeto que se desea crear. Sirve como base para la creación del molde a su alrededor.

El negativo es el molde en el que se vierte el material. Es un volumen inverso al modelo que se crea a partir del positivo.

Cuando se utilizan varios procesos de copia y colado para generar el positivo o modelo como el descrito en el apartado 2.1.1 El Casting de vidrio con alginato y cera, existen varios positivos y negativos sucesivos que en ocasiones puede llevar a confusiones y culminar con una pieza de vidrio inversa a la que se quería lograr.

En cualquier caso, la precisión en la elaboración tanto de los positivos como de los negativos que se requieran en el proceso es esencial, ya que cualquier imperfección puede afectar la visualidad y la forma del producto final en vidrio. El casting de vidrio tiene un alto nivel de copia de los detalles en las piezas finales, permitiendo reproducir texturas pequeñas, como las huellas digitales humanas cuando se utiliza un dedo como positivo (Figura 2).

Figura 2. *Huellas digitales en modelo de vidrio hecho a partir de la técnica de casting*



Fuente: Elaboración compartida con
Celina Collazzi

2.1.2.2. La fórmula

Los moldes utilizados para técnicas de moldeo de vidrio suelen ser de cerámica, acero, yeso o placas de fibras cerámicas, cada uno con sus características y comportamientos particulares cuando se exponen a altas temperaturas (Frabasile, 2021).

Para la técnica de casting se suele utilizar mezclas de materiales fraguantes que permitan la copia exacta de los modelos que se reproducirán en vidrio, sin importar su geometría. A partir de los textos consultados se puede afirmar que las mezclas de materiales fraguantes que componen los moldes varían dependiendo de los insumos que puedan encontrarse en los mercados locales de cada región y de las decisiones de quienes los fabriquen. Whittingham (2019), Brachlow (2019) y Bristogianni, Oikonomopoulou, Veer, Snijder, & Nijse (2017), Oikonomopoulou, Bristogianni, Barou, Jacobs, Frigo, Veer, & Nijse, (2018) utilizan una mezcla

de materiales en polvo prefabricada denominada Polvos de Inversión para Vidrio (Glass Investment Powders) cuyos nombres comerciales son Crystalcast o Castalot específicamente diseñados para la realización de la técnica de moldeo de vidrio que este trabajo abordará. Según la información recabada en los textos, estas mezclas contienen cristobalita, cuarzo y yeso, aunque no se especifica en que proporciones.

Romero y Gurman ³(comunicación personal, 2022) utilizan para realizar estos tipos de moldes, yeso para encaste de plata de la marca Ransom & Randolph (R&R) de origen estadounidense, aunque también abordan mezclas caseras de yeso, cristobalita, arena sílica, papel de diario y agua. Esta última mezcla es la utilizada por Romero (2012). Da Ponte ⁴(comunicación personal, 2023) realiza los moldes para esta técnica en dos capas. La primera una mezcla de yeso, cuarzo y agua en iguales volúmenes, y la segunda una mezcla de yeso, cuarzo, chamote o chamota (molienda fina) y agua en volúmenes iguales.

Whittingham (2019), por su parte, presenta como mezcla básica agua, sílice y yeso en volúmenes iguales mientras que Ebanks (2018) si bien utiliza la misma mezcla en partes iguales, pero midiendo la masa, profundiza sobre las proporciones de yeso, sílice y agua utilizadas especificando las funciones de cada una de las partes. Según el autor el yeso tiene excelentes propiedades mecánicas a bajas temperaturas, pero su estructura no soporta altas temperaturas mientras que la sílice funciona de manera contraria siendo frágil a bajas temperaturas, pero muy estable a altas temperaturas. Esto se debe a las diferencias en los coeficientes de dilatación de ambos compuestos, mientras uno se dilata el otro se contrae y viceversa. Así, según el Eblanks (2018) los moldes con la mejor resistencia tanto a altas como a bajas temperaturas se consiguen con la mezcla de estos compuestos en partes iguales.

³ Romero Gurman es un taller de arte en vidrio fundado por Débora Gurman y Marco Romero en el año 2000. Se dedican a la creación de productos de vidrio decorativos, joyería y obras de arte. Además, ofrecen cursos específicos sobre diversas técnicas de trabajo con vidrio, tanto de forma presencial como online. <https://www.romerogurman.com/>

⁴ Andrea Da Ponte es una artista y docente argentina especializada en vidrio, reconocida por su técnica de transferencia de imagen al vidrio. Es Técnica en Vidrio Artístico por la Escuela Municipal de Vidrio Berazategui y ha representado a Argentina en exposiciones internacionales. <https://objetosconvidrio.com/andrea-da-ponte-fotogaleria/>

Vale aclarar que en los párrafos anteriores se utilizaron los términos arena sílica, sílice y cuarzo según sus denominaciones por las autoras citadas, sin embargo, son términos que hacen referencia al mismo compuesto químico: el dióxido de silicio (SiO_2). La arena sílica es una forma granular de sílice, comúnmente extraída de depósitos naturales, el término sílice se refiere al compuesto químico en general, mientras que el cuarzo es la forma cristalina más común de sílice, que se encuentra de manera natural. No obstante, a partir de ahora se utilizará el término cuarzo, ya que es la presentación y denominación del compuesto que se comercializa en Uruguay. Se trata de una molienda de cuarzo y se vende según su granulometría.

Dado que no se encuentran productos específicos para la fabricación de moldes de vidrio en Uruguay, ni el yeso de la marca Ransom & Randolph (R&R), se ha optado por una formulación base con yeso, cuarzo y agua en proporciones iguales por masa. Según Ebanks (2018), esta mezcla ofrece excelentes resultados para piezas de pequeño formato que no requieren una resistencia excesiva, lo que también es respaldado por Da Ponte (comunicación personal, 2023). Además, todas las mezclas comerciales específicas encontradas para este propósito, como los Polvos de Inversión para Vidrio, emplean estos materiales como base, lo que refuerza la idoneidad de esta elección para el desarrollo experimental. Se utilizarán las medidas en masa y no en volumen para asegurar mayor precisión, ya que la masa no varía según la compactación del polvo.

2.1.2.3. Métodos de fabricación del molde

Existen dos métodos de fabricación de los moldes para Casting de vidrio: Moldes vertidos y moldes contruidos a mano.

- Moldes vertidos:

En este método, se realiza la mezcla fraguante y se vierte sobre el positivo, que está previamente fijado en el interior de un recipiente. El yeso líquido fluye alrededor del positivo, llenando todos los detalles finos de la superficie. Dentro de las ventajas de este proceso se destaca la limpieza y simplicidad en la fabricación del molde y la facilidad para estabilizar el molde en el horno una vez que esté pronto para realizar el proceso de horneado debido a la cara plana (la que queda en contacto con el aire en el vertido del yeso). Tiene como principal

desventaja la disparidad de espesores del molde cuando se trabaja con piezas irregulares y contenedores regulares que afecta la distribución de la temperatura que alcanza el vidrio dentro de él en el ciclo de horneado y la resistencia del molde, además de que requiere más material para lograr moldes igual de resistentes que el siguiente método de fabricación.

- Moldes contruidos a mano:

En este proceso, el yeso se aplica en capas sobre el positivo utilizando un pincel o espátula. La primera capa captura los detalles más finos del positivo mientras que las capas subsiguientes aumentan el espesor y la resistencia del molde. Según Ebanks (2018) el resultado son moldes con espesores relativamente constantes que permiten una óptima distribución de la temperatura durante el ciclo de horneado y por lo tanto, también un mejor recocido de la pieza. Debido a que se secan uniformemente previenen rajaduras. El autor también afirma que este tipo de moldes son moldes más estables y fuertes debido a que si una capa se rompe, las demás capas sostienen la pieza y la capa rota, por lo que las rajaduras no afectan al molde completo y por lo tanto a la pieza. Por la forma en la que se realizan permiten generar diferentes capas con diferentes aditivos que mejoren las propiedades mecánicas del molde y prevenga roturas en caso de que sea necesario por utilizar grandes volúmenes de vidrio.

2.1.2.4. El vidrio

Es importante destacar que los antecedentes citados en apartados anteriores y en los próximos, emplearon vidrios diseñados específicamente para la fusión y creación de nuevas figuras. En Uruguay, no se encuentran proveedoras de vidrios artísticos para realizar este tipo de trabajos, sino únicamente vidrio industrial. A pesar de que el vidrio es un material inerte que no contamina el ambiente, su disposición final en Uruguay suele ser en canteras abandonadas o vertederos (Amorín, Rava, Schmukler, Castro, Frabasile; 2019).

2.1.2.5. Método de fabricación del vidrio

Históricamente, la humanidad se ha visto interesada por las características del vidrio y lo ha utilizado para diversos fines tanto prácticos como estético-ornamentales. Las demandas comerciales por las características de este material han derivado en su adaptación y conformación en grandes industrias. Hoy en día, la producción artística del vidrio sigue vigente a través de técnicas tradicionales, mientras la fabricación de objetos ha sido industrializada,

permitiendo su elaboración en masa. Según Amorín y Frabasile (2021) la industria que produce el vidrio se ha transformado, llegando a sus presentaciones más conocidas y utilizadas hoy en día: plano y hueco.

Según Harder (2019) dentro de esta industrialización la primera presentación de vidrio de mayor producción a nivel mundial es el vidrio conformado por el proceso de soplado mecánico industrial para conformar envases (también conocido como vidrio hueco), seguido por el vidrio plano flotado con un porcentaje levemente inferior que es utilizado mayoritariamente en la industria de la construcción. A partir de lo mencionado anteriormente este trabajo tomará como materia prima vidrio de envases o botellas de descarte.

El proceso de soplado de botellas de vidrio mecánico industrial es una técnica que permite la producción de envases de diferentes tamaños y formas para diversos fines comerciales. Implica la fundición de materias primas dentro de un horno que alcanza los 1500° C para luego ser cortado e inyectado con aire dentro de un molde metálico. Dicho molde, transfiere a la botella sus características de forma, brillo y texturas superficiales.

2.1.2.6. La trazabilidad de las botellas

Antes de entrar en los detalles de la trazabilidad, es de relevancia destacar que la clasificación de las botellas previa al uso en técnicas de conformación de objetos de vidrio reciclado en relación con su procedencia y sus características propias como el color implica la reducción de las variables derivadas de las diferentes composiciones y materias primas que generan el vidrio.

En las bases de las botellas se identifican algunas marcas que tienen indicaciones de su fabricación: número de molde, capacidad de la botella, símbolo de la empresa fabricante, número de boquilla, región de la planta de fabricación, año de producción (Figura 3). No todas las botellas exhiben la totalidad de las marcas mencionadas; su presencia puede variar dependiendo de la fabrica y el diseño específico de cada una. Como forma de reducir las variables derivadas de las composiciones del vidrio,

Figura 3. Ejemplo de base de botella. Fabricante de botellas: Owen Illinois



Fuente: Elaboración propia

para los ensayos de laboratorio que este trabajo propone se seleccionará una única fábrica de botellas para la reutilización del vidrio. Aunque no todas las marcas se pueden asociar fácilmente a una fábrica específica con la información disponible, es posible compararlas y seleccionar un único símbolo representativo.

2.1.2.7. Composición del vidrio

El vidrio se compone principalmente de óxidos. Sus materias primas pueden clasificarse según la función que desempeñan en la fabricación del material en cuatro grupos principales: vitrificantes, fundentes, estabilizantes y componentes secundarios (Fernández Navarro, 2003). Los vitrificantes son los elementos que constituyen la red vítrea dotándolo con sus características principales como la transparencia, al permitir el paso de la luz sin dispersión, y la dureza, que lo hace resistente al rayado, la resistencia química, otorgándole estabilidad frente a agentes corrosivos como ácidos y bases, la rigidez estructural, lo que asegura una red sólida capaz de soportar tensiones internas y el aislamiento térmico y eléctrico, gracias a su estructura no cristalina que actúa como barrera frente a la transferencia de calor y electricidad. Los fundentes favorecen la formación del vidrio disminuyendo su temperatura de fusión; su inclusión está limitada por la estabilidad ya que su función es abrir enlaces lo que debilita la resistencia mecánica, y la estabilidad química, aumenta el coeficiente de dilatación, disminuye su viscosidad y aumentan las probabilidades de desvitrificación, entre otras características. Los estabilizantes compensan el efecto negativo de los fundentes reparando los enlaces abiertos por los anteriores. Por último, encontramos aquellos componentes encargados de colorar, decolorar, opacificar o fluidificar el vidrio.

Los vidrios más comunes son los llamados sodo-cálcicos debido a su composición donde el vitrificante es el óxido de sílice (SiO_2), el fundente óxido de sodio (Na_2O), el estabilizante óxido de calcio (CaO) y otros óxidos que brindan los colores característicos en la masa vítrea.

Si bien los componentes principales son mayoritariamente los mismos, se puede distinguir de la experiencia empírica en los vidrios con diferentes colores y específicamente en las botellas, que al ser sometidos a la misma curva de temperatura poseen diferentes puntos de fusión. Para este trabajo se elegirá trabajar con los vidrios con menor punto de fusión debido a que la técnica propuesta requiere la mayor fluidez posible ya que los hornos con los que se cuenta

para realizar el trabajo de laboratorio tienen una temperatura máxima de trabajo de 900°C (ver apartado 3.3.1 Marco institucional, equipos y materiales).

2.1.2.8. La implicancia de la presentación del vidrio en la técnica de casting

El tamaño y la presentación del vidrio utilizado influyen en la transparencia del objeto final. Para la técnica de casting se pueden emplear tanto vidrio en bloques, en láminas o molienda. Es importante tener en cuenta que la presentación de vidrio que se utiliza afecta la transparencia de la pieza, ya que, los fragmentos más pequeños atrapan más aire dentro del producto final, lo que resulta en una reducción de su translucidez (Sanz Lobo, 2005; Frabasile, 2021).

2.1.3. Aspectos críticos del casting de vidrio

2.1.3.1. Las curvas de temperatura

Según Frabasile (2021), los hornos utilizados en estos procesos suelen configurarse con programas que controlan la temperatura a lo largo del ciclo de horneado, ajustando esta variable en función del tiempo. En el trabajo con vidrio, es recomendable emplear controladores que permitan gestionar los segmentos de la curva de temperatura diferenciándose según su pendiente en rampas y mesetas. Las rampas determinan la velocidad de incremento o descenso de la temperatura en el horno, mientras que las mesetas mantienen la temperatura estable por un periodo para permitir procesos como la liberación de aire atrapado, la deformación gradual del vidrio bajo su propio peso, o el alivio de tensiones internas generadas durante la deformación, conocido como recocido. Durante los ensayos de laboratorio se utilizará una curva de temperatura específica para casting de vidrio que ya ha sido utilizada para tal fin y será presentada en el apartado 3.3 Metodología del trabajo.

2.1.3.2. La tensión superficial y su afección en las geometrías posibles

La capacidad del vidrio para fluir es limitada debido a su tensión superficial, que es significativamente más alta que en la mayoría de los líquidos. Según Sanz Lobo (2005), la gota de vidrio ideal tiene un diámetro de 6 mm, ya que esta es la dimensión de equilibrio en la tensión superficial. Al trabajar con láminas de vidrio en fusión, si su grosor es menor a 6 mm el material encogerá su superficie para alcanzar esta dimensión en su espesor, mientras que

si la pieza tiene más de 6 mm de espesor se deformará y extenderá su superficie tendiendo a los 6 mm.

Esto se traduce en el trabajo con casting, en que el vidrio no podrá fluir por canales estrechos de menos de 6 mm de diámetro, lo que condiciona las geometrías posibles de los volúmenes a realizar con esta técnica. Dicha condición deberá ser tenida especialmente en cuenta en la experimentación de laboratorio.

2.1.4. Tecnologías de fabricación digital: La impresión 3D

La cuarta revolución industrial o Industria 4.0 así denominada por algunas autoras es una nueva revolución consolidada a mediados del 2010 que integra tecnologías de fabricación e información para transformar la producción y cambiar las relaciones entre proveedoras, productoras y consumidoras donde se fusionan los sistemas físicos, los digitales y los biológicos para generar una red de producción inteligente (Rozo-García, 2020). En la actualidad, la fabricación digital ha permitido que diferentes profesionales y no profesionales adquieran conocimientos para crear objetos que antes requerían de expertas en herramientas y materiales, ahora robotizados. En los últimos años los costos de aplicación de nuevas tecnologías han decrecido significativamente, permitiendo que cada vez más personas tengan acceso a ellas y comiencen a visualizarlas como una posibilidad de producción (Cutler, 2012). Adicionalmente, según Servat y Castillo (2008) han surgido nuevas maneras de pensar, comprender y trabajar el vidrio a partir del avance de la tecnología, los materiales, las nuevas estéticas y la comunicación. Es así como, entre las ventajas de las nuevas tecnologías se identifica tanto la posibilidad de producir y reproducir formas complejas, como la precisión en los detalles.

Entre la variedad de materiales mayormente utilizados en estos procesos encontramos cera, madera, metal, polímeros y derivados de la celulosa como el papel o cartón. Sin embargo, a partir de la generalización que estas tecnologías vienen teniendo en las últimas décadas y las nuevas posibilidades de fabricación que presentan, la experimentación con otros materiales ha sido inminente.

Dentro de las tecnologías de fabricación aditiva, que consisten en agregar material controladamente para transformar un modelo digital tridimensional en un conjunto de finas

láminas superpuestas formando el volumen físico, la impresión 3D mediante tecnología de Fabricación por Fusión de Filamento es la que tiene mayor popularidad debido a los bajos costos de inversión de las herramientas (Chua & Leong, 2015).

2.1.5. Tipos de filamentos para impresión 3D

Hoy en día encontramos en el mercado variedad de filamentos para impresión 3D con diferentes propiedades y aplicaciones diversas. Todos están clasificados como termoplásticos, ya que es una condición indispensable para que sean posibles de imprimir. Algunos tienen como propiedades destacadas la facilidad de impresión mientras que otros presentan mejoras de resistencia o facilidad en sus acabados entre otras. En este sentido se listan a continuación los filamentos más populares en el mercado y sus principales características.

2.1.5.1. Ácido Poliláctico (PLA)

Este filamento es fabricado con un biopolímero biodegradable derivado del almidón de maíz. Es un material con propiedades de impresión 3D destacadas para la tecnología de Fabricación por Fusión de Filamento. Sus principales ventajas se basan en la biocompatibilidad, el bajo costo y la facilidad de impresión. Sin embargo, tiene baja resistencia térmica y mecánica si no contiene otros aditivos. Es uno de los materiales con mayor aplicación en medicina. (Días Martín, 2022; Besko, Bilyk, y Sieben, 2017)

2.1.5.2. Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

Este filamento es un derivado de petróleo. Es un material que tiene mayores requerimientos de impresión en relación a las temperaturas tanto de la boquilla como de la cama de impresión. Presenta una alta resistencia mecánica y química, es reciclable y se considera de bajo costo. Al imprimirse libera gases tóxicos. (Días Martín, 2022; Núñez 2020, Besko, Bilyk, y Sieben 2017).

2.1.5.3. Alcohol de polivinilo (PVA)

Este filamento es derivado del acetato de polivinilo y es un polímero sintético flexible y soluble en agua. Es comúnmente utilizado para envases y en aplicaciones médicas. (Garces Vargas y Hernandez Alba, 2020). Es común que se utilice este filamento para soportes en impresoras

con capacidad de impresión multifilamento, debido a la facilidad de retirar los soportes mediante su disolución en agua. Su costo es elevado.

2.1.5.4. Tereftalato de polietileno glicol (PETG)

Este filamento es un derivado del petróleo que posee buena resistencia química y mecánica, destacando su resistencia al desgaste, roturas y al fuego. Es reciclable y apto para su contacto con alimentos. Se considera un término medio en resistencia y facilidad de impresión entre el PLA y el ABS. Las propiedades de transparencia, y brillo son características propias de este filamento. (Besko, Bilyk, y Sieben 2017; Rodríguez Torres & Niño Rojas, 2021)

2.1.5.5. Poliestireno de alto impacto (HIPS)

El HIPS también es un material derivado del petróleo. Posee estabilidad térmica, rigidez, resistencia a la tracción y al impacto, permite la facilidad de coloración y es liviano. Además, es soluble en D-Limoneno por lo que también es un material que se utiliza como soporte en impresiones 3D. Otra de sus principales ventajas es que no se degrada con la humedad (Rodríguez Torres & Niño Rojas, 2021).

2.1.5.6. Poliuretano termoplástico (TPU)

Es un elastómero derivado del petróleo. Entre sus características se destaca su flexibilidad, resistencia al impacto, al desgaste y a la abrasión. Su resistencia térmica es baja (Besko, Bilyk, y Sieben 2017; Rodríguez Torres & Niño Rojas, 2021).

2.1.5.7. Nylon

Es un polímero sintético derivado del petróleo, muy utilizado en aplicaciones industriales. Tiene buena estabilidad dimensional, resistencia mecánica, química y es levemente flexible. Tiene una alta temperatura de fusión y al igual que el ABS emite gases tóxicos al imprimirse y no es reciclable (Besko, Bilyk, y Sieben 2017; Rodríguez Torres & Niño Rojas, 2021).

2.1.6. Antecedentes de investigación en la aplicación de fabricación digital a la técnica de casting de vidrio

Se presentan a continuación algunos antecedentes académicos encontrados que utilizan impresión 3D de diversos materiales para producir objetos de vidrio. Entre ellos se destacan

los que utilizan el vidrio directamente como material imprimible, así como aquellos que utilizan otros materiales para luego incluir el vidrio en etapas posteriores.

En cuanto a su utilización con vidrio como material principal en nuevas tecnologías de fabricación, varias compañías estadounidenses han experimentado con la impresión 3D en polvo de vidrio. Las piezas impresas se someten a un ciclo de horneado, creando piezas similares a la técnica vidriera *pâte de verre*⁵, con la principal característica del color, pero sin transparencia o brillo, debido a las partículas de aire que quedan atrapadas entre las de vidrio, perdiendo así las cualidades concomitantes del vidrio como material productivo (Cutler, 2012).

La fabricación de moldes metálicos para soplado es otra aplicación de la impresión 3D en el campo del vidrio, especialmente útil para modelos con alto nivel de detalle. Así también se ha investigado la impresión de moldes de mezclas de yeso en la Universidad de Falmouth (Cutler, 2012; Matthias & Jorgensen, 2012).

Por otro lado, Inamura, Stern, Lizardo, Houk, Oxman (2017) han creado una impresora 3D que utiliza vidrio fundido para fabricar piezas de geometrías complejas, abriendo nuevas posibilidades en la fabricación digital de vidrio en diseño y arquitectura.

Por su parte Whittingham (2019) presenta en su libro *Glass Casting* un método para realizar moldes cerrados de tacer único donde el positivo impreso en 3D con PLA utilizado para generarlo se pierde mediante un proceso de quemado, no pudiendo utilizar materiales derivados del petróleo que al quemarse liberen gases tóxicos.

Por otra parte, Haley, Klein, Jorgensen y Brown (2019) en su investigación buscan simplificar el proceso de producción de pequeños objetos de vidrio fundido a partir de archivos digitales 3D, especialmente para joyería. Exploran el uso de la impresión 3D con diferentes materiales

⁵ La técnica de pasta de vidrio, o *pâte de verre*, consiste en prensar una molienda de vidrio de granulometría fina sobre las paredes de un molde de boca ancha, sin contramolde, y sinterizarla mediante un ciclo de horneado. Permite un control preciso de la ubicación de diferentes colores en la pieza final. Los moldes, generalmente de yeso, absorben la humedad de la mezcla, fijando el vidrio contra las paredes. Las piezas resultantes son huecas, opacas, con el color del vidrio predominando sobre la transparencia. Frabasile (2021)

(filamentos convencionales PLA y ABS y resinas de impresión fotopoliméricas impresas por estereolitografía) para crear los positivos para casting.

Es así que no se encontraron trabajos que en lugar de quemar los positivos por acción del calor utilicen otros tipos de filamentos como por ejemplo los solubles en diferentes sustancias, como forma de evitar el deterioro del molde y quitar el plástico de la cavidad donde debe entrar el vidrio.

2.2.NORMATIVA

El presente apartado introduce algunas normativas que tienen relación con la técnica que este trabajo propone experimentar.

2.2.1. Normativas en el vidrio.

En cuanto al vidrio, existen normativas de calidad y seguridad principalmente para vidrio plano usado en construcción, pero son escasas para vidrio de envases. Las normas identificadas tratan aspectos como los cuellos, bocas, cierres, tolerancias de botellas, y pruebas de resistencia, que no son relevantes para este estudio. Las normas encontradas que se considera pueden tener vínculo con el trabajo aquí desarrollado son las siguientes:

- UNE 126101:2011- Envases de vidrio. Terminología vidriera. Generalidades. Esta norma establece las definiciones relativas a los envases de vidrio, la esquematización y denominación de las partes de un envase y las tolerancias estándar de los mismos.
- UNE-CR 13504:2001- Envases y embalajes. Valorización de material. Criterios para un contenido mínimo de material reciclado. Este informe aborda los criterios para un contenido mínimo de materiales reciclados presentes en los envases y embalajes, trata los criterios que influyen en el nivel aceptable de materiales reciclados, y de la metodología que permite controlar este contenido.

2.2.2. Manejo de materias primas en polvo para la técnica de casting de vidrio

El manejo de polvos como el yeso y el cuarzo está regulado por la normativa europea por considerarse sustancias peligrosas por exposición. Se citan aquí únicamente las normas que refieren a la utilización de estos materiales.

El Reglamento REACH (CE nº 1907/2006) regula la producción y el uso seguro de sustancias químicas, incluidas las que contienen sílice cristalina, exigiendo evaluaciones de riesgo y medidas de seguridad. La Directiva 2004/37/CE protege a las trabajadoras expuestas a agentes cancerígenos, como la sílice cristalina respirable, estableciendo límites de exposición para prevenir enfermedades como la silicosis. La Directiva 98/24/CE ofrece pautas para la protección contra agentes químicos peligrosos, enfocándose en la identificación de riesgos y medidas preventivas.

2.2.3. La impresión 3D y los filamentos

En relación con el proceso de impresión 3D, la norma UNE-EN ISO/ASTM 52910:2020, titulada *Fabricación aditiva. Diseño. Requisitos, directrices y recomendaciones* establece parámetros y lineamientos para el diseño de piezas para ser producidas mediante fabricación aditiva.

Por su parte, los filamentos utilizados en esta tecnología de fabricación tienen sus propias normativas. Se distinguen en los envases que los contienen una serie de símbolos que sintetizan las normas que cumplen (Figura 4).

Figura 4. Ejemplo de etiqueta de filamento PLA del mercado local



Fuente: Elaboración propia

Entre ellos encontramos el cumplimiento de la norma ISO 9001 de Sistemas de gestión de la calidad y requisitos, el símbolo de CE que indica una directiva general sobre la seguridad de los productos (2001/95/CE): Establece que los productos comercializados dentro de la UE deben ser seguros para las consumidoras, por lo que quien lo fabrica declara que sus filamentos han sido evaluados para garantizar el uso seguro, minimizando riesgos de toxicidad o emisiones durante la impresión. En la misma línea el símbolo REACH se refiere al Reglamento (CE) n.º 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo que regula el Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias Químicas (por sus siglas en inglés), y tiene el propósito de proteger la salud humana y el medio ambiente de los riesgos que pueden derivarse de las sustancias químicas. Por su parte RoHS se refiere a la Directiva 2011/65/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, también conocida como *Directiva sobre la Restricción de Sustancias Peligrosas* (Restriction of Hazardous Substances Directive, por sus siglas en inglés). Esta

regulación limita el uso de materiales peligrosos específicos en equipos eléctricos y electrónicos, incluyendo productos como ciertos aditivos en filamentos de impresión.

Si bien no se incluye en los envases relevadas de los filamentos existen normas específicas para ciertos tipos de filamentos que abordan aspectos como el diámetro, la resistencia a la tracción, los requisitos de etiquetado y embalaje para el PLA como la ISO 5425:2023. Además, ASTM International ofrece normas complementarias en los aspectos técnicos de los materiales de impresión 3D, incluyendo la evaluación de propiedades mecánicas y el rendimiento de los filamentos bajo diferentes condiciones de impresión.

2.3.CONCLUSIONES

Este apartado sintetiza los antecedentes y marco teórico sobre la composición de moldes, el uso de vidrio de botellas y la incorporación de impresión 3D para actualizar técnicas tradicionales. A partir de los análisis en diversas dimensiones que afectan la técnica que este trabajo propone se determinaron aspectos fundamentales que establecen las bases sobre las que se desarrollará esta investigación.

En relación con la mezcla para la fabricación del molde, el análisis de fuentes y bibliografía sobre la temática revela que sus componentes difieren según quien escribe y el mercado del país en el que se encuentre. Mientras que algunos textos Whittingham (2019), Brachlow (2019) y Bristogianni, Oikonomopoulou, Veer, Snijder, & Nijse (2017), Oikonomopoulou, Bristogianni, Barou, Jacobs, Frigo, Veer, & Nijse (2018) utilizan formulaciones conformadas en la industria prontas para trabajar con estas técnicas, otros textos y artistas latinoamericanos en cuyo mercado no existen estas mezclas preparadas, realizan sus propias formulaciones de materiales para la fabricación del molde (Romero (2012), Ebanks (2018), Whittingham (2019), Romero, Gurman (comunicación personal, 2022), Da Ponte (comunicación personal, 2023)). En todos los casos, la base de estas formulaciones es yeso, cuarzo y agua en partes iguales y en algunos casos se agregan diversos materiales en las diferentes capas del molde según quien lo fabrique, específicamente cuando se trata de piezas con grandes volúmenes de vidrio y que, por lo tanto, requieren mayor resistencia. Dado el alcance de este trabajo, en los ensayos de laboratorio se materializarán piezas de pequeños formatos por lo que se determinó una mezcla de yeso, cuarzo y agua en iguales proporciones

según su masa y su aplicación de forma manual sobre el modelo, aspecto que también se aborda por los textos citados anteriormente y se concluye que es el método que brinda mayor resistencia al molde y mejores propiedades térmicas en relación con la distribución de temperatura. Se tendrá especial cuidado con estos materiales de acuerdo con las normativas REACH (CE nº 1907/2006 y la Directiva 2004/37/CE).

En otro sentido, debido a la actualidad productiva del contexto en el que se realiza este trabajo se definió la utilización de vidrio de descarte en coherencia con Amorín, Rava, Schmukler, Castro, Frabasile (2019) y específicamente de envases en relación con lo expuesto por Harder (2019) quien indica que esta presentación es la de mayor producción a nivel mundial.

Las botellas seleccionadas para realizar los ensayos de laboratorio serán de una única fábrica que se determinará al avanzar en el trabajo práctico, según la disponibilidad del material que se encuentre, como forma de minimizar la cantidad de variables relacionadas con la composición de la materia prima utilizada.

Paralelamente, se resalta en varios de los textos analizados (Rozo-García, 2020; Cutler, 2012; Servat y Castillo, 2008) la concepción que la fabricación digital está cambiando las formas de trabajo y los resultados volumétricos con diversos materiales. El vidrio no es ajeno a estos cambios, campo en el que existen diversidad de trabajos académicos (Matthias & Jorgensen, 2012; Inamura, Stern, Lizardo, Houk, Oxman, 2017; Haley, Klein, Jorgensen y Brown, 2019) que investigan en diversos sentidos la aplicación de la impresión 3D a la producción con este material. Sin embargo, ninguna de las investigaciones relevadas explora métodos alternativos al quemado para retirar los positivos de dentro de los moldes fraguados. Dada la diversidad de propiedades que ofrecen los filamentos que hoy se encuentran en el mercado, el abordaje de una investigación en este sentido aporta a la construcción de conocimiento entorno a la actualización de una técnica tradicional de conformación de piezas de vidrio. Es así como este trabajo propone el análisis de filamentos que se encuentren en el mercado local, testeando mediante ensayos de laboratorio únicamente aquellos que, habiendo evaluado la forma más factible de quitarlos de dentro del molde, su proceso no implique perjuicios para la salud ni para el ambiente.

Para finalizar, este trabajo aporta a la actualización de una técnica tradicional mediante tecnología de fabricación aditiva de carácter doméstico, aspecto que habilita e incentiva su democratización, resaltando la viabilidad de emplear filamentos de común acceso en el mercado local. La anticipación de resultados revela una optimización de los procesos que implica el casting de vidrio, lo que además aporta a la replicabilidad de las piezas.

3. DISEÑO Y DESARROLLO DE LA PROPUESTA

Este capítulo abordará la explicación de la propuesta de investigación en relación con la problemática planteada previamente. Tiene un enfoque experimental de laboratorio en el que se procura analizar comparativamente diversos filamentos para la impresión 3D doméstica que se encuentren en el mercado.

3.1.OBJETIVOS Y COMPETENCIAS BÁSICAS DE LA PROPUESTA DE INTERVENCIÓN

Este apartado describe los objetivos principales y específicos de la propuesta de investigación, junto con métricas, plazos e inversiones máximas.

3.1.1. Objetivo general de la propuesta

- Determinar la viabilidad de cinco tipos de filamentos de impresión 3D para la creación de moldes positivos en el proceso de casting de vidrio y compararlos entre sí en términos de coste de fabricación, proceso de extracción del molde, ausencia de residuos de impresión en la pieza de vidrio y precisión en la copia de detalles.

3.1.2. Objetivos específicos de la propuesta

- Diseñar un modelo experimental que permita evaluar las variables que influyen en el proceso de casting de vidrio
 - Métricas:
 - Adaptabilidad del modelo: Se verificará que el modelo diseñado sea compatible con al menos 4 de los 5 filamentos seleccionados para realizar los ensayos de laboratorio.
 - Volumen de moldes fabricados exitosamente: Porcentaje de moldes sin fracturas, deformaciones críticas o fallas durante el colado $\geq 85\%$.
 - Tasa de colado exitoso del molde: Se determina como el porcentaje de piezas de vidrio que resulten llenas en más de un 95% y sin defectos visibles, buscando alcanzar un éxito $\geq 90\%$ de las pruebas realizadas.
 - Plazo e inversión máxima:

El límite temporal para el diseño de este modelo experimental es de un mes, con una inversión máxima de \$700 USD que incluye la compra de una impresora personal, filamentos y fungibles para la fabricación de moldes.

- Testear cinco tipos de filamento disponibles en el mercado local y establecer métodos para retirarlos de dentro del molde.
 - Métricas:
 - Cantidad de filamentos testeados: Al menos 5 filamentos analizados mediante ensayos de laboratorio
 - Tiempo de extracción: Que al menos un filamento con alguno de los métodos de extracción establecidos reduzca los tiempos necesarios para retirar los positivos de dentro de los moldes en comparación a la técnica tradicional de la cera perdida.
 - Viabilidad práctica: Que se identifique al menos un método y filamento como viable para un taller estándar.
 - Plazo e inversión máxima:

Los ensayos de laboratorio deberán concluirse dentro de los dos meses siguientes a la selección de los filamentos, con una inversión máxima de \$50 USD destinada a la compra de materiales y fungibles para la extracción de los modelos impresos de dentro de los moldes.

- Analizar y evaluar las propiedades y características de la impresión 3D con los cinco filamentos seleccionados en la fabricación de moldes de yeso para la producción de objetos de vidrio reciclado, utilizando los resultados de los ensayos de laboratorio y la información registrada en fichas de sistematización.
 - Métricas:
 - Reproducción de detalles: Medida mediante la evaluación cualitativa de tres niveles: alta fidelidad, moderada fidelidad o baja fidelidad definidos de la siguiente manera:
 - Alta fidelidad: Todos los detalles del modelo original, incluyendo aristas, relieves, patrones y texturas finas (menores a 0,5 mm),

se reproducen sin pérdida visible. Las superficies son uniformes y sin distorsiones apreciables a simple vista o con lupa.

- Moderada fidelidad: Las formas generales y relieves mayores a 0,5 mm del modelo original se conservan, pero presenta una pérdida parcial de texturas finas o detalles menores a 0,5 mm. Las superficies tienen leves irregularidades pero la forma general es reconocible.
 - Baja fidelidad: Hay pérdida significativa de detalles finos, texturas o formas. Las reproducciones presentan inconsistencias visibles y distorsiones en la superficie o en la forma general que se alejan del modelo original.
- Que al menos un filamento tenga un costo por molde menor o igual que el costo de la técnica tradicional de cera perdida (costo base: U\$S 1,4 por pieza de cera).
 - Que al menos un filamento tenga un costo energético o de solventes menor o igual que el costo de la técnica tradicional para la extracción de los diferentes filamentos (costo base: U\$S 0,14 por pieza de cera)
 - Tasa de éxito en moldes fabricados con vidrio reciclado: $\geq 80\%$ de piezas terminadas sin defectos relacionados con el material reciclado.
 - Registro del 100% de los ensayos realizados en fichas estandarizadas que incluyan variables como costo, éxito del colado, y calidad de la pieza final.
- Plazo e inversión máxima:

Todos los ensayos deben ser documentados en fichas estandarizadas, con un plazo para su finalización de 2 meses. No se dispone de presupuesto adicional para el cumplimiento de este objetivo.

3.2. PÚBLICO OBJETIVO

Este apartado está orientado a identificar los perfiles de aquellos que pueden beneficiarse directamente de los conocimientos y aplicaciones prácticas presentados y desarrollados en este trabajo.

Habiendo identificado problemas en los procesos de producción de piezas de vidrio mediante la técnica de casting que dificultan el control de los detalles y la reproducción de las piezas, este trabajo propone un análisis comparativo orientado a optimizar dichos procesos. De este modo se puede determinar que el público objetivo de este trabajo abarca a todas aquellas personas que actualmente utilizan esta técnica o desean incorporarla en su práctica.

Se identifica en este sentido que el público objetivo de este trabajo incluye, diseñadoras, artesanas, pequeñas productoras y la comunidad académica.

En primer lugar, las artistas que trabajan con la técnica de casting de buscan constantemente innovar en sus obras, enfrentándose a retos como la precisión y la complejidad en la creación de moldes. La implementación de técnicas analizadas en este trabajo les permitirá explorar nuevas formas y conceptos que antes podían resultar complejas de materializar. Al consultarla, una artista de vidrio uruguaya manifiesta que esta conjunción de técnicas podría brindarle mayor rapidez, mayor exactitud, menor toxicidad y complejidad en el proceso que la técnica tradicional (Turovlin⁶, comunicación personal, 2024).

Por otro lado, en el ámbito del diseño, esta exploración de la técnica aporta a capacidad de proponer productos seriados a partir de un proceso optimizado, asegurando una mayor replicabilidad y autenticidad en la producción. El diseño uruguayo no contempla al vidrio como material de trabajo para sus producciones (Nallem, 2017). En este sentido, la investigación propone un avance para el diseño actual permitiendo incorporar una alternativa de fabricación con este material a sectores productivos de la región.

⁶ Dina Turovlin es una artista de vidrio contemporánea de Uruguay. Su obra explora temas relacionados con la naturaleza y el comportamiento social humano. Ha participado en numerosas exposiciones nacionales e internacionales y ha recibido varios premios nacionales.

Así también se resalta la relevancia del proceso que aquí se estudia en un mercado donde la demanda de productos personalizados está en constante crecimiento. Al simplificar los pasos de producción y reducir los costos asociados, las diseñadoras podrán responder a las tendencias del mercado sin complejizar el proceso de producción.

Por otro lado, el desarrollo que este trabajo propone puede resultar atractivo para artesanas y pequeñas productoras que hoy no trabajan con casting de vidrio debido a las dificultades en el proceso. La replicabilidad que este desarrollo les permite la fabricación de piezas seriadas disminuyendo la cantidad de pasos que implica la técnica tradicional.

Finalmente, la comunidad académica que desempeña sus actividades en el campo del diseño y la fabricación con vidrio encontrará en esta investigación un avance en el conocimiento con relación a la integración de la impresión 3D en el proceso de casting. Se identifica que, a partir de los resultados de este trabajo se pueden abrir nuevas líneas de investigación que exploren la intersección entre la tecnología, el arte y el diseño con vidrio.

3.3. METODOLOGÍA DEL TRABAJO

Este apartado presentará el diseño metodológico de la investigación, los métodos de recolección de datos y las técnicas de análisis utilizadas para examinar y validar los resultados.

3.3.1. Marco institucional, equipos y materiales

El trabajo experimental se realizará en el Laboratorio de Vidrio de la Escuela Universitaria Centro de Diseño (EUCD) de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU) de la Universidad de la República (UDELAR) en Uruguay, institución en la que me desempeño como docente e investigadora desde 2019. Cuenta con espacio definido con equipamiento básico, superficies de trabajo para carga y descarga de los hornos, cortadores de vidrio, pulidora, guías de corte manuales, taladro, compás, moldes e insumos varios que estarán a disposición de requerirse para esta investigación.

El laboratorio cuenta con dos hornos eléctricos para el trabajo con vidrio a temperaturas de hasta 900°C. Uno de 40 x 40 cm de base y 70 cm de altura, de abertura frontal con programador de curvas de temperatura de hasta siete segmentos (denominado por el equipo

docente como “horno grande”) y otro de iguales dimensiones de base, 20 cm de altura y abertura vertical (denominado por el equipo docente como “horno chico”).

Por otro lado, el laboratorio también cuenta con maquinaria eléctrica de corte y desbaste de vidrio entre las que se encuentran, una sierra circular asistida por agua para corte y tres lapidadoras para pulir y facetar vidrio en frío, que también podrán ser utilizadas de requerirse para la investigación.

En cuanto a la impresión 3D, adquiriré para este trabajo una impresora personal con tecnología de Fabricación por Filamento Fundido (FFF) en la que se materializarán en diferentes filamentos poliméricos los modelos a ser reproducidos en vidrio.

3.3.2. Análisis de características y propiedades de filamentos que se encuentran en el mercado local

Se realizará un relevamiento en proveedoras locales de filamentos para identificar los tipos de materiales disponibles en Uruguay. A partir de esta investigación, se procederá a buscar y comparar en una tabla las características técnicas de cada filamento encontrado, incluyendo propiedades mecánicas, térmicas, costos y su impacto en la salud humana y medio ambiente. A partir de este análisis se propondrán procedimientos para quitar los positivos de dentro de los moldes de yeso teniendo en cuenta las características estudiadas y se seleccionarán para testear en ensayos de laboratorio aquellos filamentos y métodos de extracción que no supongan perjuicios para la salud ni para el ambiente.

3.3.3. Determinación de método de extracción

Se determinarán los pasos a seguir en los ensayos de laboratorio para cada uno de los métodos de extracción que se definan en el análisis de los filamentos. Esto permite la sistematización de los procesos, resultados y su consecuente comparación.

3.3.4. Ensayos de laboratorio de casting a partir de positivos impresos en 3D

Para realizar los ensayos de laboratorio se definirá un modelo positivo que será impreso en los diferentes tipos de filamento seleccionados para luego realizar el molde de yeso y cuarzo a su alrededor. Este modelo deberá tener detalles que permitan evaluar la capacidad del molde de copiar y reproducirlos en vidrio. También se busca que el modelo sea representativo

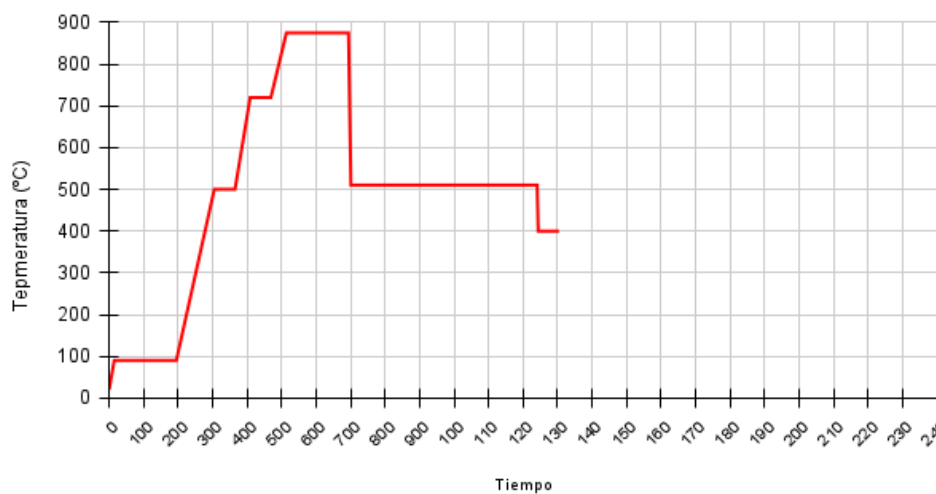
para posteriores aplicaciones prácticas, de modo que los resultados obtenidos sean extrapolables a otros proyectos de diseño en vidrio.

Inicialmente, se diseñará un modelo primario simple, de fácil impresión sin necesidad de soportes, que cumpla con las características descritas para el análisis básico de reproducción. Los ensayos de laboratorio con este modelo primario permitirán determinar cuál o cuáles filamentos son adecuados para trabajar esta técnica. Así, tras validar los resultados obtenidos con este modelo inicial, se desarrollarán modelos más complejos y desafiantes, que exploren las capacidades de la técnica de casting y permitan una evaluación detallada del o de los filamentos seleccionados en términos de precisión y fidelidad en la reproducción.

Cada modelo será impreso en 3D en los filamentos seleccionados a lo que posteriormente se le realizará un molde de yeso, cuarzo y agua en partes iguales según su masa que se construirá a mano, se vaciará aplicando los diversos métodos definidos, se llenará con el volumen necesario de vidrio definido a partir del modelado 3D y se someterá a una curva de horneado de casting. Luego de horneado se romperá el molde y se limpiará el modelo para evaluar los detalles de cada pieza.

La curva de horneado utilizada para todas las pruebas está definida por las docentes Beatriz Amorín y Carolina Frabasile a partir de la experiencia de trabajo con la técnica de casting en el Laboratorio de Vidrio de la EUCD y las posibilidades de los hornos con los que allí se cuenta (Figura 5).

Figura 5. *Gráfica de temperatura en función del tiempo*



Fuente: Elaboración compartida con Beatriz Amorín

La curva finaliza en 400°C lo que significa que allí se apaga el controlador del horno y la temperatura continúa en descenso hasta alcanzar la temperatura ambiente según las posibilidades de liberación de calor que tiene el horno dependiendo de su aislación térmica. Se puede afirmar a partir de la experiencia que este descenso es lento en los hornos del Laboratorio de Vidrio y que en ningún caso lleva menos de 6 horas (Amorín⁷, comunicación personal, 2024).

Se utilizarán dos programas enganchados entre sí para controlar el horno dadas la cantidad de rampas y mesetas que esta curva de temperatura presenta y serán los representados en la Figura 6 y Figura 7.

Figura 6. Programa 5 horno grande del Laboratorio de Vidrio

PROGRAMA		HORNO		PROCESO	Casting vidrio macizo
5		<input type="checkbox"/> CHICO <input checked="" type="checkbox"/> GRANDE		FECHA	3/ 5/ 2024
	PT (min)	PE	PSP (°C)	LP	
0	-	-	20		
1	15	0	90		
2	180	0	90		
3	110	0	500		
4	60	0	500		
5	44	0	720		
6	60	0	720		
7	45	0	875	6	

Fuente: Elaboración compartida con Beatriz Amorín

⁷ Beatriz Amorín es Magíster en Enseñanza Universitaria (FHCE-CSE), Profesora Adjunta del Área Tecnológica y docente e investigadora en el Laboratorio de Vidrio de la EUCD-FADU. Desde 2010, ha sido responsable de proyectos de enseñanza, investigación y extensión en el ámbito del vidrio, que ha sido una constante en su vida profesional y académica.

Figura 7. Programa 6 horno grande del Laboratorio de Vidrio

PROGRAMA 6	HORNO		PROCESO	Casting vidrio macizo
	<input type="checkbox"/> CHICO	<input checked="" type="checkbox"/> GRANDE	FECHA	3/ 5/ 2024

	PT (min)	PE	PSP (°C)	LP
0	-	-	875	
1	180	0	875	
2	7	0	510	
3	540	0	510	
3	3	0	400	
5	60	0	400	
6	0	0	0	
7	0	0	0	

Fuente: Elaboración compartida con Beatriz Amorín

3.3.5. Comparativa de resultados de ensayos de laboratorio y análisis de datos

La comparativa de resultados de los ensayos de laboratorio y el análisis de datos se llevará a cabo mediante la observación y análisis de las características visuales de las piezas de vidrio obtenidas. Esto permitirá entender cómo las características de los modelos 3D se traducen en la reproducción final en vidrio, permitiendo evaluar la efectividad del proceso de fabricación.

Para realizar la comparación, se deben llevar a cabo observaciones que incluyan aspectos como la fidelidad de los detalles finos, la precisión de las formas y las texturas. Estos parámetros permitirán identificar y registrar posibles diferencias entre los detalles de los positivos impresos y los resultados obtenidos en las piezas de vidrio.

Una vez recogidos los datos visuales, se identificarán patrones o diferencias significativas que puedan surgir entre los ensayos, para determinar si las posibles variaciones entre los modelos de vidrio y los impresos están relacionadas con el tipo de filamento utilizado en la impresión 3D, con el método de extracción o si se deben a la geometría definida para los ensayos.

Dado que se utilizará la misma mezcla fraguante, la misma curva de temperatura y el mismo tipo de vidrio en todos los ensayos, cualquier variación observada en los resultados será

atribuible únicamente a las diferencias en los filamentos utilizados, permitiendo una evaluación precisa de su impacto en la calidad final de las piezas de vidrio.

3.3.6. Sistematización de procesos y resultados

La sistematización se realizará a través de fichas de registro para cada ensayo que incluirán los datos de materiales, parámetros de impresión, el método de extracción del positivo del molde y fotografías del resultado de la pieza de vidrio luego del horneado y del desmolde.

La mezcla de materiales fraguantes, el método de fabricación del molde, el vidrio, su presentación y granulometría, y el ciclo de horneado no serán incluidos en las fichas de sistematización por ser constantes para todas las muestras.

Además, se incluirán en las fichas de sistematización un espacio para observaciones en las que se registrará cualquier irregularidad, o defectos observados en el proceso y de la pieza final.

Los resultados se evaluarán en relación con los siguientes indicadores de desempeño:

- Calidad de detalle: Capacidad del molde para reproducir con precisión los detalles finos presentes en el modelo impreso en 3D. Dentro de estos se comparará cualitativamente mediante una inspección visual el modelo original con el molde y modelo de vidrio. La evaluación se realizará con los criterios de las métricas definidas en el objetivo específico tres de esta propuesta de investigación, evaluando la reproducción de la complejidad geométrica, identificando si bordes, relieves y patrones están completos o se pierden parcial o totalmente.

Las fichas de sistematización permitirán la visualización de la información de forma clara y ordenada que facilita la comparación de resultados. De ser necesario se podrán comprar los datos analizados en tablas que permitan identificar patrones o aislar ciertos datos para una revisión objetiva de la viabilidad de los distintos filamentos para la creación de moldes positivos en el proceso de casting de vidrio.

Finalmente, cada ensayo incluirá un apartado de conclusiones donde se expliquen los principales aciertos o inconvenientes e incluya indicaciones para próximas iteraciones.

3.3.7. Diseño de piezas representativas del proceso de casting empleando positivos modelados e impresos en 3D

Se realizarán piezas representativas del proceso de casting empleando positivos modelados e impresos en 3D, explorando las capacidades expresivas y geométricas que esta combinación permite. Se producirán formas que resultarían difíciles o imposibles de lograr con la técnica tradicional.

Los positivos serán modelados utilizando software de diseño 3D, donde se incluirán detalles finos, cavidades, mecanismos encastrados integrados por impresión (Print-in-Place)⁸ y formas orgánicas o geométricas que presenten desafíos para las técnicas convencionales de fundición. Para realizar el casting de estos modelos se incorporará un parámetro nuevo que no se tomó en cuenta en los modelos anteriores: las tolerancias.

La determinación de tolerancias en piezas de casting de vidrio a partir de positivos impresos en 3D es un proceso que presenta mayor complejidad en relación con el trabajo con las tolerancias de impresión 3D. La necesidad de la fabricación de moldes de yeso introduce una segunda etapa donde las tolerancias necesitan ser ajustadas de acuerdo con la capacidad de las mezclas fraguantes para fluir dentro de los espacios entre piezas que las tolerancias implican.

Se espera que las piezas representativas del proceso de casting empleando positivos modelados e impresos en 3D permitan demostrar las capacidades y ventajas del proceso frente a la técnica tradicional.

3.4. TEMPORALIZACIÓN

Este apartado procura determinar los tiempos de cada actividad a desarrollar durante esta investigación como forma organizar las tareas y plasmar un panorama global del trabajo.

⁸ Este término refiere a imprimir objetos conformados por partes separadas pero entrelazadas ("intertwisted"), de modo que puedan moverse relativamente entre sí una vez completado el proceso de impresión. Este método permite la creación de sistemas con juntas y mecanismos funcionales, eliminando la necesidad de ensamblaje posterior (Rosa, Bordegoni, Dentelli, Sanzone, & Sotgiu; 2017).

3.4.1. Identificación de actividades a desarrollar

Se identifican a continuación la lista de actividades que componen el desarrollo y ensayos de laboratorio que este trabajo implica en relación con la metodología propuesta. Los tiempos derivan de la experiencia previa en el trabajo con métodos de fabricación aditiva y de casting de vidrio.

- A. Relevamiento de proveedoras locales de filamentos
- B. Recopilación de información técnica
- C. Creación de una tabla comparativa de características
- D. Diseño de métodos de extracción del positivo del molde
- E. Definición del modelado primario
- F. Modelo de referencia con la técnica tradicional de modelado de cera
- G. Construcción manual de moldes
- H. Vaciado de moldes y colado de vidrio
- I. Desmolde y limpieza de piezas
- J. Documentación visual
- K. Creación de fichas de sistematización
- L. Elaboración de tablas para análisis de patrones
- M. Modelado de piezas representativas
- N. Fabricación de moldes y casting
- O. Evaluación de resultados finales

3.4.2. Dependencias de actividades y estimación de duración

Tabla 1. *Estimación de duración de actividades (en días)*

Identificación y nombre de la actividad	Precede	T1 (Tiempo optimista)	Tp (Tiempo más probable)	T2 (Tiempo pesimista)	Duración estimada (μ)	Varianza (σ^2)
A Relevamiento de proveedoras locales de filamentos	No procede	3	5	7	5	0,44
B Recopilación de información técnica	No procede	3	5	7	5	0,44
C Creación de una tabla comparativa de características	Precede B	2	3	4	3	0,11

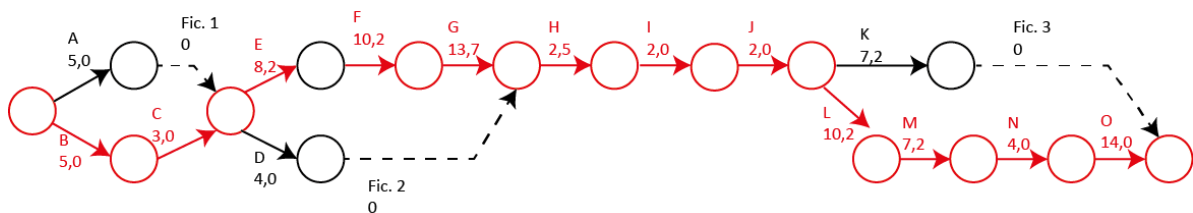
D	Diseño de métodos de extracción del positivo del molde	Precede C	3	4	5	4	0,11
E	Definición del modelado primario	Precede A y C	7	8	10	8,2	0,25
F	Modelo de referencia con la técnica tradicional de modelado de cera	Precede E	7	10	14	10,2	1,36
G	Construcción manual de moldes	Precede F	10	14	16	13,7	1,00
H	Vaciado de moldes y colado de vidrio	Precede G y D	5	7	14	7,8	2,25
I	Desmolde y limpieza de piezas	Precede H	1	2	3	2	0,11
J	Documentación visual	Precede I	1	2	3	2	0,11
K	Creación y llenado de fichas de sistematización	Precede J	5	7	10	7,2	0,69
L	Elaboración de tablas para análisis de patrones	Precede J	7	10	14	10,2	1,36
M	Modelado de piezas representativas	Precede L	5	7	10	7,2	0,69
N	Fabricación de moldes y casting	Precede M	3	4	5	4	0,11
O	Evaluación de resultados finales	Precede N	10	14	18	14	1,78

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Diagrama PERT (Program Evaluation and Review Technique)

Se presenta a continuación el diagrama de PERT de la distribución de actividades (Figura 8).

Figura 8. Representación del Diagrama PERT según actividades definidas



Fuente: Elaboración propia

$$\mu = \sum \mu_{i_{RC}} = 82 \text{ días}$$

$$\sigma^2 = \sum \sigma^2_{RC} = 9,57 \text{ días}^2$$

La suma de los tiempos de la ruta crítica da 82 días por lo que podemos decir que esa es la duración total estimada del proyecto.

La varianza total del proyecto dada la ecuación anteriormente definida es de 9,57 días².

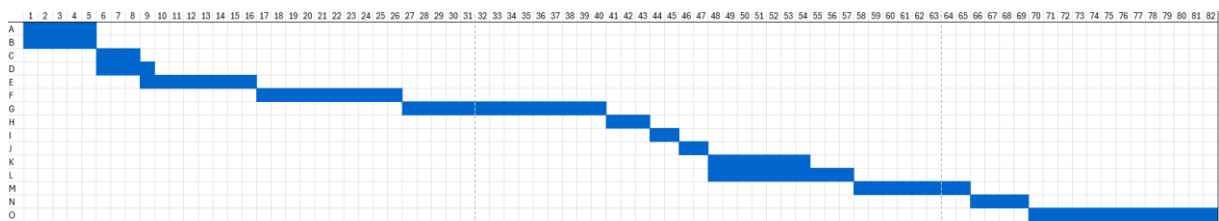
La desviación típica del proyecto es entonces $\sqrt{9,57} = 3,09$ días.

El proyecto seguirá entonces una distribución de probabilidad $N(,)= N(82,3,09)$.

3.4.4. Diagrama de Gantt

El siguiente diagrama de Gantt muestra la distribución de las tareas a realizar en función de los días previstos para su desarrollo (Figura 9). Ver a mayor tamaño en Anexo C.

Figura 9. Diagrama de Gantt



Fuente: Elaboración propia

3.5. TAREAS

El siguiente apartado presenta un desglose de las actividades propuestas para el proyecto que aquí se desarrolla. Se incluyen para cada una el alcance, los recursos necesarios, la extracción y el tipo de datos esperados y las posibles dificultades. No se incluye en esta sección la duración de cada tarea por haberse estimado en el apartado anterior.

3.5.1. Relevamiento de proveedoras locales de filamentos

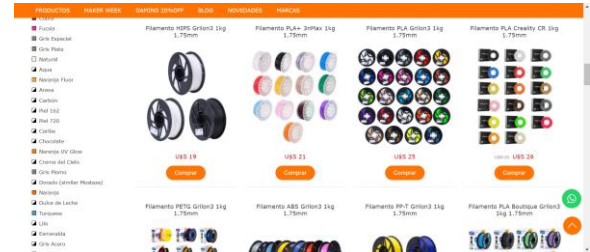
Esta tarea procuró identificar proveedoras locales de filamentos que comercialicen los materiales de impresión 3D necesarios para esta investigación. Se llevó a cabo mediante una investigación en línea (Figura 10 y Figura 11, ver a mayor tamaño en Anexo C) y presencial, obteniendo recomendaciones y cotizaciones de las vendedoras. Se recogieron datos cuantitativos en relación con los precios de los filamentos, pero también cualitativos en relación con las especificaciones y posibles adecuaciones a la técnica con la que aquí se trabajará aportando así al objetivo específico 1. Los recursos necesarios para su desarrollo fueron un dispositivo electrónico con acceso a internet y la posibilidad de desplazarse hacia las tiendas de venta para interactuar con las vendedoras. Las principales dificultades que se encontraron fueron la presentación de la mayor parte de los filamentos en bobinas de a kilo,

lo que implica adquirir mayor cantidad de material que el requerido para realizar los ensayos de laboratorio lo que encarece la investigación que aquí se desarrolla.

Figura 10. Captura de pantalla de proveedora local de filamentos



Figura 11. Captura de pantalla de proveedora local de filamentos



3.5.2. Recopilación de información técnica

Esta tarea está fuertemente ligada a la anterior y procuró obtener la información técnica relevante sobre los materiales de impresión 3D que podrán ser utilizados en esta investigación. La forma de recoger datos y los recursos necesarios fueron los mismos que en la tarea anterior mediante investigación en línea en páginas de proveedoras (Figura 12, ver a mayor tamaño en Anexo C) y fuentes académico-científicas y en contacto presencial con proveedoras, por lo que los recursos necesarios también se consideran los mismos. Los datos relevados son principalmente cualitativos en relación con los filamentos y sus propiedades, aportando al objetivo específico 1. No se encontraron dificultades en esta tarea.

Figura 12. Captura de pantalla de proveedora local de filamentos. Especificaciones HIPS



Fuente: Elaboración propia

3.5.3. Creación de una tabla comparativa de características

Esta tarea ordenó la información recopilada en las dos anteriores de forma que permita comparar y evaluar las características, propiedades y costos de los diferentes filamentos, facilitando así la toma de decisiones sobre su utilización en los ensayos de laboratorio. Para su desarrollo además de los datos extraídos de las tareas anteriores se utilizó un dispositivo electrónico con software adecuado para crear dicha tabla (Figura 13). Los datos generados fueron cualitativos en términos de comparación y análisis para los futuros ensayos de laboratorio que aportarán al cumplimiento del objetivo específico 1. La dificultad que se enfrentó radica en ordenar la información de modo que colocada en este texto cumpla con los requerimientos académicos de formato sin complejizar su lectura. Ver datos completos en la Tabla 3.

Figura 13. Captura de pantalla de tabla en elaboración

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		PLA	Hyper PLA	ABS	Flex (TPU)	PETG	HIPS	PVA	Nylon
2	Proveedor	Macrotec, Vacodir, Proyectocolor	Macrotec	Macrotec, Vacodir, Proyectocolor	Macrotec, Proyectocolor	Macrotec	Macrotec	Vacodir	Macrotec
3	Temperatura impresión	190-210°C	190°C- 220°C	210°C-250°C	210°C- 230°C	220°C-250°C	235°C- 245°C	185°C- 220°C	
4	Temperatura de la cama	0-60°C	50°C - 60°C	90°C-110°C	70°C -90°C	70°C -90°C	85°C	45 °C -60 °C	
5	Compatible con impresoras sin cerramiento	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	
6	Resistencia térmica (temperatura hasta la que resisten las piezas impresas)	60°	60°	100°	150°	85°	85°	60°	
7	Soluble completamente en	-	-	Acantona	-				
8	Impacto ambiental	Bajo	Bajo	Alto	Moderado				
9	Emisión de gases tóxicos	No	No	Si	Si				
10				(Altas)	(Bajas)				
11	Precio en U\$S por Kg	19	39	26	38				

Fuente: Elaboración propia

3.5.4. Determinación de métodos de extracción del positivo del molde

El método de extracción de cera de dentro de los moldes se realiza por vaporización indirecta (Whittingham, 2019) que consiste en utilizar el vapor generado por agua hirviendo para calentar el molde y permitir que la cera contenida en su interior se derrita y escurra. Se coloca una barrera sobre la olla y el molde como una bolsa de plástico o papel aluminio, que dirige el vapor hacia el molde sin que entre en contacto directo con el agua. Para el modelo definido para estos ensayos de laboratorio el proceso tardó 30 minutos, lo que traducido a costos considerando con la tarifa eléctrica uruguaya estimada en U\$S 0,28 y que el anafe eléctrico utilizado consume 1000 W equivale a U\$S 0,14. Este método no es efectivo para los positivos impresos por lo que es necesario definir otros métodos de extracción.

Para extraer los materiales de dentro de los moldes con positivos impresos se definieron cinco métodos diferentes según los filamentos utilizados: La disolución en agua, la disolución en D-Limoneno, el quemado en hornos, el desprendimiento en frío y el desprendimiento aumentando la temperatura. Cada método fue seleccionado según las características químicas y físicas del filamento, priorizando la salud humana y ambiental. Algunos filamentos se probarán con más de un método de extracción. Asimismo, se observará y documentará en las fichas de sistematización cualquier procedimiento complementario que surgiera durante cada proceso para garantizar la eliminación completa del polímero. Se describen a continuación cada uno de ellos. Esta tarea procuró definir los pasos a realizar aplicando la información recabada en las anteriores. Los recursos necesarios para esta definición implican el conocimiento de las instalaciones y herramientas disponibles en el Laboratorio de Vidrio en el que se realizarán los ensayos y los datos obtenidos anteriormente en este trabajo. La generación de datos fue cualitativa en términos descriptivos que se presentan a continuación aportando al cumplimiento del objetivo específico 2.

- Disolución en agua

Este será el método de extracción específico para el PVA dado que sus características químicas lo permiten. Se sumergirá el molde con el positivo dentro en agua caliente y se registrará el tiempo necesario para que el filamento se disuelva completamente. Finalmente se quitará la solución de agua y PVA de dentro del molde enjuagándolo.

- Disolución en D-Limoneno

Este método se utilizará únicamente con el HIPS dado que es el único soluble en este compuesto. En este caso, dado que el solvente será más escaso que el agua, se optimizará este recurso vertiéndolo dentro del positivo que por la forma de realizar el molde quedará con la boca de colada abierta hacia arriba. Finalmente se quitará la solución de D-Limoneno y HIPS de dentro del molde enjuagándolo. Es relevante destacar que no se logró adquirir D-Limoneno en el mercado local, aunque para la realización de este trabajo se recurrió a un intercambio con una particular que disponía de un litro de este compuesto, pero que no es proveedora estable.

- Quemado en hornos

Para los filamentos con mayor estabilidad química como el PLA, el Hyper PLA y el Flex se utilizará el método del quemado en hornos que implica colocarlos sobre una bandeja, separados de la superficie y con la abertura del molde hacia abajo en el horno para vidrio y elevar su temperatura hasta la de fusión de los filamentos. Para este proceso se plantean dos posibles curvas de temperatura. A partir de la experiencia de impresión 3D se determinó que a 260° se supera la temperatura de fusión y los filamentos fluyen lo suficiente para caer por su propio peso. Es así cómo se determinaron dos curvas de temperatura con meseta en 260°C, una de 6 horas y otra de 12 horas⁹ cómo forma de testear el grado de extracción en relación con el tiempo. Vale aclarar que este parámetro del tiempo de meseta necesario puede variar según la geometría del volumen que se quiere extraer de dentro del molde.

- Desprendimiento en frío

Este método se utilizará únicamente con Flex y consistirá en valerse de la flexibilidad del material para extraerlo manualmente del molde a temperatura ambiente. Este método presenta limitaciones en figuras cerradas, pero por tener el modelo definido enganches leves (ver apartado 3.5.5 Definición del modelado primario) se decide testearlo.

- Desprendimiento con aumento de temperatura

Este método será aplicado al PLA y al Hyper PLA, utilizando una pistola de aire caliente como fuente de calor. Consistirá en calentar el polímero hasta conseguir el suficiente reblandecimiento que permita su extracción manual del molde sin llegar a quemarse. Este método se limita a piezas con bocas de colada suficientemente anchas como para permitir el acceso visual y físico a la totalidad del interior del molde.

No se presentaron dificultades en la tarea de definición de métodos de extracción.

3.5.5. Definición del modelado primario

Esta tarea procura desarrollar un volumen inicial que oficie de positivo para los ensayos de laboratorio. Para la definición del modelo primario se tomaron en cuenta una variada serie de

⁹ La curva de 12 horas fue definida y parcialmente testada previamente en conjunto con Beatriz Amorín en el marco de un curso de grado, lo que proporcionó una base inicial para evaluar el grado de extracción en relación con el tiempo. Esta investigación busca complementar y expandir esos resultados.

aspectos que permitirán evaluar los resultados de los ensayos de laboratorio. Por un lado, se eligió partir de un prisma regular dado que su forma geométrica permitiría verificar claramente una vez realizado el casting si el volumen obtenido es o no fiel al original impreso. El cubo elegido tuvo 40 mm de lado lo que brinda una superficie considerable para observar las texturas y poder sacar conclusiones de la muestra. Cada cara del cubo se intervino con una textura en alto o bajo relieve con diferentes ritmos, formas y escalas que permitirán evaluar tanto aspectos que pueda dejar la impresión 3D con diversos materiales como la formación de hilos entre puntos de desplazamiento. Así también las texturas permiten identificar la calidad de impresión con cada uno de los filamentos, siendo más alta cuanto mejor definidas quedan las texturas mencionadas. Las intervenciones de las caras fueron las siguientes:

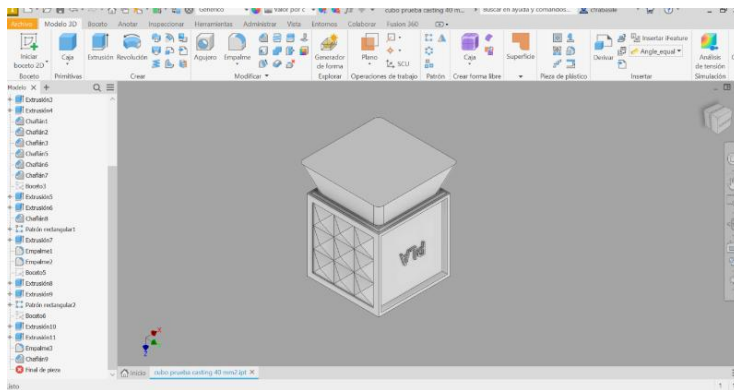
- Una cara lisa con la sigla del filamento utilizado en altorrelieve que permite identificar cual fuera el positivo de la muestra de vidrio sin necesidad de etiquetarlo y da seguridad en la identificación si existieran dos filamentos del mismo color
- Una cara dividida en nueve secciones con pirámides de 4 mm de alto en cada una de ellas que busca testear el marcado de las aristas en el modelo final en vidrio, así como agrega complejidad de retiro de los positivos por generar enganches en el molde.
- Una cara con formas curvas irregulares en bajo relieve de 1 mm que procura testear la definición de formas planas con una profundidad considerable.
- Una cara con un patrón regular de cuadrados de 0,8 mm de lado en altorrelieve de 0,4 mm de profundidad, que pretende probar la copia en diferentes materiales de texturas finas
- Una cara con círculos concéntricos de 2 mm de espesor en bajo relieve de 1 mm de profundidad que procura testear la definición de las líneas.
- Por último, la cara superior presenta una extrusión en ángulo que funcionará como boca de colada para alojar la molienda de vidrio que durante el ciclo de horneado se reblandecerá y caerá haciendo que el aire entre los granos escape y disminuyendo así su volumen total. Esta cara presenta un desnivel que, de no completarse en el colado indicará que hizo falta más cantidad de vidrio en el molde. Si bien no se trata de un

modelo para realizar un casting en molde abierto¹⁰ ya que tiene algunos enganches que no permiten desmoldar la pieza sin romper el molde, la boca de colada ancha ocupando gran superficie de la cara permitirá examinar los moldes luego de extraídos los positivos y sacar conclusiones antes de colocar el vidrio dentro de estos. Esto enfoca las evaluaciones ya que permite verificar si la eventual falta de texturas en alguna cara responde a una carencia del molde en la copia del positivo o si, por el contrario, responde a irregularidades en el colado del vidrio.

Al incluir estas texturas se procuró mantener un margen en cada una de las caras que mantenga la definición del cubo en sus aristas a modo de verificar la forma general y las dimensiones una vez que las piezas de vidrio se desmolden.

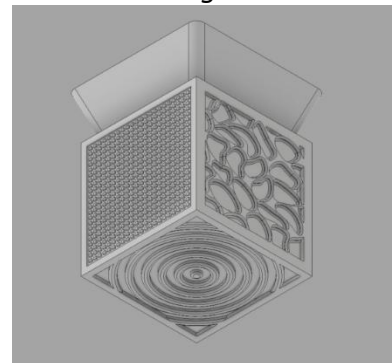
El modelado del volumen se realizó en el software de Diseño Asistido por Computadora (CAD) Inventor de Autodesk por ser el programa aprendido en este Máster Universitario, recurso necesario para el desarrollo de esta tarea. Vale aclarar que, durante el diseño y modelado de este volumen, se prestó especial atención a garantizar que pudiera imprimirse sin necesidad de estructuras de soporte minimizando los desperdicios de material y maximizando la calidad de impresión de cada positivo (Figura 14 y Figura 15).

Figura 14. *Modelo realizado en el software Inventor*



Fuente: Elaboración propia

Figura 15. *Texturas en el modelo tridimensional digital*



Fuente: Elaboración propia

¹⁰ Un molde abierto es aquel en el que al menos una de las superficies del objeto final queda en contacto directo con el medioambiente, mientras que un molde cerrado es aquel en el que el objeto queda completamente rodeado por el molde, logrando su forma a partir del contacto con todas sus superficies internas. Gluzman (2017).

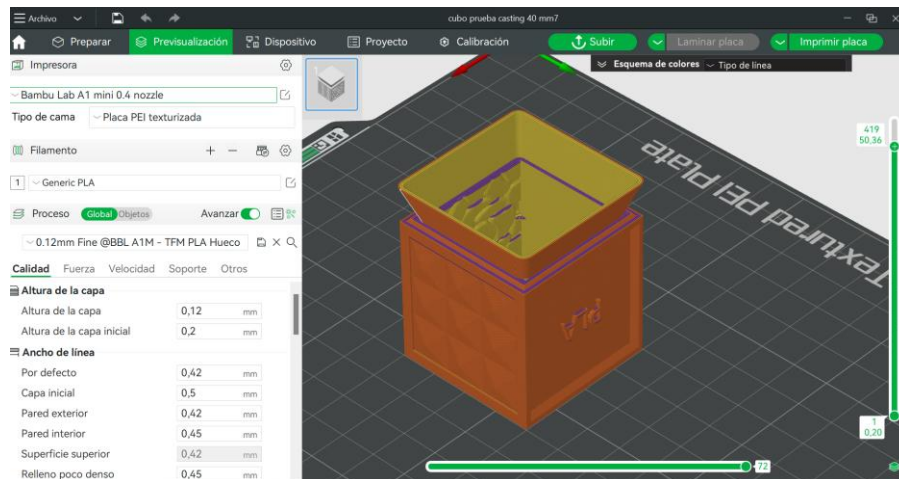
Los datos resultantes de esta tarea son el modelado factible de ser impreso en 3D con las texturas definidas que se justificaron previamente.

Esta tarea también implicó la realización de dos impresiones del modelo definido en cada uno de los filamentos que se seleccionaron. La configuración de las impresiones se realizó de modo tal que las piezas fueron impresas con tres líneas de pared, sin relleno y sin tapa superior, lo que con un ancho de línea promedio de 0,42 mm hace una pared de un total de 1,26 mm de espesor. Estas decisiones en relación con la impresión se basaron en utilizar la menor cantidad de material posible para facilitar y minimizar su extracción del molde.

La boca de colada hacia arriba con una inclinación de 45 grados permite verificar si todos los materiales utilizados adquieren la misma calidad con voladizos con ángulos límites.

Se eligió una altura de capa de 0,12 mm y una boquilla de 0,4 mm de diámetro para todas las muestras lo que garantiza la fineza de las texturas y la minimización de la visualidad de capas superpuestas en los modelos, ya que, en este caso, las texturas que se querían probar eran las diseñadas para estos ensayos (Figura 16). La impresión de cada modelo tuvo una duración estimada de una hora treinta minutos y un peso estimado entre 12 y 16 gramos según la densidad del material que se utilizara.

Figura 16. Modelo en el laminador de la impresora utilizada



Fuente: Elaboración propia

Todos los ensayos realizados mantuvieron constantes ciertos parámetros y procedimientos para garantizar la comparabilidad entre los resultados. Se explica a continuación brevemente cada uno de ellos.

3.5.5.1. De la impresión de positivos en 3D

Cómo se mencionó anteriormente todos los modelos impresos utilizaron los siguientes parámetros de impresión:

- Boquilla de impresión: 0,4 mm
- Altura de capa: 0,12 mm
- Ancho de línea promedio: 0,42 mm
- Ancho de pared: 1,26 mm
- Velocidad de impresión: 100 mm/s
- Densidad de relleno: 0%

Los recursos adicionales necesarios para esta tarea fueron los fondos económicos para la compra de las bobinas de los diversos filamentos a testear, así como el acceso a la impresora 3D mencionada en 3.3.1 Marco institucional, equipos y materiales. Las dificultades en relación a las impresiones se basaron en la utilización de filamentos con los que no se tenía experiencia y por lo tanto requirieron de pruebas previas e iteraciones para conseguir una impresión de calidad.

3.5.6. Modelo de referencia con la técnica tradicional de modelado de cera

Para obtener resultados comparables con la técnica tradicional se decidió fabricar el modelo primario con cera con tres métodos distintos.

Por un lado, se utilizó la técnica tradicional de tallado, para lo que se generó un molde de un cubo liso con una lámina de acetato, se coló la cera y luego se talló a mano cada textura en las 5 caras. Por último, con el mismo método del acetato se modeló y agregó la boca de colada. La fabricación de este modelo requirió más de 6 horas de trabajo, presenta texturas imperfectas y manchas de quemado de la cera que derivan del proceso de tallado (Figura 17).

Figura 17. *Modelo de cera tallado a mano*



Fuente: Elaboración propia

Los otros dos métodos utilizados implicaron el uso de tecnología de impresión 3D, y se decidió no agregar trabajo manual de detallado a ninguno de los dos para comparar las características de la técnica pura. Para uno de ellos se utilizó un positivo impreso en PLA, se le realizó un molde con alginato al cual luego de fraguado se le quitó el PLA y se llenó con cera. Este procedimiento se realizó cuatro veces con el mismo molde debido a que los positivos de cera presentaban marcas derivadas del enfriamiento desparejo que afectaban al modelo. En el modelo que presenta menor cantidad de marcas se observa una deformación a causa de la degradación del molde de alginato por deshidratación (Figura 18).

Figura 18. *Modelo de cera colado en molde de alginato*



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se procedió a la fabricación de un molde negativo mediante impresión 3D, utilizando filamento flexible (FLEX). Este molde fue empleado para realizar el colado de cera caliente. Sin embargo, durante el proceso de desmolde, se observó que el material del molde no proporcionó la flexibilidad necesaria, lo que resultó en el desprendimiento o deformación de algunas aristas en relación con el modelo original (Figura 19).

Figura 19. *Modelo de cera colado en molde impreso en 3D*



Fuente: Elaboración propia

Estos tres modelos en cera se utilizarán en los ensayos de laboratorio como forma de establecer los parámetros base de la técnica tradicional.

3.5.7. Construcción manual de moldes

Esta tarea procura fabricar los moldes que se utilizarán en los ensayos de laboratorio para cada uno de los positivos impresos. Los recursos necesarios son las decisiones tomadas previamente en este trabajo sobre las proporciones de las mezclas de los materiales fraguantes, el análisis y decisión de la forma de fabricación de los moldes, los positivos impresos así como los fungibles necesarios para esta tarea (yeso, cuarzo, agua) y el espacio y

herramientas del Laboratorio de Vidrio que cómo se mencionó en el apartado 3.3.1 Marco institucional, equipos y materiales estarán a disposición para esta investigación.

3.5.7.1. Método de fabricación del molde

A partir del análisis de bibliografía realizado en el apartado 2.1 Estado del arte los moldes se realizaron con mezclas fraguantes con una composición en partes iguales en masa de yeso, cuarzo y agua. Los moldes fueron elaborados a mano vertiendo y trabajando la mezcla fraguante alrededor del positivo impreso en 3D (Figura 20). Cada molde ocupó una primera capa con 200 grs de cada material para luego realizar una segunda capa de molde con 100 grs de cada material.

Figura 20. Construcción de un molde con mezclas fraguantes a mano



Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Cinco moldes con positivos de distintos filamentos en su interior



Fuente: Elaboración propia

Los datos recabados en este proceso son principalmente empíricos y de observación referidos a los procesos de elaboración de moldes con esta técnica aportando al cumplimiento del objetivo específico 2. Dado que se trabajó de manera ordenada durante todo el proceso no se presentaron dificultades en relación con el registro de los procesos o piezas (Figura 21).

3.5.8. Vaciado de moldes y colado de vidrio

Esta tarea tuvo por cometido acondicionar los moldes para recibir el vidrio y colocarlo en el horno para completar el proceso. Se basó en aplicar los métodos de extracción previamente definidos según el tipo de filamento que se hubiera utilizado para vaciar los moldes. Luego medir el volumen de molienda de vidrio y colocarla dentro de cada molde.

Al colocar la cantidad de vidrio necesario para llenar el molde, se observó que la cavidad y la boca de colada no lograban contener el volumen requerido (Figura 22), por lo que se decidió añadir un complemento de la boca de colada a modo de marco de 2 cm de altura realizado con las mismas mezclas fraguantes, que se colocaría sobre el molde para retener la molienda que sobresalía. La forma de la apertura de este marco coincidía con la de la boca de colada (Figura 23), asegurando que todo el vidrio colocado dentro pudiera descender por acción de la gravedad y entrar en el molde.

Figura 22. Molde con vidrio necesario para llenarlo sin extensión de boca de colada



Fuente: Elaboración propia

Figura 23. Molde con vidrio necesario para llenarlo con extensión de boca de colada



Fuente: Elaboración propia

Es importante determinar la relación proporcional entre el tamaño de grano y la cantidad de aire atrapado entre los fragmentos de vidrio. Esto permitirá calcular el volumen requerido de la boca de colada de cualquier modelo, independientemente de sus dimensiones o características según la granulometría de molienda que se procura utilizar.

3.5.8.1. Determinación del porcentaje de volumen del modelo que debe contener la boca de colada.

Se realiza a continuación un ensayo con este fin. Para ello se colocará molienda seca en una probeta hasta alcanzar los 40 ml de volumen. A continuación, se agregarán 40 ml de agua previamente medida en otra probeta. El volumen real del vidrio estará determinado entonces de la siguiente manera: $Volumen\ real\ de\ vidrio\ (ml) = (Volumen\ de\ agua\ (ml) + Volumen\ de\ vidrio\ seco\ (ml)) - Medida\ de\ la\ probeta\ con\ agua\ y\ vidrio\ (ml)$

Para nuestro ensayo sería:

$$Volumen\ real\ de\ vidrio\ (ml) = (80\ ml - Medida\ de\ la\ probeta\ con\ agua\ y\ vidrio)$$

Podremos determinar entonces que el porcentaje de aire atrapado entre la molienda se define como

$$\text{Aire atrapado (\%)} = \left(\frac{(\text{Volumen de vidrio seco} - \text{volumen real de vidrio})}{\text{Volumen de vidrio seco}} \right) \times 100$$

Tabla 2. Medición de volumen de vidrio para determinar las dimensiones de la boca de colada en futuros trabajos de casting

Tamaño de grano	Volumen de vidrio seco (ml)	Medida de la probeta con 40 ml de vidrio + 40 ml de agua	Volumen real de vidrio (ml)	Porcentaje de aire atrapado
Entre 4 mm y 3 mm	40 ml	58 ml	22 ml	45%
Entre 3 mm y 2 mm	40 ml	60 ml	20 ml	50 %
Entre 2 mm y 1 mm	40 ml	61 ml	19 ml	52,5%
Entre 1 mm y 0,85	40 ml	60 ml	20 ml	50%
Entre 0,85 mm y 0,5 mm	40 ml	59 ml	21 ml	47,5%
Menos de 0,5 mm	40 ml	59 ml	21 ml	47,5%

Fuente: Elaboración propia

El volumen adicional requerido para la boca de colada se define entonces como

$$\text{Volumen adicional de boca de colada} = \text{Volumen molde} \times \text{porcentaje aire atrapado}$$

Además, las mediciones indican que la molienda seca con un tamaño de grano de entre 1 mm y 2 mm es la que ocupa mayor volumen. Por lo tanto, si se diseñan moldes con bocas de colada cuya capacidad sea equivalente al volumen total del modelo multiplicado por 0,525, el molde será capaz de contener la cantidad necesaria de vidrio para llenarlo, independientemente del tamaño de grano de molienda utilizado. En caso de que los moldes tengan espacios en los que los granos por su tamaño no puedan introducirse en frío, el tamaño de la boca de colada deberá incrementarse para alojar ese vidrio.

3.5.8.2. El vidrio, su presentación, granulometría y medición

El vidrio seleccionado para realizar todos los ensayos de laboratorio fue la botella de whisky de la marca Jameson (Figura 24). La fábrica de vidrio de esta botella es desconocida, pero se ha identificado en experiencias de trabajo anteriores que el vidrio negro (de licor de la marca Baylies) de la misma fábrica de envases tiene un punto de fusión más bajo que otros vidrios de botella por lo que se eligió esta por ser una botella relativamente popular de la misma fabrica. Su símbolo es una letra e con un punto dentro de un círculo (Figura 25). Se trata de una botella de vidrio verde con capacidad de 1L de contenido.

Figura 24. Botella de vidrio seleccionada



Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Marca de la fábrica en la base de la botella



Fuente: Elaboración propia

Figura 26. Botella fracturada por choque térmico



Fuente: Elaboración propia

Para realizar los ensayos de laboratorio se molieron seis de estas botellas por choque térmico en el horno. Esto se logra colocando las botellas en el horno que se controla para subir hasta 300° C y luego se toma la botella caliente y se la sumerge en un recipiente con agua. Esto genera una fractura por diferencias de dilatación y contracción entre la superficie del material y su interior (Figura 26). Luego se continuó con el molido manual, proceso que por la previa fractura por choque térmico se ve facilitado. Se tamizó la molienda y se continuó el molido hasta conseguir que toda la molienda fuera menor a 5 mm de tamaño de grano.

Se seleccionó para realizar los ensayos la molienda más grande que tiene un tamaño de grano de entre 4 mm y 5 mm; es decir, que pasa por la malla del tamiz con apertura de 5 mm, pero queda retenida en la malla de 4 mm de apertura.

El volumen del cubo a llenar con vidrio fue calculado por el software utilizado para modelarlo, obteniéndose un total de 59,704 ml. A efectos de la medición del vidrio, se redondeó dicho volumen a 60 ml. El volumen de vidrio necesario para cada cubo se midió mediante el desplazamiento de agua utilizando una probeta de laboratorio (Figura 27). Este tipo de medición se justifica en que el volumen de la molienda seca no es representativo del volumen real de vidrio dado que la irregularidad de los granos genera espacios de aire entre ellos.

La tarea termina con el cargado del horno con los moldes de los ensayos y la programación de la curva de temperatura.

Para el ciclo de horneado como se mencionó en el apartado 3.3.4. Ensayos de laboratorio de casting a partir de positivos impresos en 3D se utilizó una curva de temperatura ya utilizada en los hornos del Laboratorio de Vidrio. Se realizó una única horneada con todos los ensayos de laboratorio realizados. Se colocaron los moldes en dos pisos en el horno de abertura frontal con separación entre ellos para permitir la circulación del aire caliente (Figura 28).

Los recursos necesarios fueron los mismos que en la tarea anterior, donde se destaca la relevancia de los hornos. Así también se requirieron los moldes fabricados en la tarea anterior. Los datos cualitativos recabados se refieren a los procesos de extracción de positivos de dentro de los moldes y los cuantitativos que de esta tarea se desprenden refieren a los porcentajes de aire atrapado en las diferentes granulometrías de molienda, ambos aportando al cumplimiento del objetivo específico 2. La dificultad enfrentada en el vaciado de los moldes fue la necesidad de rehacer el de PVA iterando el positivo impreso a partir de la experiencia de vaciado y la observación

Figura 27. *Medición de volumen de molienda por desplazamiento de agua*



Fuente: Elaboración propia

Figura 28. *Horno de abertura frontal cargado con los ensayos de laboratorio de este TFM*



Fuente: Elaboración propia

de su deformación. En el llenado de los moldes, la imposibilidad de colocar toda la molienda necesaria dentro de la cavidad destinada para este fin.

3.5.9. Desmolde y limpieza de piezas

Una vez colado el vidrio (Figura 29), se procedió al desmolde y limpieza de piezas. Esta tarea consistió en romper y descartar el material fraguado que luego de la horneada queda frágil (Figura 30), y limpiar las piezas con agua y un cepillo plástico para eliminar los restos que puedan haber quedado adheridos a la superficie. Los recursos necesarios se reiteran de la anterior tarea. Los datos se componen de los resultados materiales de las piezas que se analizarán en futuras tareas aportando al cumplimiento del objetivo específico 2. Dado que el proceso se realizó de forma cuidadosa y ordenada no se presentaron dificultades en relación con el orden de las muestras que aseguró la correcta etiquetación de cada una evitando la pérdida de información (Figura 31).

Figura 29. *Moldes con vidrio luego de horneada*



Fuente: Elaboración propia

Figura 30. *Proceso de apertura de molde*



Fuente: Elaboración propia

Figura 31. *Piezas de vidrio etiquetadas previo a su limpieza*



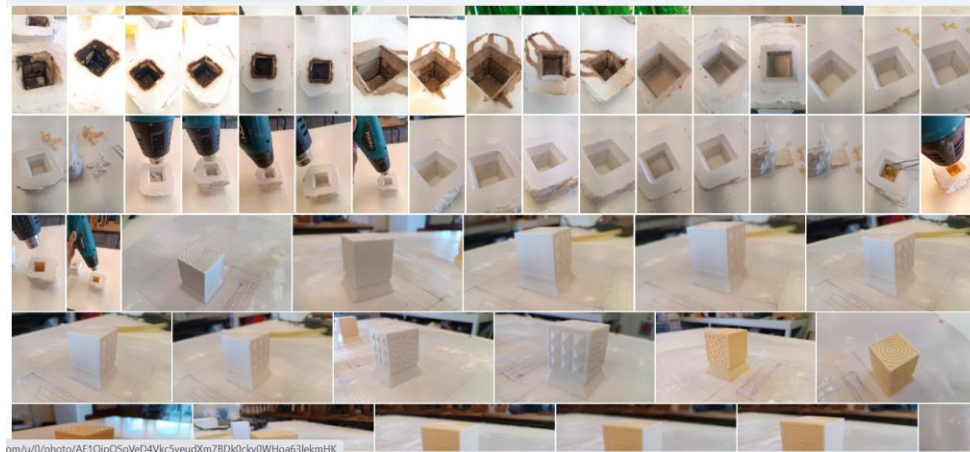
Fuente: Elaboración propia

3.5.10. Documentación visual

Esta tarea consistió en registrar fotográficamente todo el proceso y resultados obtenidos de las tareas anteriores. El recurso necesario para su desarrollo fue un dispositivo electrónico con cámara fotográfica, espacio en la nube para tener el registro respaldado y una computadora para ordenar el registro de fotografías y notas realizadas (Figura 32 y Figura 33, ver a mayor tamaño en Anexo C). Los datos extraídos son de carácter cualitativo en forma de imágenes aportando al cumplimiento del objetivo específico 2. Dado que se realizó el proceso de forma

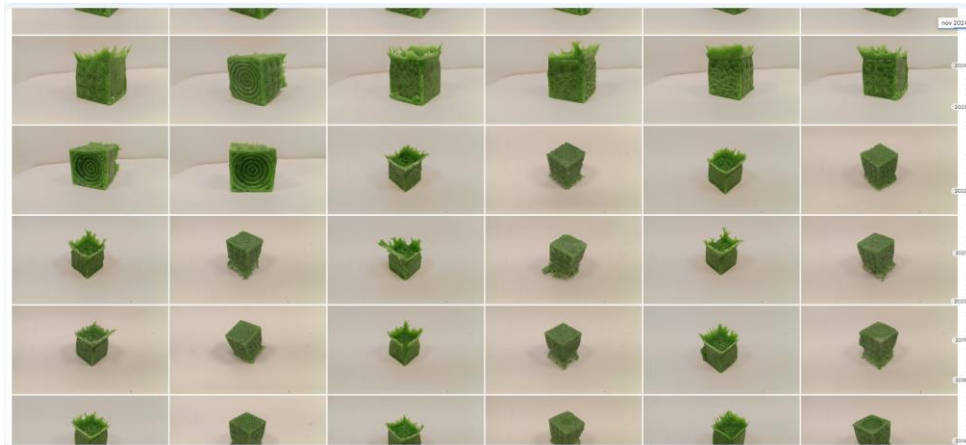
ordenada no se enfrentaron desafíos en relación con la identificación de las imágenes y la extracción de información.

Figura 32. *Conjunto de fotografías del proceso de los ensayos de laboratorio*



Fuente: Elaboración propia

Figura 33. *Conjunto de fotografías detalladas de los resultados de los ensayos de laboratorio*




Fuente: Elaboración propia


3.5.11. Creación de fichas de sistematización


La tarea de creación y llenado de fichas de sistematización procura reunir toda la información recabada en tareas anteriores en relación con los ensayos de laboratorio y disponerlos de una forma gráfica y comparable entre sí. Cómo antecedentes de esta tarea se destaca la elaboración de fichas en trabajos anteriores que han demostrado ser de utilidad para sintetizar y ordenar la información (Frabasile, 2021; Amorín, Frabasile, Novick y Räber, 2021). Los recursos necesarios incluyen además de las producciones de datos anteriores, la disponibilidad de una computadora con software de edición de imágenes y texto.


Se presenta a continuación el modelo de ficha de sistematización sin información (Figura 34) que será completada para cada uno de los ensayos de laboratorio realizados.

Figura 34. Ficha de sistematización de ensayos de laboratorio sin datos


LA UNIVERSIDAD
EN INTERNET


UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY


comisión sectorial
de enseñanza


Facultad de Arquitectura,
Diseño y Urbanismo
UDEAR


Escuela Universitaria
Centro de Diseño

De la impresión

Material del modelo: _____

Temperatura de la boquilla: _____ °C

Temperatura de la cama: _____ °C

Peso del modelo + soportes necesarios: _____ grs

Costo del material para el modelo: U\$S _____

Observaciones del modelo impreso: _____

De la extracción del positivo

Método: _____

Procedimientos complementarios de extracción: _____

Observaciones del molde vacío: _____

Fichas de sistematización de ensayos de laboratorio

Ensayo # _____ Fecha: ____/____/____

Fotografías del molde y la pieza de vidrio

Calidad de detalle (fidelidad):
○
○

Baja Media Alta

Conclusiones: _____

Fuente: Elaboración propia

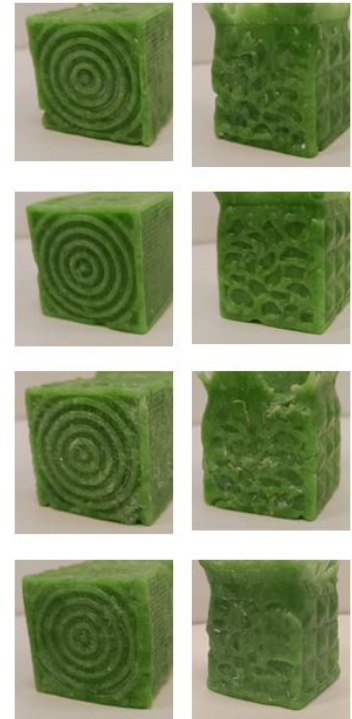
La ficha es el resultado de esta actividad y es de carácter cualitativo. Permitirá la evaluación del proceso y resultados de los ensayos de laboratorio aportando al cumplimiento del objetivo específico 3. La dificultad enfrentada a la hora de realizar esta tarea fue la selección de información a registrar en las fichas para que sean de utilidad, pero no sature de datos innecesarios.

3.5.12. Elaboración de tablas para análisis de patrones

La tarea de elaboración de tablas de análisis de patrones implicó la identificación de tendencias en los datos relevados en etapas anteriores y la comparación de todos los parámetros de los ensayos de laboratorio que siguen dichas tendencias. Se seleccionaron las muestras a comparar en cada tabla según los métodos de extracción (Figura 35), eligiendo los parámetros de costo del filamento, la calidad del detalle, el costo del método de extracción según si se utiliza diluyente o energía, y las dos caras del cubo que presentaron mayor dificultad de copia.

Requirió el uso de software que permita la generación de tablas y la organización de datos desplegados. Los datos que arrojó esta tarea son tanto cualitativos como cuantitativos y se basan en la selección y organización de la información para su valoración aportando al cumplimiento del objetivo específico 3.

Figura 35. Comparación de caras con mayor dificultad de copia para uno de los métodos de extracción



Fuente: Elaboración propia

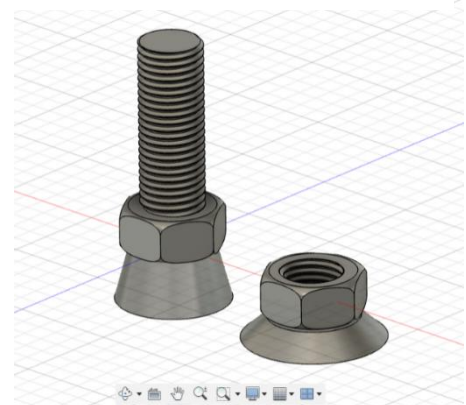
3.5.13. Modelado de piezas representativas

El modelado de piezas representativas de la técnica que aquí se investiga implica la ideación de volúmenes que impliquen desafíos para las técnicas convencionales de fundición como por ejemplo la inclusión de detalles finos, cavidades, mecanismos encastrados integrados por impresión y formas orgánicas o geométricas. Tras la evaluación inicial realizada con un modelo primario más básico, se decidió avanzar hacia una aplicación práctica que represente un escenario más exigente para la técnica investigada. Para esta tarea se emplearon tres programas de modelado 3D diferentes, seleccionados en función de las herramientas específicas necesarias para cada diseño: Autodesk Inventor, Autodesk Fusion 360 y Rhinoceros.

3.5.13.1. Modelo representativo 1

Se optó por modelar una pieza con encastre mecánico compuesta por un tornillo y una tuerca, cuya elección responde a la necesidad de evaluar aspectos clave como la precisión dimensional, la capacidad de reproducción de detalles finos, y el ajuste entre componentes (Figura 36). Si bien se trata de un modelo de baja complejidad, este conjunto de piezas representa retos adicionales para la técnica que no se incluían en el modelo primario estableciendo una demanda mayor. El modelado digital incluyó la determinación de tolerancias entre las piezas de modo que los positivos impresos en 3D pudieran encastrarse entre sí previos a la realización del molde y posterior colado de vidrio. La tolerancia elegida entre estas piezas en relación con las características de la impresora utilizada fue de 0,3mm. Las medidas generales del tornillo y tuerca son con rosca M30X3,5 para asegurar que el vidrio pudiera colar por las cavidades que componen los hilos de la rosca.

Figura 36. *Tornillo y tuerca modeladas en Autodesk Fusion 360*



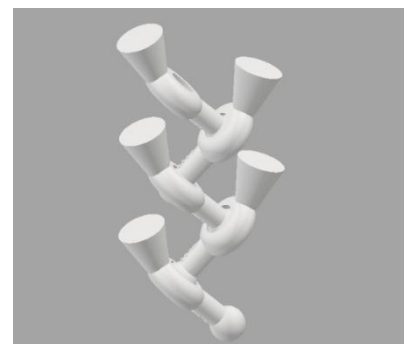
Fuente: Elaboración propia

Se eligió a partir de las conclusiones que se desprenden de los resultados anteriores materializar estos modelos en PLA y utilizar el método de quemado en hornos para retirar los positivos de dentro de los moldes. El método para fabricar los moldes de yeso utilizando el positivo impreso fue el mismo que para los ensayos de laboratorio, así como la curva de temperatura para el quemado de 12 horas.

3.5.13.2. Modelo representativo 2

El diseño de este modelo testea diferentes valores de un parámetro nuevo que no se tomó en cuenta en los modelos anteriores: las tolerancias. El modelo se basa en eslabones con uniones tipo rótula cuyas tolerancias varían entre 0,5 mm, 0,8 mm, 1,0 mm y 1,2 mm. Cada eslabón cuenta con una boca de colada independiente (Figura 37). Este enfoque permite evaluar la funcionalidad de las uniones, y la viabilidad de incorporar

Figura 37. *Cadena de eslabones con uniones tipo rótula modelada en Autodesk Inventor*



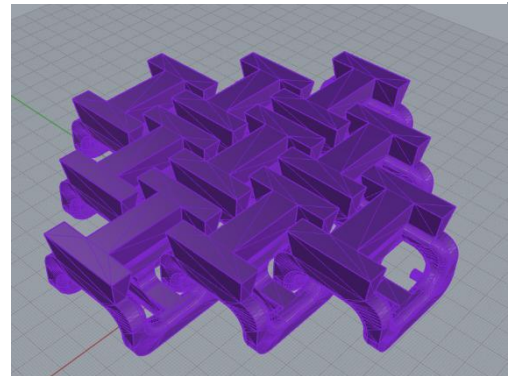
Fuente: Elaboración propia

piezas móviles mediante mecanismos encastrados integrados por impresión. La pieza con la mayor tolerancia presentó un inconveniente, ya que la rótula no permanecía dentro de la cavidad diseñada para contenerla, perdiendo su capacidad de encastre.

3.5.13.3. Modelo representativo 3

El tercer modelo se basa en una reinterpretación de una cota de malla diseñada por Agustín Arroyo (Flowalistik)¹¹, adaptada para este estudio. Cada sección se redimensionó a un diámetro de 8 mm, y los ángulos rectos originales fueron modificados por secciones circulares. Este cambio procura optimizar el flujo del vidrio dentro del molde, teniendo en cuenta que se comporta como un líquido de alta viscosidad (Figura 38).

Figura 38. Reinterpretación de cota de malla modelada en Rhinoceros

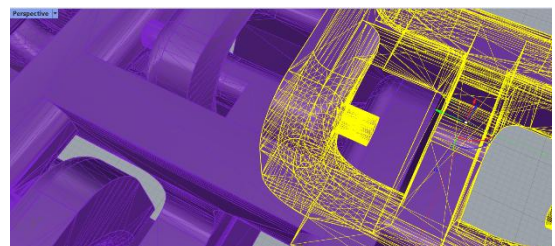


Fuente: Elaboración propia

Además, se incorporaron bocas de colada individuales para cada eslabón, siguiendo los resultados del análisis descrito en la sección 3.5.8.1 Determinación del porcentaje de volumen del modelo que debe contener la boca de colada. Se calculó como el volumen de un eslabón multiplicado por 0,52, asegurando el llenado adecuado del molde independientemente de la granulometría de vidrio utilizada.

Por último, se añadieron separadores de 4 mm de diámetro que conectan los eslabones entre sí y mantienen los eslabones separados durante la fabricación del molde de yeso, evitando desplazamientos y garantizando que el yeso encapsule cada eslabón de manera independiente (Figura 39). Al imprimirse, el

Figura 39. Separador cilíndrico de 4 mm en eslabones



Fuente: Elaboración propia

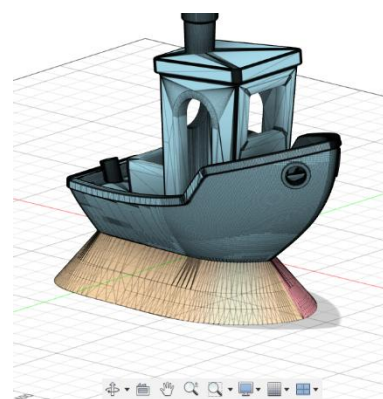
¹¹ "Flowalistik", seudónimo de Agustín Arroyo, es un diseñador argentino especializado en impresión 3D y fabricación digital. Comparte sus proyectos e innovaciones en su canal de YouTube, destacando la impresión 3D, el corte láser y los proyectos DIY.

conjunto será rígido, pero una vez colado el vidrio, los eslabones podrán moverse de forma independiente, otorgando dinamismo y flexibilidad al modelo final.

3.5.13.4. Modelo representativo 4

Por último, como cuarto modelo representativo se eligió un modelo característico del mundo de la impresión 3D, el “Benchy”. Este barco es un modelo icónico en la impresión 3D creado por Creative Tools¹² y Prusa Research¹³, diseñado para evaluar y mostrar las capacidades técnicas de las impresoras. Desde su creación en 2015, se ha consolidado como una referencia universal en el mundo de la impresión 3D y es un ícono de la tecnología de Fabricación por Filamento Fundido.

Figura 40. Benchy con agregado de boca de colada en Fusion 360



Fuente: Elaboración propia

Se utilizó entonces este modelo con su escala original agregándole una boca de colada en su base (Figura 40). Vale aclarar que el modelo con la escala original presenta algunas paredes de espesor menor a 6 mm que pueden evitar que el vidrio cuele de la forma adecuada e impida llenar el molde por completo.

Los datos que se desprenden de esta tarea son cualitativos y se componen de cuatro modelos que utilizan la técnica que aquí se investiga aportando al cumplimiento del objetivo específico 3. No se encontraron dificultades.

3.5.14. Fabricación de moldes y casting

En esta tarea se repiten los alcances, recursos, y dificultades de las secciones 3.5.7 Construcción manual de moldes, 3.5.8 Vaciado de moldes y colado de vidrio, 3.5.9 Desmolde y limpieza de piezas, ya que se aplicaron los mismos procedimientos pero para volúmenes diferentes aportando al cumplimiento de los objetivos específicos 2 y 3.

¹² Empresa que ofrece herramientas y software para diseño gráfico, edición de fotos y videos, y animación

¹³ Empresa checa fundada por Josef Prusa, conocida por sus impresoras 3D de alta calidad y sus innovaciones en el campo de la impresión 3D.

Luego de realizados todos los modelos, se imprimieron en PLA a partir de las conclusiones extraídas de los ensayos anteriores. Los positivos fueron empleados para fabricar moldes de yeso del mismo modo que los ensayos realizados con el modelo primario. Una vez contruidos los moldes, se procedió a retirar el positivo con el método de quemado en hornos y llenar los moldes con vidrio de envases. En este caso, una dificultad adicional fue el llenado de los moldes con molienda para lo que se utilizó en algunos ensayos molienda de granulometría más fina. Para realizar esta tarea se llevaron a cabo dos horneadas. En la segunda, se repitieron algunos ensayos con el modelo de la tuerca dado que los resultados no habían sido satisfactorios en la primera.

4. Resultados

El siguiente capítulo presenta los principales resultados de esta investigación ordenados de forma lógica que permita comprender los resultados obtenidos de cada tarea realizada.

4.1.1. Análisis de características y propiedades de filamentos que se encuentran en el mercado local

La siguiente tabla surge del cruzamiento de datos proveniente del relevamiento de artículos académicos centrados en la impresión 3D y del relevamiento de proveedoras locales que venden este tipo de materiales. Para el relevamiento de precios se seleccionó la opción más económica del mercado en cada caso.

Tabla 3. *Comparativa de propiedades de filamentos*

	PLA	Hyper PLA	ABS	Flex (TPU)	PETG	HIPS	PVA	Nylon
Temperatura impresión	190- 210°C	190°C- 220°C	210°C- 250°C	210°C- 230°C	220°C- 250°C	235°C- 245°C	185°C- 220°C	255°C- 270°C
Temperatura de la cama	0- 60°C	50°C - 60°C	90°C- 110°C	70°C -90°C	70°C - 90°C	85°C	45 °C - 60 °C	90°C- 110°C
Compatible con impresoras sin cerramiento	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	No
Resistencia térmica (temperatura hasta la que resisten las piezas impresas)	60°	60°	100°	150°	85°	85°	60°	190°
Soluble completamente en	-	-	Acantona	-	-	D- Limoneno	Agua	-
Impacto ambiental	Bajo	Bajo	Alto	Moderado	Modera do	Alto	Bajo	Alto
Emisión de gases tóxicos	No	No	Si (Altas)	Si (Bajas)	Si (Bajas)	Si (Bajas)	Si (Bajas)	Si (Altas)
Precio en U\$S por Kg	19	39	26	38	25	19	90	29

Fuente: Elaboración propia

4.1.1.1. Elección de filamentos a testear en los ensayos de laboratorio

A partir de la comparativa de propiedades expresada en la tabla anterior se seleccionaron cinco tipos de filamento para realizar los ensayos de laboratorio. Se descartaron el ABS y el Nylon por requerir impresoras con cerramiento y además por la alta emisión de gases tóxicos que generan al imprimirse, aspecto que como se mencionó anteriormente, sería decisivo en la evaluación.

Además, se descartaron los ensayos con PETG por ser el filamento con la más alta estabilidad térmica de los que se pueden utilizar en impresoras abiertas, exceptuando el HIPS, pero a diferencia de este último, el PETG presenta además una resistencia química muy alta, haciéndolo poco reactivo y por lo tanto más complejo de quitar de dentro del molde que los demás filamentos analizados.

Es así como para los ensayos de laboratorio se seleccionaron el PLA, el Hyper PLA, el TPU, el PVA y el HIPS. Para cada uno se plantean a continuación uno o varios procedimientos para quitarlos de dentro del molde, dependiendo de sus propiedades térmicas y químicas.

4.1.2. Fichas de sistematización

Se presentan las fichas de sistematización correspondientes a los tres ensayos de referencia con cera y once ensayos de laboratorio con filamentos. Cada ficha contiene información detallada sobre los procedimientos, materiales utilizados, datos obtenidos y observaciones relevantes.

De la impresión

Material del modelo: 50% Cera de abeja, 50% parafina
Temperatura de la boquilla: _____ °C
Temperatura de la cama: _____ °C
Peso del modelo + soportes necesarios: 80 grs
Costo del material para el modelo: U\$S 1,4
Observaciones del modelo impreso: El modelo
tallado a mano presenta áreas de cera quemadas y una
presición muy baja de detalles.

De la extracción del positivo

Método: Vaporización indirecta (30 minutos)
Procedimientos complementarios de extracción:

Observaciones del molde vacío: _____
El molde presenta manchas en las áreas en las que había
cera quemada.

Fichas de sistematización de ensayos de laboratorio

Ensayo # 1

Fecha: 11 / 24



Fotografías del molde y la pieza de vidrio

Calidad de detalle
(fidelidad):

☐ Baja ☒ Media ☐ Alta

De los resultados

Conclusiones: La pieza de vidrio es fiel al modelo en cera.
Sin embargo, en la pieza de cera no fue posible reproducir
las texturas tal cual el modelo original debido al metodo de
tallado a mano que se utilizó.

De la impresión

Material del modelo: 50% Cera de abeja, 50% parafina
Temperatura de la boquilla: _____ °C
Temperatura de la cama: _____ °C
Peso del modelo + soportes necesarios: (cera) 80 grs
Costo del material para el modelo: U\$S 3,4 (alginato + cera)
Observaciones del modelo impreso: El modelo
colado en molde de alginato presenta burbujas de aire
pequeñas en superficie y deformación general del volumen

De la extracción del positivo

Método: Vaporización indirecta (30 minutos)
Procedimientos complementarios de extracción:

Observaciones del molde vacío: _____
El molde presenta algunas manchas de la cera pero está
completamente desecado. Las texturas parecen ser fieles al
original y no presenta desprendimiento de yeso.

Fichas de sistematización de ensayos de laboratorio

Ensayo # 2

Fecha: 11 / 24



Fotografías del molde y la pieza de vidrio

Calidad de detalle
(fidelidad):

☐ Baja ☐ Media ☒ Alta

De los resultados

Conclusiones: La pieza de vidrio es fiel al modelo en cera.
Sin embargo, la pieza de cera presentaba deformaciones
debido a la degradación del alginato que le ofició de molde.

De la impresión

Material del modelo: 50% Cera de abeja, 50% parafina
Temperatura de la boquilla: - °C
Temperatura de la cama: - °C
Peso del modelo + soportes necesarios: (cera) 80 grs
Costo del material para el modelo: U\$S (TPU + Cera) 2,7
Observaciones del modelo impreso: El modelo
colado en molde impreso en filamento flex se desgarró al
desmoldarlo perdiendo una de las aristas.

De la extracción del positivo

Método: Vaporización indirecta (30 minutos)
Procedimientos complementarios de extracción:
-
-
Observaciones del molde vacío: -
El molde se presenta con todas las texturas en todas las
caras intactas.
-

Fichas de sistematización de ensayos de laboratorio

Ensayo # 3

Fecha: 11 / 24



Fotografías del molde y la pieza de vidrio

Calidad de detalle
(fidelidad): ☐ Baja ☐ Media ☒ Alta

De los resultados

Conclusiones: La pieza de vidrio es fiel al modelo en cera.
Sin embargo, la pieza de cera presentaba un desgarró por lo
que no representa el modelo digital original. Para producir
esta pieza con este método sería conveniente que el molde
impreso estuviera compuesto por más partes para permitir
un desmolde menos exigido.

De la impresión

Material del modelo: PVA (alcohol de polivinilo)
Temperatura de la boquilla: 190 °C
Temperatura de la cama: 45 °C
Peso del modelo + soportes necesarios: 14,42 grs
Costo del material para el modelo: U\$S 1,3
Observaciones del modelo impreso: El modelo
impreso es flexible, la impresión presenta formación de
hilos en su interior y en la cara con bajorrelieves con curvas.

De la extracción del positivo

Método: Disolución en agua
Procedimientos complementarios de extracción:
1 hora después se cambia el agua y se utiliza un pincel para
remover el polímero. Se realizan 4 enjuagues.
Observaciones del molde vacío: El material se deformó
bajo la humedad y el peso del yeso, empujando las paredes
del cubo hacia adentro. La cavidad no muestra rastros del
positivo.

Fichas de sistematización de ensayos de laboratorio

Ensayo # 4

Fecha: 11 / 24



Fotografías del molde y la pieza de vidrio

Calidad de detalle
(fidelidad): ☒ Baja ☐ Media ☐ Alta

De los resultados

Conclusiones: La textura de la cara con curvas en
bajorrelieve está completamente perdida. El volumen
general está levemente deformado. El molde presentaba
burujas de aire que afectan la cavidad para el vidrio (error
de procedimiento). Se probará precisar la fabricación del
molde.

De la impresión

Material del modelo: PVA (alcohol de polivinilo)
Temperatura de la boquilla: 190 °C
Temperatura de la cama: 45 °C
Peso del modelo + soportes necesarios: 14,42 grs
Costo del material para el modelo: U\$S 1,3
Observaciones del modelo impreso: El modelo impreso es flexible, la impresión presenta formación de hilos en su interior y en la cara con bajorrelieves con curvas.

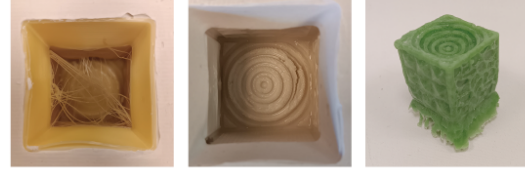
De la extracción del positivo

Método: Disolución en agua
Procedimientos complementarios de extracción:
16 horas después se ejuaga el molde 8 veces con agua limpia y queda limpio.
Observaciones del molde vacío: _____
El material se deformó bajo la humedad y el peso del yeso al fabricar el molde, empujando las paredes del cubo hacia adentro.

Fichas de sistematización de ensayos de laboratorio

Ensayo # 5

Fecha: 11 / 24



Fotografías del molde y la pieza de vidrio

Calidad de detalle (fidelidad): ☐ Baja ☒ Media ☐ Alta

De los resultados
Conclusiones: Las texturas se conservan y pero la deformación del cubo modifica el volumen general. El molde presenta menor cantidad de burbujas de aire que la muestra anterior pero aún así afectan la cavidad destinada al vidrio. Se probará imprimir con relleno para reforzar las paredes y refinar la fabricación del molde.

De la impresión

Material del modelo: PVA (alcohol de polivinilo)
Temperatura de la boquilla: 190 °C
Temperatura de la cama: 45 °C
Peso del modelo + soportes necesarios: 29,70 grs
Costo del material para el modelo: U\$S 2,6
Observaciones del modelo impreso: El modelo impreso es flexible, la impresión presenta formación de hilos en su interior y en la cara con bajorrelieves con curvas.

De la extracción del positivo

Método: Disolución en agua
Procedimientos complementarios de extracción:

Observaciones del molde vacío: _____
El molde se presenta con todas las texturas en todas las caras intactas.

Fichas de sistematización de ensayos de laboratorio

Ensayo # 6

Fecha: 11 / 24



Fotografías del molde y la pieza de vidrio

Calidad de detalle (fidelidad): ☐ Baja ☐ Media ☒ Alta

De los resultados
Conclusiones: Las texturas se conservan y el volumen es fiel al original. Si bien el costo de la técnica con este filamento es alto debido al precio del filamento y la cantidad de material utilizado, los resultados son favorables

De la impresión

Material del modelo: HIPS (Poliestireno de alto impacto)

Temperatura de la boquilla: 245 °C

Temperatura de la cama: 80 °C

Peso del modelo + soportes necesarios: 12,84 grs

Costo del material para el modelo: U\$S 0,2

Observaciones del modelo impreso: _____

Presenta formación de hilos en el interior pero el exterior es fiel al modelo original.

Método: Disolución en D-Limoneno

Procedimientos complementarios de extracción: _____

A las 18 horas se cambia el D-Limoneno por solución limpia.

Se limpia con un pincel. Se deja 36 horas en total.

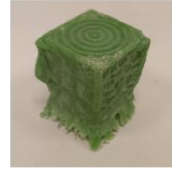
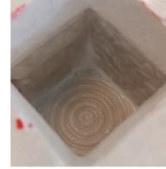
Observaciones del molde vacío: La solución es densa y no permite limpiarlo completamente. Quedan residuos que se asume podrán afectar los resultados. El molde presentaba burbujas de aire (error de procedimiento).

De la extracción del positivo

Fichas de sistematización de ensayos de laboratorio

Ensayo # 7

Fecha: 11 / 24



Fotografías del molde y la pieza de vidrio

Calidad de detalle
(fidelidad):



De los resultados

Conclusiones: Las texturas mayoritariamente se conservan
La base presenta manchas de ceniza, probablemente del
polímero que no salió del molde. El procedimiento es el más
largo de todos los ensayos. Además, el solvente no pudo
encontrarse en el mercado local lo que lo descarta como
posibilidad de aplicación

De la impresión

Material del modelo: Flex-TPU (Poliuretano termoplástico)

Temperatura de la boquilla: 215 °C

Temperatura de la cama: 50 °C

Peso del modelo + soportes necesarios: 15,86 grs

Costo del material para el modelo: U\$S 0,6

Observaciones del modelo impreso: _____

Presenta formación de hilos en el interior. El voladizo de la boca de colada presenta deformaciones en las esquinas.

Método: Desprendimiento en frío

Procedimientos complementarios de extracción: _____

Los enganches no permiten quitar el positivo. Se procede al desprendimiento con aumento de temperatura.

Observaciones del molde vacío: _____

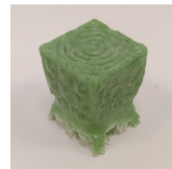
El proceso de desprendimiento separa partes del bajorrelieve del modelo del resto del molde, resultando en la pérdida de texturas.

De la extracción del positivo

Fichas de sistematización de ensayos de laboratorio

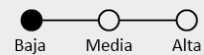
Ensayo # 8

Fecha: 11 / 24



Fotografías del molde y la pieza de vidrio

Calidad de detalle
(fidelidad):



De los resultados

Conclusiones: Con este proceso las texturas más pequeñas
son las que mejor se conservan mientras que las de mayor
tamaño y profundidad pierden definición. El resultado
muestra un volumen general acorde al modelo original pero
sin texturas. El procedimiento sería efectivo para moldes
abiertos con la ventaja que el positivo sería reutilizable.

De la impresión

Material del modelo: Hyper PLA (Ácido Poliláctico mejorado)

Temperatura de la boquilla: 220 °C

Temperatura de la cama: 35 °C

Peso del modelo + soportes necesarios: 14,98 grs

Costo del material para el modelo: U\$S 0,6

Observaciones del modelo impreso: _____

Presenta formación de hilos en el interior pero el exterior es fiel al modelo original.

Método: Desprendimiento en caliente

Procedimientos complementarios de extracción: _____

Se utilizó una pinza para poder quitar el positivo de dentro del molde debido a la temperatura

Observaciones del molde vacío: _____

El proceso de desprendimiento separa partes del bajorelieve del modelo del resto del molde, resultando en la pérdida de texturas.

De la extracción del positivo

Fichas de sistematización de ensayos de laboratorio

Ensayo # 9

Fecha: 11 / 24



Fotografías del molde y la pieza de vidrio

Calidad de detalle
(fidelidad):



De los resultados

Conclusiones: El resultado de este proceso es mejor que el de TPU. El hyper PLA arrastra menos texturas del molde al quitarlo. Los bajorelieves de mayor profundidad son los que se ven más afectados. El procedimiento sería efectivo para piezas en las que tengamos acceso al interior y no requieran copia de bajorelieves.

De la impresión

Material del modelo: PLA (Ácido Poliláctico)

Temperatura de la boquilla: 220 °C

Temperatura de la cama: 35 °C

Peso del modelo + soportes necesarios: 14,98 grs

Costo del material para el modelo: U\$S 0,3

Observaciones del modelo impreso: _____

El modelo impreso es fiel al digital

Método: Desprendimiento en caliente

Procedimientos complementarios de extracción: _____

Se utilizó una pinza igual que el caso anterior. Resulta más rápido de sencillo de quitar que el Hyper PLA.

Observaciones del molde vacío: _____

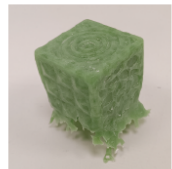
El proceso de desprendimiento separa partes del bajorelieve del modelo del resto del molde, resultando en la pérdida de texturas.

De la extracción del positivo

Fichas de sistematización de ensayos de laboratorio

Ensayo # 10

Fecha: 11 / 24



Fotografías del molde y la pieza de vidrio

Calidad de detalle
(fidelidad):



De los resultados

Conclusiones: El resultado se asimila al del Hyper PLA aunque es más sensible a la temperatura y por lo tanto más fácil de extraer. Los bajorelieves de mayor profundidad son los que se ven más afectados. El procedimiento sería efectivo para piezas en las que tengamos acceso al interior y no requieran copia de bajorelieves

De la impresión

Material del modelo: Hyper PLA (Ácido Poliláctico mejorado)

Temperatura de la boquilla: 220 °C

Temperatura de la cama: 35 °C

Peso del modelo + soportes necesarios: 14,98 grs

Costo del material para el modelo: U\$S 0,6

Observaciones del modelo impreso: _____

Presenta formación de hilos en el interior pero el exterior es fiel al modelo original.

Método: Quemado en hornos (12 horas de meseta)

Procedimientos complementarios de extracción: _____

Observaciones del molde vacío: _____

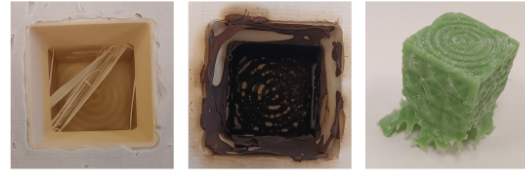
El molde presenta residuos quemados adheridos a las paredes del molde que pueden afectar los resultados de la pieza final

De la extracción del positivo

Fichas de sistematización de ensayos de laboratorio

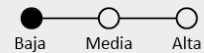
Ensayo # 11

Fecha: 11 / 24



Fotografías del molde y la pieza de vidrio

Calidad de detalle
(fidelidad):



De los resultados

Conclusiones: El resultado presenta residuos blancos en la superficie que alteran la geometría y las texturas de las caras del cubo. Las aristas se ven cortadas por los residuos del positivo en el molde. Este filamento no presenta resultados aceptables para el método de extracción por quemado en hornos.

De la impresión

Material del modelo: PLA (Ácido Poliláctico)

Temperatura de la boquilla: 220 °C

Temperatura de la cama: 35 °C

Peso del modelo + soportes necesarios: 14,98 grs

Costo del material para el modelo: U\$S 0,3

Observaciones del modelo impreso: _____

El modelo impreso es fiel al digital

Método: Quemado en horno (6 horas)

Procedimientos complementarios de extracción: _____

Observaciones del molde vacío: _____

El molde presentaba burbujas de aire que afectan la cavidad para el vidrio (error de procedimiento). El vaciado fue completo.

De la extracción del positivo

Fichas de sistematización de ensayos de laboratorio

Ensayo # 12

Fecha: 11 / 24



Fotografías del molde y la pieza de vidrio

Calidad de detalle
(fidelidad):



De los resultados

Conclusiones: Las aristas no están completas. Se supone que quedaba material del positivo que no se identificó en el molde vacío. La copia de las texturas es buena si se obvian las burbujas generadas por errores de procedimiento. Será necesario incrementar las horas de quemado para asegurarse de vaciar el molde completamente

De la impresión

Material del modelo: PLA (Ácido Poliláctico)
Temperatura de la boquilla: 220 °C
Temperatura de la cama: 35 °C
Peso del modelo + soportes necesarios: 14,98 grs
Costo del material para el modelo: U\$S 0,3
Observaciones del modelo impreso: _____
El modelo impreso es fiel al digital

De la extracción del positivo

Método: Quemado en hornos (12 horas)
Procedimientos complementarios de extracción: _____
Observaciones del molde vacío: _____
El molde presenta menor cantidad de burbujas de aire que
el ensayo anterior pero aún afectan la cavidad para el vidrio
(error de procedimiento). El vaciado fue completo.

Fichas de sistematización de ensayos de laboratorio

Ensayo # 13

Fecha: 11 / 24



Fotografías del molde y la pieza de vidrio

Calidad de detalle (fidelidad): ☐ Baja ☐ Media ☒ Alta

De los resultados
Conclusiones: Una de las aristas no está completa igual
que la muestra anterior. Se supone que el material que
ocupa ese lugar puede estar en forma de ceniza. La copia de
las texturas es buena si se obvian las burbujas generadas por
errores de procedimiento.

De la impresión

Material del modelo: Flex-TPU (Poliuretano termoplástico)
Temperatura de la boquilla: 215 °C
Temperatura de la cama: 50 °C
Peso del modelo + soportes necesarios: 15,86 grs
Costo del material para el modelo: U\$S 0,6
Observaciones del modelo impreso: _____
Presenta formación de hilos en el interior. El voladizo de la
boca de colada presenta deformaciones en las esquinas.

De la extracción del positivo

Método: Quemado en hornos (6 horas)
Procedimientos complementarios de extracción: _____
El tiempo no fue suficiente para retirar el material del
positivo. Se somete a una curva de quemado de 12 horas
Observaciones del molde vacío: _____
El molde se ve negro en su interior y parece presentar
residuos del positivo en forma de gotas

Fichas de sistematización de ensayos de laboratorio

Ensayo # 14

Fecha: 11 / 24



Fotografías del molde y la pieza de vidrio

Calidad de detalle (fidelidad): ☒ Baja ☐ Media ☐ Alta

De los resultados
Conclusiones: El resultado presenta residuos blancos en
la superficie que alteran la geometría y las texturas de las
caras del cubo. Las aristas se ven cortadas. Este filamento no
presenta resultados aceptables para el método de
extracción por quemado en hornos.

4.1.3. Problemas generales del colado

Se identifica que todos los ensayos muestran una falta de llenado del molde en los vértices que se ubican con mayor proximidad a la boca de colada (Figura 41). Al realizar un análisis del porcentaje de llenado se pudo determinar que los moldes se llenaron a un 98,7% de su totalidad. Según Da Ponte (comunicación personal, 2025) para el vidrio de botellas se requerirían 1050°C para lograr la fluidez necesaria para completar el molde. Aun así, los resultados de los ensayos de laboratorio son concluyentes en relación con los diferentes materiales de los filamentos y los métodos de extracción de los positivos.

Figura 41. Molde abierto que demuestra la falta de llenado



Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Tablas de análisis de patrones

A continuación, se elaboran tablas comparativas con algunos parámetros de los ensayos de laboratorio como forma de segmentar los resultados y ajustar las conclusiones para futuros trabajos.

La siguiente tabla compara los tres ensayos realizados con el método de extracción de desprendimiento en caliente. Se incluye entre ellos el ensayo de TPU con desprendimiento en frío dado que finalmente, durante el proceso, el método efectivo para retirarlo fue con aumento de temperatura. Esta comparativa se realiza dado que las conclusiones de estos ensayos arrojan que el procedimiento sería efectivo para piezas en las que tengamos acceso al interior y no requieran copia de bajorrelieves.

Tabla 4. Comparativa de ensayos con método de desprendimiento en caliente







	Costo del filamento para el ensayo	Calidad de detalle (fidelidad)	Costo energético de extracción aproximado	Comparativa de texturas de caras	
PLA	U\$S 0,3	Media	0,33 kWh		
Hyper PLA	U\$S 0,6	Media	0,33 kWh		
TPU	U\$S 0,6	Baja	0,33 kWh		

Fuente: Elaboración propia

Si bien el filamento que tuvo mejor desempeño con este método de extracción es el PLA, no se encuentran grandes diferencias de calidad con el Hyper PLA. Se destaca la característica del TPU de su flexibilidad que lo convierte en un positivo reutilizable en caso de que el molde no tenga enganches y su geometría permita su extracción sin aumentos de temperatura (no fue el caso para los ensayos de laboratorio aquí realizados).

La siguiente tabla compara los resultados de los filamentos solubles. Para su elaboración se toma uno de los ensayos de PVA sin relleno de impresión (se elige el que tiene mejor calidad de copia), el ensayo de PVA con relleno de impresión y el ensayo con filamento HIPS.

Tabla 5. *Comparativa de ensayos con método de disolución*

	Costo del filamento para el ensayo	Calidad de detalle (fidelidad)	Costo del diluyente para la extracción	Comparativa de texturas de diversas caras	
PVA (sin relleno)	U\$S 1,3	Media	El costo de 2 litros de agua es despreciable (U\$S 0,0021)		
PVA (con relleno)	U\$S 2,6	Alta	El costo de 2 litros de agua es despreciable (U\$S 0,0021)		
HIPS	U\$S 0,2	Media	No calculable por no encontrarse en el mercado		

Fuente: Elaboración propia

El HIPS se descarta por no haber encontrado un proveedora estable en el mercado local que cuente con este compuesto a la venta. Además, el método de disolución con el compuesto

que se consiguió no fue completamente efectivo por lo que el modelo de vidrio final presenta residuos de ceniza de este material. El PVA impreso con relleno ha resultado tener los mejores resultados entre las muestras solubles, sin embargo, el relleno es necesario para mantener la estructura del positivo al hacer el molde lo que implica mayor utilización de material y costos. Por último, se comparan los ensayos realizados con el método de extracción por quemado. Dado que no se conoce con exactitud cuánto tiempo durante las estabilizaciones se mantienen prendidas las resistencias el cálculo de la energía se realizó suponiendo que en la fase de estabilización el horno consume un 40% de su potencia nominal.

Tabla 6. Comparativa de ensayos con método quemado en hornos

Costo del filamento para el ensayo		Calidad de detalle (fidelidad)	Costo energético de extracción aproximado	Comparativa de texturas de diversas caras	
PLA	U\$S 0,3	Media	27,2 kWh		
PLA	U\$S 0,3	Alta	38,4 kWh		

Hyper
PLA U\$S 0,6 Baja 38,4 kWh



TPU U\$S 0,6 Baja 65,6 kWh













Fuente: Elaboración propia

Al comparar los resultados de los ensayos de laboratorio en los que los positivos fueron quemados se descartan el TPU y el Hyper PLA por presentar residuos de ceniza del positivo en la pieza de vidrio independientemente del tiempo de quemado al que se los exponga. En relación con el PLA presentó muy buenos resultados con este método de extracción, sobre todo con el quemado de 12 horas. Como se mencionó anteriormente puede ser necesario para aplicar el proceso a otros volúmenes alargar la meseta para asegurar el vaciado completo del molde antes de colocar dentro el vidrio. Un aspecto adicional que considerar cuando utilizamos este método de extracción es la energía ocupada para quemar los positivos de dentro de los moldes. Dado que el método de extracción por quemado con 12 horas de meseta ocupa un aproximado de 38,4 kWh, y considerando con la tarifa eléctrica uruguaya estimada en U\$S 0,28 esto equivale U\$S 11.

Por último, se comparan a continuación la muestra de cada método de extracción que obtuvo los mejores resultados en términos de fidelidad con los parámetros de los ensayos que utilizaron la técnica tradicional.

Tabla 7. *Comparativa de ensayos con mejores resultados con la técnica tradicional de la cera perdida.*

Material del positivo	Tiempo de fabricación del modelo	Tiempo de extracción	Costo del material del positivo	Costo de la energía o solvente para la extracción	Calidad de detalle (fidelidad)	Comparativa de texturas de diversas caras
50% Cera de abeja, 50% Parafina (Modelado a mano)	Más de 360 minutos	30 minutos	U\$S 1,4	U\$S 0,14	Media	 
50% Cera de abeja, 50% Parafina (Colado en molde de alginato)	130 minutos	30 minutos	U\$S 3,4	U\$S 0,14	Alta	 
50% Cera de abeja, 50% Parafina (Colado en molde impreso en filamento FLEX)	230 minutos	30 minutos	U\$S 2,7	U\$S 0,14	Alta	 
PLA (desprendimiento en caliente)	90 minutos	10 minutos	U\$S 0,3	U\$S 0,092	Media	 
PVA (con relleno) (disuelto en agua)	90 minutos	60 minutos	U\$S 2,6	U\$S 0,0021	Alta	 

PLA (quemado en hornos)	90 minutos	780 minutos	U\$S 0,3	U\$S 11	Alta
-------------------------	------------	-------------	----------	---------	------



Fuente: Elaboración propia

Vale aclarar que el costo del método de extracción varía dependiendo de la cantidad de moldes procesados simultáneamente. Si un método permite procesar varios moldes a la vez, el costo unitario de extracción se reduce, aspecto que se debe tener especialmente en cuenta para producciones seriadas o repeticiones. Esto resulta en que la evaluación del filamento con mejores propiedades dependerá del trabajo que se quiera realizar. El balance entre costo del material, el costo de la extracción y el tiempo de fabricación dependerá del tamaño y de la cantidad de piezas a fabricar. Hallaremos entonces el punto de equilibrio en el que tanto el PVA disuelto en agua como el PLA quemado en hornos tienen el mismo costo de filamento sumado al costo de extracción (considerando el costo de extracción del PVA igual a 0) obviando el parámetro del tiempo.

$$\text{CostoPLA} = 19 \times \frac{x}{1000} + 11$$

$$\text{CostoPVA} = 90 \times \frac{x}{1000}$$

$$\text{Igualando ambos costos: } 19 \times \frac{x}{1000} + 11 = 90 \times \frac{x}{1000}$$

$$11000 = 71x \Rightarrow x = \frac{11000}{71} = 154.93 \text{ gramos}$$

Los costos totales de PLA y PVA son iguales entonces cuando se usan 154.93 gramos (redondeando en 155 gramos) de cada uno. Si se utiliza más cantidad de filamento será conveniente utilizar PLA y si se utiliza menos será conveniente utilizar PVA.

4.1.5. Resultados de piezas representativas

Para algunos modelos se realizaron varios ensayos de laboratorio, procurando variar la granulometría de la molienda utilizada debido a que la geometría de las piezas no permitió colar el vidrio de forma adecuada.

4.1.5.1. Modelo representativo 1

El primer ensayo de ambos volúmenes que componen este modelo se realizó con molienda de entre 3 mm y 4 mm. El tornillo presenta una muy buena representación de la rosca con algunos detalles que son factibles de desbastar (Figura 42). Se le realizó el corte de los restos de la boca de colada con una sierra asistida por agua para vidrio.

Figura 42. Tornillo de vidrio



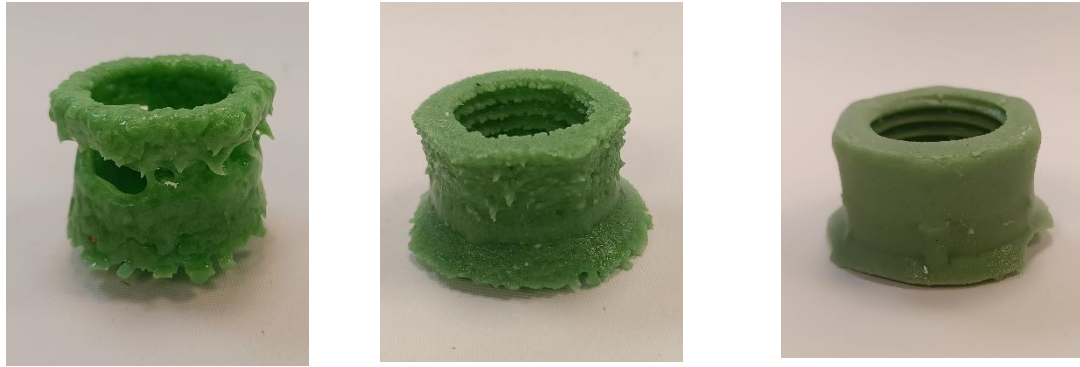
Fuente: Elaboración propia

Por su parte, la tuerca no llegó a colar y el volumen generado en vidrio no es representativo del modelo original. Se decidió en este sentido realizar dos ensayos más con granulometría de molienda más fina para permitir el mejor llenado del molde. Para dichos ensayos se utilizó molienda de entre 0,85 mm y 1 mm y de menos de 0,5 mm respectivamente.

Tabla 8. Comparativa de resultados de tuerca según granulometría de molienda

Molienda de entre 3 mm y 4 mm	Molienda de entre 0,85 mm y 1 mm	Molienda menor a 0,5 mm
-------------------------------	----------------------------------	-------------------------





Fuente: Elaboración propia

De las piezas resultantes en vidrio se observa que tuerca generada con la molienda de entre 0,85 mm y 1 mm si bien coló generando un volumen similar al original, no formó correctamente la rosca quedando espacios entre los granos fusionados. Por otro lado, la tuerca con la molienda menor a 0,5 mm copió completamente la rosca de la tuerca, que luego de unos pequeños ajustes de desbaste a ambas piezas, encastran y rosca en el tornillo de vidrio generado. Ninguna de las 3 tuercas logró copiar el perfil externo de la tuerca, revelando que es necesario variar de cara por la que entra el vidrio para permitir un mejor llenado de la pieza o aumentar la temperatura para lograr un mejor colado del vidrio de botella.

4.1.5.2. Modelo representativo 2

Del modelo representativo 2 se realizó un único ensayo con molienda de granulometría de menos de 0,5 mm dado que los espacios a llenar eran relativamente pequeños. Los resultados no alcanzaron las expectativas. En este caso, la pieza se separó en tres partes y las que quedaron unidas lo hicieron de forma fija, contrariamente a lo que se esperaba. Esto denota que ninguna de las tolerancias testeadas permite que el yeso cuele por el espacio entre las piezas, lo que deja una burbuja de aire que luego se llena con vidrio durante la horneada uniendo las piezas entre sí (Figura 43 y Figura 44). Para lograr piezas con este tipo de mecanismos encastrados integrados por impresión se requiere una investigación más profunda en este sentido.

Figura 43. *Dos eslabones unidos por fallo en el molde*



Fuente: Elaboración propia

Figura 44. *Dos eslabones unidos por fallo en el molde*

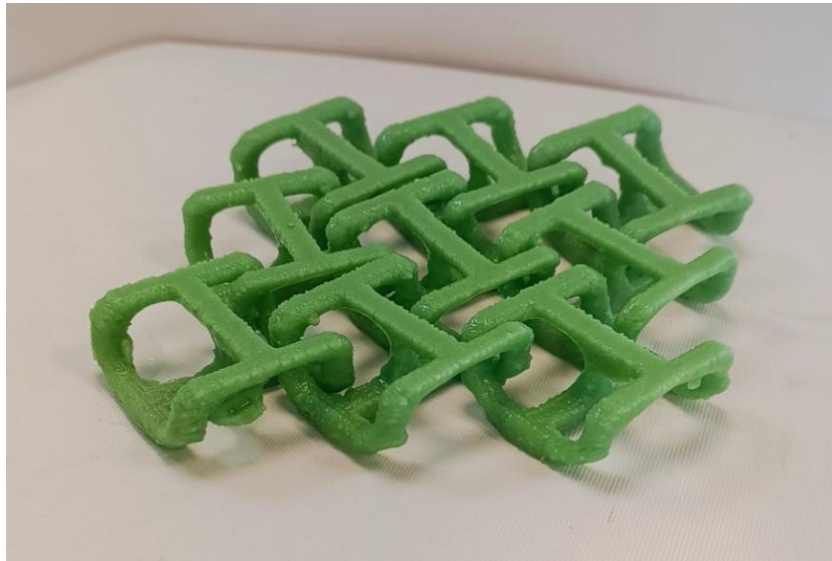


Fuente: Elaboración propia

4.1.5.1. Modelo representativo 3

Para este modelo también se realizó un único ensayo dado que su resultado fue satisfactorio. El molde se llenó con molienda de entre 0,5 mm y 0,85 mm para permitir el mejor ingreso de la molienda al molde antes de la horneada. Al desmoldarlo este modelo presentaba la unión de todos los eslabones mediante la boca de colada y algunos de los separadores. Luego de el corte en frío con una sierra asistida por agua de el exceso de vidrio se consiguió que cada eslabón se separara del resto y tuviera movimiento independiente (Figura 45). De esta forma la pieza logra la movilidad que debe tener una cota de malla. Se adjunta en el siguiente link un video que permite ver el movimiento de esta pieza: <https://youtube.com/shorts/BwFmJCSSLhg>.

Figura 45. *Cota de malla en vidrio*



Fuente: Elaboración propia

4.1.5.1. Modelo representativo 4

Por último, este modelo presentaba desafíos para el colado dado que algunas de sus paredes no llegaban a 6 mm de espesor. Por eso se utilizó molienda de menos de 0,5 mm para permitir el mejor ingreso de la molienda al molde antes de la horneada. Sin embargo, el modelo no se coló completamente, presentando ciertas diferencias con el modelo original (Figura 46). Este modelo debió imprimirse a una escala mayor, de modo que los espesores de las paredes se aproximaran a los 6 mm de espesor. De todas formas, la pieza de vidrio resultante remite al modelo original.

Figura 46. *Benchy en vidrio*



Fuente: Elaboración propia

5. Discusión y conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones y el análisis derivado del trabajo realizado, cerrando el desarrollo de este proyecto de investigación en relación con los objetivos planteados. Se presentará además la reflexión sobre la relevancia del trabajo y sus posibles aplicaciones, como forma de consolidar el valor de esta investigación y su relevancia en el campo.

5.1. Conclusiones

Este apartado presenta las conclusiones obtenidas a partir del análisis de los resultados en función de los objetivos planteados, aportando hacia una visión integral sobre el impacto de esta investigación en el campo del diseño industrial y la fabricación de piezas de vidrio.

En relación con los objetivos de este TFE, se identifica el PLA y el PVA como opciones viables con diferentes métodos de extracción, cumpliendo con el primer objetivo específico que proponía evaluar la aplicabilidad de diferentes filamentos de impresión 3D en procesos de casting de vidrio, considerando aspectos relacionados con su desempeño técnico, económico y ambiental para optimizar la creación de moldes positivos y la calidad de las piezas obtenidas.

El objetivo de realizar ensayos de laboratorio llevó a la conclusión de la alta fidelidad en la reproducción de detalles con ciertos métodos de extracción y filamentos específicos, así como la determinación del porcentaje de aire atrapado en la molienda de vidrio según su granulometría, que constituye un avance para la determinación de volúmenes necesarios de bocas de colada.

En respuesta al tercer objetivo que propone valorar las posibilidades que ofrece el proceso en relación con la técnica tradicional de casting a la cera perdida se determinó que la impresión 3D puede reducir los tiempos, cantidad de pasos y/o costos del proceso.

El estudio aquí realizado determinó que el PLA es uno de los filamentos más viable para la creación de moldes positivos en el proceso de casting de vidrio debido a su equilibrio entre el costo del material, la ausencia de residuos y precisión en la copia de detalles, aunque el costo de extracción es elevado lo que puede ser contrarrestado mediante un proceso térmico compartido entre varias piezas para disminuir el costo por unitario. Otros filamentos como el

PVA demostraron también una excelente calidad en la copia con procesos de extracción más simples y rápidos. Sin embargo, su flexibilidad hace que se requiera más material para la impresión de los positivos que sumado al costo de este filamento, no haría viable la producción de piezas de gran tamaño y/o en serie. El filamento HIPS, aunque soluble, no representa una opción viable para generar positivos para esta técnica debido a la dificultad para conseguir el solvente adecuado y la lentitud de disolución que no permite remover la totalidad del positivo. El Hyper PLA se descartó por dejar residuos en la pieza final de vidrio al quemarse, y al desprenderse en caliente se obtienen los mismos resultados que el PLA que es más económico. Por último, el TPU es una buena alternativa para piezas que no presenten enganches en el molde y permiten retirarlo en frío. Esto lo transforma además en un positivo reutilizable, lo que es altamente valorado en casos en donde se quiera repetir la pieza.

En relación con el primer objetivo específico de esta propuesta de investigación, se diseñó un modelo experimental que permitió evaluar las variables que influyen en el proceso de casting de vidrio. El modelo fue compatible con los 5 filamentos seleccionados cumpliendo con las métricas establecidas. Así también, todos los moldes fueron fabricados exitosamente, lo que implica que ninguno sufrió inconvenientes en el horneado. Por último, en relación con la tasa de colado, si se considera que los defectos en el colado de los ensayos de laboratorio se deben a la conjunción de la geometría y el tipo de vidrio que se utilizó, y considerando que en todos los casos el molde fue llenado en aproximadamente un 98% se considera que se cumplió con la métrica establecida.

En respuesta al segundo objetivo específico, se testearon los 5 filamentos seleccionados mediante los ensayos de laboratorio diseñados. Se definieron métodos de extracción que no requieren solventes tóxicos. En relación con la métrica del tiempo de extracción, se determinó que el método de extracción de desprendimiento en frío y en caliente requiere 10 minutos para la pieza diseñada para los ensayos de laboratorio, reduciendo el tiempo de extracción de la técnica tradicional de la cera perdida que para la pieza analizada tarda 30 minutos. Se verificó la ausencia total de residuos de filamentos en la pieza final de vidrio en la mayoría de los casos, con excepción del Hyper PLA y el TPU quemados en horno y el HIPS disuelto en D-Limoneno. Se identificó, en relación con la tercera métrica, que el filamento PLA con el método de extracción de quemado en hornos (equipo con el que generalmente se cuenta en un taller

que trabaja con vidrio y específicamente con la técnica de casting) y el PVA con el método de extracción de disolución en agua presentan viabilidad práctica para piezas complejas con moldes cerrados. Así también se destaca para el uso de moldes abiertos el filamento FLEX (TPU) con el método de desprendimiento en frío, como se mencionó anteriormente.

En lo que respecta al tercer objetivo específico, se analizaron y evaluaron las propiedades de la impresión 3D con los cinco filamentos seleccionados en la fabricación de moldes de yeso según las métricas establecidas. Los resultados de los ensayos de laboratorio y la información registrada en fichas de sistematización permitieron evaluar la reproducción de detalles en cada una de las muestras determinando que el PLA con el método de extracción por quemado en hornos y el PVA con el método de extracción por disolución en agua obtuvieron piezas de vidrio con una alta fidelidad, cumpliendo con las métricas establecidas. Así también, el costo del filamento por pieza fue menor que el costo básico de la cera tallada a mano (U\$S 1,4) para todos los filamentos, exceptuando el PVA. En relación con la métrica del costo de extracción, los métodos de disolución en agua, desprendimiento en frío y desprendimiento en caliente son menores que U\$S 0,14 por pieza, cumpliendo con las métricas establecidas. Como se mencionó anteriormente en el análisis de las métricas del primer objetivo específico, todos los moldes presentaron un porcentaje de llenado de un 98%. Se puede afirmar a partir de la consulta realizada a Da Ponte (2025) que el faltante 2% se debe a la falta de temperatura en la meseta superior que para el tipo de vidrio utilizado debió ser de 1050 °C. Si bien los ensayos de laboratorio son concluyentes no se puede afirmar haber cumplido con la métrica establecida. El registro fue exitoso completando todos los parámetros determinados en las fichas de sistematización para cada uno de los ensayos de laboratorio realizados.

El uso del vidrio de envases de un solo uso, y en particular de una botella específica permitió, como se esperaba, minimizar las variables relacionadas con la composición del vidrio y arribar a resultados concluyentes. Sería conveniente para futuros trabajos contar con vidrios específicamente formulados para realizar casting, lo que les confiere mejor fluidez y transparencia que se traduce en resultados que conservan la transparencia y el brillo. Sin embargo, mientras que este tipo de vidrios no se comercialicen en el mercado uruguayo, el uso de vidrio reciclado de envases continúa siendo una alternativa viable de reuso de un material que es considerado un residuo con escasas posibilidades de reutilización y factible

para esta técnica en particular de transformación del vidrio. Así, desde el Laboratorio de Vidrio hemos promovido el uso de envases para esta técnica que fomenta la investigación en torno a la adaptación de materiales y herramientas disponibles localmente para lograr procesos productivos y creativos que amplíen las posibilidades de transformación del material para artistas, artesanas y diseñadoras en el contexto local.

El proceso que este trabajo investigó logró su optimización al integrar la impresión 3D al casting de vidrio, reduciendo los tiempos de fabricación y la cantidad de pasos necesarios en comparación con la técnica tradicional de cera perdida. El aporte a la comunidad científica radica en que es el primer estudio académico sobre casting de vidrio con material proveniente de envases de descarte en Uruguay, lo que a su vez reduce la dependencia de importaciones de materiales promoviendo el reuso en el contexto local. Se prevé que aportará al sector de la enseñanza del vidrio en diseño industrial y al sector productivo local promoviendo la exploración de nuevas tecnologías en vínculo con técnicas tradicionales. Este enfoque permitirá a jóvenes acercarse al vidrio mediante el uso directo de técnicas de impresión 3D, las cuales probablemente les resultan más familiares debido a su creciente popularidad en la actualidad.

Por último, otra conclusión relevante a la que se arribó en este trabajo es la determinación que la granulometría de la molienda influye directamente en el volumen de la boca de colada, siendo necesario un volumen adicional que contemple el aire atrapado entre los granos. Los ensayos de modelos representativos demostraron que, al reducir el tamaño de grano, mejora el llenado de moldes con geometrías complejas utilizando vidrio de botella, como el caso de la tuerca, aunque se sacrifica la transparencia y el brillo del objeto final. Los cálculos realizados permitieron determinar que el volumen adicional de la boca de colada debe ser el volumen del modelo multiplicado por 0,525 para asegurar el llenado adecuado independientemente del tamaño de grano utilizado. Sin embargo, los cálculos de volúmenes de vidrio a utilizar en los ensayos de modelos representativos no confirman este punto, se estima que debido a errores en las medidas. Sería necesario revisar los volúmenes de los ensayos representativos de la técnica para arribar a resultados concluyentes sobre los datos generados en este TFM.

5.2.DISCUSIÓN

Este apartado procura presentar un análisis crítico de los resultados obtenidos en este proyecto, relacionándolos con sus posibles aplicaciones en el campo de la fabricación de objetos de vidrio.

Este trabajo surge del interés de conjugar los beneficios de la impresión 3D con la técnica de casting de vidrio, lo que le confiere características que no son alcanzables con la técnica tradicional como la precisión, la repetibilidad y la fabricación de piezas dentro de otras o enlazadas que dificultan su acceso para modelarlas a mano. Los objetivos específicos de este trabajo, que incluyen la comparación de diversos filamentos y la evaluación de métodos de extracción, fueron adecuados para abordar el problema de investigación porque permitieron analizar de manera sistemática los materiales y técnicas con las herramientas que se disponían, permitiendo explorar nuevas posibilidades de fabricación.

Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio confirman que la impresión 3D es una alternativa a la cera perdida para la creación de positivos en el proceso de casting de vidrio aportando un enfoque innovador que combina sostenibilidad con tecnología, reduce la dependencia de vidrios importados y promueve el uso de residuos reciclados impulsando la industria creativa local.

5.2.1. Análisis comparativo de filamentos y métodos de extracción en el proceso de casting de vidrio

A continuación, se desarrolla un análisis comparativo de los materiales y métodos de extracción que presentaron mejores resultados explicitando las ventajas y desventajas de cada uno para la fabricación de objetos en vidrio.

5.2.1.1. Modelado con cera

El modelado manual en cera conlleva tiempos prolongados de fabricación y dificulta la reproducción precisa de formas geométricas o texturas pequeñas debido a las limitaciones propias del trabajo manual. Sin embargo, este método permite una expresión artística y manual difícilmente replicable con herramientas digitales, siendo especialmente adecuado para piezas de arte o de diseño artesanal.

5.2.1.2. Moldeado tradicional con alginato y cera

La técnica tradicional en la que se genera un molde con alginato y luego se cuela la cera dentro de él presenta un alto nivel de reproducción de detalles. Sin embargo, el proceso es largo y más costoso que otros métodos explorados, además de requerir la creación de un positivo primario que en el caso de esta investigación se imprimió en 3D en PLA. El uso de alginato implica la necesidad de elaborar un molde nuevo por cada pieza que se quiera fabricar debido a la degradación de este material. Alternativamente, el uso de moldes de caucho podría solucionar este inconveniente, pero su costo inicial es significativamente mayor. Esta es una variación de la técnica tradicional que permite la reproducción de piezas con menor dedicación horaria y trabajo manual. Es útil en los casos en los que se tiene un positivo primario que se quiere copiar en vidrio.

5.2.1.3. Impresión 3D con filamento FLEX

La impresión 3D utilizando filamento FLEX para generar moldes es una opción económica y duradera en comparación con el alginato. Sin embargo, la rigidez del material dificulta el desmolde en piezas con atrapamientos. Este método es adecuado para la fabricación de modelos positivos en cera que no presentan enganches complejos, logrando resultados en vidrio con una alta fidelidad respecto al diseño original.

5.2.1.4. PLA con desprendimiento en caliente

El método de extracción del PLA mediante desprendimiento en caliente resulta ser el más rápido y menos costoso en comparación con los demás. Sin embargo, presenta limitaciones significativas: no permite la fabricación de piezas con enganches, y la fidelidad en la reproducción de texturas se clasifica como media. Este método es adecuado para piezas simples y procesos de producción en los que se priorice la velocidad.

5.2.1.5. PVA con disolución en agua

El uso de PVA es altamente efectivo para piezas pequeñas que no requieren la utilización de grandes cantidades de material o piezas únicas y para procesos que priorizan la reproducción de detalles finos en tiempos relativamente cortos. No obstante, su viabilidad se reduce para piezas más grandes o de grandes series de reproducción debido al costo proporcional del material. El costo del material iguala al costo de extracción sumado al costo del material del

PLA quemado en hornos cuando se utilizan 155 grs, por lo que para piezas cuya masa sea mayor a este valor no es conveniente.

5.2.1.6. PLA quemado en hornos

El uso del PLA con extracción por quemado en hornos destaca por ofrecer la mejor relación entre nivel de detalle y costo del material, aunque presenta un consumo energético que debe ser considerado en producciones a gran escala para optimizar este método y hacerlo competitivo con otras alternativas. Así, se reducen los costos de extracción mediante la quema simultánea de múltiples positivos en una única horneada. Esto lo convierte en una opción viable para producciones seriadas. Por ejemplo, si se quisiera reproducir para la pieza fabricada en los ensayos de laboratorio, y se fueran a materializar cinco o más piezas, el proceso de quema en hornos compensa el costo del material de otras alternativas, como por ejemplo el del PVA disuelto en agua, haciendo que el uso del PLA sea más conveniente económicamente para producciones en las que se empleen más de 155 gramos de filamento, presentando resultados con la misma fidelidad al original.

5.2.1.7. Análisis general

Es necesario resaltar, que ninguna de las opciones es invariablemente mejor que otra, sino que depende de lo que se vaya a fabricar, las características que se requieran de la pieza, el tiempo disponible, los recursos materiales disponibles y la cantidad de piezas a fabricar. Para cada caso será necesario realizar una evaluación que permita elegir el método a utilizar. Así también resaltar que además de los precios de los filamentos, las tarifas de electricidad y agua pueden variar según el país en el que se vaya a utilizar, debiendo ajustar los cálculos a las tarifas locales actuales, lo que puede además variar las conclusiones de este trabajo haciendo los métodos más o menos económicos según sea el caso.

Por último, es de interés destacar que la transformación del vidrio y en particular la técnica de casting de vidrio es un proceso que se asocia al ámbito artístico, lo que limita sus aplicaciones prácticas y comerciales en sectores como el diseño industrial. Así también, la apropiación de las tecnologías de fabricación digital en la producción de vidrio tradicional se ve restringida dado que algunas personas que trabajan con las técnicas tradicionales no están dispuestas a incorporar estos métodos o enfrentan barreras de aprendizaje para utilizarlos ellas mismas.

Algunas de las artistas que han incorporado la tecnología de impresión 3D en su trabajo han declarado recurrir a terceros para la elaboración de los modelados CAD y/o la fabricación. Esto coarta su autonomía en la producción y la posibilidad de expresión artística directa.

6. Limitaciones y prospectiva

El siguiente capítulo presenta un análisis crítico de los procesos desarrollados durante este trabajo de investigación. Se expresan las limitaciones que se enfrentaron durante el desarrollo del proyecto que incluyen factores técnicos y metodológicos que condicionaron los alcances y resultados obtenidos. Además, el capítulo incluye un apartado de prospectivas que expone las posibles líneas de investigación futuras que de este trabajo surgen, cuyo desarrollo permitirá profundizar y ampliar las posibilidades que la conjunción de técnicas tradicionales y contemporáneas habilita.

6.1.LIMITACIONES

El siguiente apartado expone las restricciones que tuvo el desarrollo de algunas actividades durante esta investigación inherentes al contexto local, con la intención de reconocer las dificultades como condicionantes. Además, estas pueden ser puntos de partida para reflexionar sobre áreas de mejora que podrían incorporarse en futuras investigaciones.

Por un lado, como se mencionó en el subapartado 2.1.2.4 El vidrio, en Uruguay existen escasas proveedoras de vidrio artístico, el cual está formulado específicamente para utilizarse en este tipo de trabajos, dado que posee un punto de fusión más bajo y menor viscosidad, lo que se traduce en una mejor fluidez y características de brillo y transparencia maximizadas. Además, las diferentes marcas aseguran la compatibilidad de los vidrios que fabrican, lo que se traduce en la posible fusión de vidrios de diversos colores sin riesgo de roturas de la pieza. Sería conveniente realizar ensayos con vidrios específicamente formulados para la realización de casting, lo que permitiría evidenciar su potencial en términos de calidad de detalles y apariencia. Si bien los resultados de esta investigación demostraron efectividad de la técnica con un tipo de vidrio industrial, la utilización de una única botella de una fábrica específica limita la generalización de los resultados. No todas las botellas de vidrio tienen la misma fluidez, por lo que los mismos ensayos con botellas de otros colores o fabricantes podrían variar los resultados en términos de porcentaje de llenado de los moldes. Es de interés entonces el desarrollo de una investigación que analice las características de los diferentes colores de botella y/o diferentes fabricantes como materia prima para la técnica de casting.

En el mismo sentido, el tipo de vidrio utilizado, debido a su alta viscosidad, requiere temperaturas más altas para lograr la fluidez necesaria para el desarrollo de la técnica. Sin embargo, la temperatura máxima de trabajo estuvo limitada por los hornos del Laboratorio de Vidrio que se tuvieron a disposición que alcanzan un máximo de 900°C. Si se contara con hornos que alcancen mayores temperaturas los resultados de colado en los moldes podrían tener variaciones permitiendo un porcentaje más alto de llenado.

Por otro lado, la selección de filamentos estuvo limitada por los filamentos que se encontraron en el mercado local en Uruguay. Así también, se probó una única marca de cada tipo de filamento, limitando la aplicabilidad generalizada de los resultados a otros contextos o marcas del material. Esto se debió a las limitantes en relación con los recursos económicos disponibles que no permitieron probar todas las marcas del mismo tipo de filamento que se pudieron encontrar eligiendo únicamente los filamentos más económicos de cada tipo para realizar esta investigación. En el mismo sentido, la falta de disponibilidad de algunos productos en el mercado local como por ejemplo el D-Limoneno (solvente del HIPS) limitó la exploración de métodos de extracción adicionales y la evaluación de los costos de este proceso.

En relación con los análisis de tiempos realizados, no se diferenciaron aquellos procesos que requieren trabajos manuales de los que se realizan mediante fabricación digital, por lo que sería conveniente incluir en futuros análisis estos datos de manera diferenciada para poder estimar el costo en horas de mano de obra y el costo en horas de máquina además de los tiempos generales.

Por último, los plazos ajustados que este Trabajo Final de Máster supuso, restringieron la cantidad de ensayos que se pudieron realizar, limitando el desarrollo de modelos de mayor complejidad que permitan probar otros aspectos de la conjunción de la técnica. En este sentido, las pruebas de tolerancias son uno de los aspectos que requieren mayor investigación y que pueden ser retomados en futuros trabajos.

6.2. PROSPECTIVAS

El siguiente apartado expone las posibilidades de continuar esta investigación en diversos sentidos que aporten a la aplicación de la técnica de casting a partir de impresión 3D en el ámbito del arte, el diseño y las producciones manuales.

Cómo ya se mencionó en el apartado anterior, sería interesante ampliar esta investigación utilizando otros tipos de vidrios, tanto vidrios específicamente formulados para la técnica de casting como el análisis de los diferentes colores y fabricantes de botellas y sus características asociadas que afectan el desarrollo de la técnica de casting en particular. En este sentido la utilización de infraestructura capaz de alcanzar temperaturas mayores a 900°C permitiría explorar variaciones en las curvas de temperatura y optimizarlas para la utilización de este tipo de vidrio en particular, superando las limitantes que presenta la alta viscosidad del material. Así también, la ampliación de la investigación con filamentos del mismo tipo de diferentes marcas puede permitir una generalización más abarcadora. Del mismo modo, la profundización en la fabricación de mecanismos encastrados integrados por impresión con tolerancias exigidas para el colado del yeso permitiría la fabricación de piezas imposibles de fabricar con la técnica tradicional.

Por otro lado, se prevé que la continua evolución de la tecnología de impresión 3D impulsará el desarrollo de nuevos filamentos con diversidad de propiedades, por lo que será necesario continuar el desarrollo de esta investigación para mantener actualizados los resultados. Así también, la colaboración con un equipo interdisciplinario de expertos en fabricación, materiales y diseño puede aportar a la formulación de filamentos específicos con características ajustadas para la realización de la técnica que este trabajo exploró.

Finalmente, los resultados de este proyecto establecen un puntapié inicial para aplicaciones de la técnica en diversas tipologías de productos como por ejemplo en joyería, esculturas o arquitectura donde los beneficios de la impresión 3D y aquellos que conllevan el casting de vidrio se combinan expandiendo las fronteras de la estética y la funcionalidad. El acompañamiento de este desarrollo con nuevas prácticas de enseñanza permitirá integrar estas técnicas en la formación de diseñadoras y artesanas, fomentando la innovación, la sostenibilidad y el aprovechamiento creativo de materiales de descarte en entornos académicos y profesionales.

Referencias bibliográficas

- Amorín, B, Frabasile, C, Demaría, A, Moreira, L, Ronca, J y Ramos, F. (2024) Diagnóstico del residuo de vidrio hueco centrado en su recircularización en el contexto local. Informe final. Programa IM - Udelar "Ing. Oscar Maggiolo". Escuela Universitaria Centro de Diseño, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/46264>
- Amorín, B, Frabasile, C, Novick, J y Räber, M. (2021) Recuperación de técnicas tradicionales de vidrio, el caso Águeda Dicancro: investigación interna. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/43896>
- Amorín, B., & Frabasile, C. (2021) El valor patrimonial de los procesos tecnológicos antiguos: el núcleo de arena. *Textos de Tecnología*, (02), 55-65. Montevideo, Uruguay. <https://revistas.udelar.edu.uy/OJS/index.php/RTdT/article/view/568>
- Amorín, B., Rava, C., Schmukler, M., Castro, M., Frabasile, C. (2019) *Prácticas sustentables de diseño en vidrio*. Convocatoria de auto-identificación como Espacios de Formación Integral (EFI). Universidad de la República (Uruguay), Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo. Montevideo, Uruguay. <http://www.fadu.edu.uy/investigacion/noticias/practicas-sustentables-de-diseno-en-vidrio/>
- Besko, M., Bilyk, C., & Sieben, P. G. (2017). Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. *Gestão Tecnologia e Inovação*, 1(3), 9-18. Curitiba, Brasil. <https://www.opet.com.br/faculdade/revista-engenharias/pdf/n3/Artigo2-n3-Bilyk.pdf>
- Brachlow, H. (2019) Conference or Workshop, Kiln casting: What can go wrong and how to fix it at 2019 Glass Art Society Conference, St Petersburg, Florida, USA, 28 - 30 March 2019. RCA Research Repository. <https://researchonline.rca.ac.uk/4262/>
- Bristogianni, T., Oikonomopoulou, F., Veer, F., Snijder, A., & Nijse, R. (2017) *Production and testing of Kiln-cast glass components for an interlocking, dry-assembled transparent bridge*. In *Glass Performance Days 2017* (pp. 101-106). Glass PerformanceDays, Glaston Finland Oy.

<https://research.tudelft.nl/en/publications/production-and-testing-of-kiln-cast-glass-components-for-an-inter>

- Buscador. (n.d.) <https://www.une.org/Buscador>
- Chua, C. K., & Leong, K. F. (2015). *3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications (with Companion Media Pack) of Rapid Prototyping*. World Scientific Publishing. Singapore.
- Cutler, V. (2012). *New technologies in glass*. A&C Black. Londres, Reino Unido.
- Eblanks, D. K. (2018) *The fundamentals of kiln-casting and mould making* [Curso de escultura y vidrio]. ARTC 35601. Spring 2018. Kent, Ohio, USA. https://ksuglass.wordpress.com/wp-content/uploads/2019/04/ebanks_kilncastingoverview-s19.pdf
- Díaz Martín, C. P. (2022) *Estudio de la influencia de los parámetros de impresión 3D por FDM (modelo por deposición fundida) en las propiedades del PLA (ácido poliláctico)*. La laguna, España.
<https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/29961/ESTUDIO%20DE%20LA%20INFLUENCIA%20DE%20LOS%20PARAMETROS%20DE%20IMPRESION%203D%20POR%20FDM%20%28MODELO%20POR%20DEPOSICION%20FUNDIDA%29%20EN%20LAS%20PROPIEDADES%20DEL%20PLA%20%28ACIDO%20POLILACTICO%29..pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Frabasile, C. (2021) *Molde variable para termomodelado de vidrio plano de fabricación y uso local*. Trabajo Final de Grado. Universidad de la República (Uruguay). Escuela Universitaria Centro de Diseño, Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo. Montevideo, Uruguay.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/40603/1/FrabasileMolde%20variable%20para%20el%20termomodelado%20de%20vidrio.pdf>
- Garces Vargas, A. J., & Hernández Alba, Y. T. (2020) *Evaluación de películas poliméricas basadas en almidón de maíz, ácido poliláctico y polivinil alcohol como alternativa para la sustitución de polímeros convencionales a nivel laboratorio*. Bogotá.
<http://52.0.229.99/bitstream/20.500.11839/7790/1/6132199-2020-1-IQ.pdf>
- Gluzman, G. A. (2017). Caracterización morfológica y funcional de moldes y crisoles del sitio 15 de Rincón Chico, Provincia de Catamarca. Argentina.

https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/175105/CONICET_Digital_Nro.2697eb34-7141-41e5-8845-fd9f33804d77_B.pdf?sequence=2&isAllowed=y

- Haley, C., Klein, S., Jorgensen, T., & Brown, R. (2019) *3D Printing for Glass Casting*. In *NIP & Digital Fabrication Conference* (Vol. 2019, No. 1, pp. 100-104). Society for Imaging Science and Technology. Reino Unido. https://www.researchgate.net/profile/Susanne-Klein-3/publication/336129298_3D_Printing_for_Glass_Casting/links/5e8eec1e299bf1307989f15c/3D-Printing-for-Glass-Casting.pdf
- Harder J. (2019) *Glass recycling – Current market trends*. OneStone Consulting S.L., Barcelona, España. <https://www.recovery-worldwide.com/en/artikel/glass-recycling-current-market-trends-3248774.html>
- Hurtado, A., Selgas Sanchis, R., & Serrano Aroca, Á. (2020). El alginato y sus inmensas aplicaciones industriales. *Nereis*, (12), 137-149. Valencia. España <https://riucv.ucv.es/bitstream/handle/20.500.12466/1188/573-Article%20Text-2570-1-10-20200716.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Inamura, C., Stern, M., Lizardo, D., Houk, P., & Oxman, N. (2018). *Additive manufacturing of transparent glass structures*. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 5(4), 269-283. New Rochelle, New York. <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/125261/3dp.2018.0157.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- *Instituciones, leyes, presupuesto | Unión Europea*. (n.d.). European Union. https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget_es
- *Instituto Uruguayo de Normas Técnicas*. (n.d.). <https://www.unit.org.uy/>
- Matthias, G., & Jorgensen, T. (2012). *Glass Investment Casting with 3D Printed Models*. Londres, Reino Unido. https://repository.falmouth.ac.uk/32/1/RR_Glass%20investment%20casting_300913_nid130.pdf
- Nallem S. (2017) *Diseño y Fabricación Semi artesanal con vidrio en Uruguay*. Trabajo Final de Grado. Universidad de la República. Centro de Diseño, Ministerio de Educación y Cultura.

Montevideo,

Uruguay.

https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/123456789/17102/1/EUCD-Nallem_Disen0_fabricacion_vidrio.pdf

- Navarro, J. M. F. (2003) [1985]. *El vidrio* (No. 6). Editorial CSIC-CSIC Press. España.
- Núñez, E. G. (2020). *Desarrollo de nanocompuestos a base de ABS (Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno) reforzados con nanocristales de celulosa modificados por plasma*. Centro de Investigación en Química Aplicada. Coah. Mexico.
<https://ciga.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/643/1/Tesis%20MTP%20Ediberto%20Guzm%c3%a1n.pdf>
- Oikonomopoulou, F., Bristogianni, T., Barou, L., Jacobs, E., Frigo, G., Veer, F. A., & Nijse, R. (2018). *Interlocking cast glass components, exploring a demountable dry-assembly structural glass system*. *Heron*, 63(1/2), 103-138. Delft, Países Bajos.
<https://pure.tudelft.nl/ws/files/51460081/6a.pdf>
- *Plataforma de navegación en línea (OBP)*. (n.d.). <https://www.iso.org/obp/ui/es/#home>
- Rodríguez Torres, N., & Niño Rojas, G. F. (2021). *Caracterización de las propiedades mecánicas a tensión y compresión de materiales celulares en HIPS y TPU obtenidos por fabricación de filamento fundido*. Bogotá.
<https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/46a85009-bdf6-4002-be58-a0ca34601959/content>
- Romero, A. (2012). *Manual de glass casting : cera perdida y molde de arena*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
<http://132.248.9.195/ptd2013/Presenciales/0691614/0691614.pdf>
- Rosa, F., Bordegoni, M., Dentelli, A., Sanzone, A., & Sotgiu, A. (2017). *Print-in-place of interconnected deformable and rigid parts of articulated systems*. *Procedia Manufacturing*, 11, 555-562. Modena, Italy
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917303530?via%3Dihub>

- Rozo-García, F. (2020). *Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0*. Revista UIS Ingenierías, 19(2), 177-191. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia
<https://www.redalyc.org/journal/5537/553768132019/553768132019.pdf>
- Sanz Lobo E. (2005). *El vidrio como materia escultórica técnicas de fusión, termomodelado, casting, y pasta de vidrio*. Universidad Complutense de Madrid. España.
<http://biblioteca.ucm.es/tesis/bba/ucm-t28905.pdf>
- Servat C. Castillo E. (2008) *Vidrio Arte e Industria*. IUNA. Buenos Aires, Argentina.
http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/38952/Documento_completo.pdf?sequence=1.
- Thwaites, A. (2018) *Towards Making the Unmakeable: How 3D Printing Can Inform Kiln Formed Glass Practice in the 21st Century* (Doctoral dissertation, University of Sunderland). Sunderland, Reino Unido.
<https://sure.sunderland.ac.uk/id/eprint/12736/1/Angela%20Thwaites%20Thesis%20submission%20November%202018%20pdf.pdf>
- Whittingham, A. (2019) *Glass Casting*. The Crowood Press. Reino Unido.

Anexo A. Resumen extendido

Introducción

Este trabajo surge del interés por explorar nuevas posibilidades de fabricación combinando la impresión 3D con el casting de vidrio. Se aborda la limitación de la técnica tradicional de cera perdida en cuanto a precisión y reproducción de patrones complejos, y se propone analizar filamentos de impresión 3D para evaluar su viabilidad como positivos para la técnica de casting de vidrio utilizando botellas de un solo uso.

Marco Teórico

El casting es una técnica tradicional de modelado tridimensional de materiales no maleables, como los metales y el vidrio, que permite crear objetos macizos con formas complejas. Se coloca vidrio dentro o sobre el molde y se hornea para que fluya y tome la forma deseada. Tradicionalmente, el molde se fabrica a partir de un positivo en cera, pero en este trabajo se propone explorar el uso de la impresión 3D como alternativa. Para la formulación de los moldes se analizan antecedentes de mezclas de polvos con los que se conforman y dado que en todos los casos los materiales básicos son el yeso y el cuarzo se determina una composición de la mezcla de yeso, cuarzo y agua en partes iguales según su masa.

Por otro lado, este trabajo realiza también una búsqueda de antecedentes sobre el uso de la impresión 3D en el casting de vidrio, observando que ninguno de los escritos encontrados utiliza métodos alternativos al quemado para retirar los positivos de los moldes.

Por último, se aborda la escasez de proveedoras de vidrios artísticos en Uruguay, lo que justifica el uso de botellas de un solo uso como materia prima, contribuyendo a la recircularización del material. Se selecciona la botella de una única bebida y marca para minimizar las variables relacionadas con la composición del material.

Objetivos de la propuesta

El objetivo general de esta propuesta es determinar la viabilidad de cinco tipos de filamentos de impresión 3D para la creación de moldes positivos en el proceso de casting de vidrio, comparándolos en términos de coste, extracción del molde, ausencia de residuos y precisión

en la copia de detalles. Los objetivos específicos incluyen diseñar un modelo experimental para evaluar variables clave del proceso, probar cinco filamentos disponibles en el mercado local, establecer métodos de extracción, y analizar las propiedades de los filamentos seleccionados en la fabricación de moldes de yeso para producir objetos de vidrio reciclado, utilizando métricas como adaptabilidad, fidelidad en la reproducción de detalles, costes y tasa de éxito en los moldes fabricados.

Metodología

El abordaje metodológico implica la realización de ensayos de laboratorio, la sistematización y análisis de los datos para determinar qué filamentos son compatibles con esta aplicación. Estos métodos constituyen el núcleo de este trabajo ya que son los que proporcionan los datos y las conclusiones del mismo y se abordaron de la siguiente manera.

El modelo utilizado para los ensayos es un cubo de 40 mm con diferentes texturas en sus caras y una boca de colada inclinada para analizar el comportamiento de los materiales en voladizos. Se imprime en cinco tipos de filamentos seleccionados: Ácido Poliláctico (PLA), el Ácido Poliláctico Hiper (Hyper PLA), el Poliuretano Termoplástico (TPU también conocido como Flex), el Alcohol Polivinílico (PVA) y el Poliestireno de Alto Impacto (HIPS). Los moldes se construyen a mano utilizando una mezcla de yeso, cuarzo y agua, y se definen cinco métodos de extracción según las propiedades de cada filamento: disolución en agua para el PVA, disolución en D-Limoneno para el HIPS, quemado en hornos para el PLA, Hyper PLA y TPU, desprendimiento en frío para el TPU, y desprendimiento con aumento de temperatura para el PLA y Hyper PLA. Se utiliza vidrio molido con un tamaño de grano de entre 4 mm y 5 mm, y se hornean con una curva de temperatura para casting. Los resultados se registran y comparan cualitativamente con los modelos originales. A partir de estos ensayos, se proponen piezas que exploran capacidades expresivas y geométricas difíciles de lograr con la técnica tradicional.

Resultados

Los resultados de la investigación demuestran la viabilidad de la impresión 3D para crear moldes para el casting de vidrio, ofreciendo alternativas al método tradicional de cera perdida. Se identifican el PLA y el PVA como los filamentos que presentan mayor fidelidad al modelo

original, con métodos de extracción como el quemado en hornos para el PLA y la disolución en agua para el PVA. El PLA presenta un costo de material más bajo de los filamentos comparados, aunque el costo energético de su extracción del molde es alto. El PVA presenta el costo más alto de los filamentos comparados y es necesario imprimirlo con relleno para mantener su estructura durante la fabricación del molde, por lo que se utiliza más cantidad de filamento. Sin embargo el costo de su extracción es despreciable y muy rápida comparada con la del PLA. El TPU se muestra como una alternativa para piezas sin enganches, que se pueden retirar en frío, siendo reutilizable. El único método de extracción que logró reducir los tiempos de la técnica tradicional fue el desprendimiento en frío y en caliente que pasa de 30 a 10 minutos para la pieza analizada en los ensayos de laboratorio, pero que cuyos resultados presentan una fidelidad media al modelo original.

Discusión y Conclusiones

A partir de los resultados de los ensayos se concluye que no hay un filamento que se considere universalmente mejor, sino que la elección del material y el método depende de las necesidades del proyecto, considerando costos, tiempos, fidelidad de detalles y la cantidad de piezas a producir. Este trabajo muestra que la impresión 3D es una herramienta que permite optimizar algunos parámetros de la técnica del casting de vidrio. La transformación del vidrio y en particular la técnica de casting de vidrio es un proceso que se asocia al ámbito artístico, lo que limita sus aplicaciones prácticas y comerciales en sectores como el diseño industrial. En este sentido la incorporación de la impresión 3D al proceso puede aportar a la expansión de sus aplicaciones prácticas.

Anexo B. Preguntas de la encuesta a expertas

Se adjuntan a continuación las preguntas realizadas en la encuesta a expertas que trabajan con la técnica de casting en vidrio para aportar a la justificación del tema elegido.

Encuesta: Evaluación de la Técnica Tradicional de Cera Perdida en Casting de Vidrio

Los datos obtenidos en esta encuesta serán utilizados para el desarrollo de un Trabajo Final de Máster en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto de la Universidad Internacional de La Rioja, bajo la autoría de Carolina Frabasile. La información recabada será tratada de manera confidencial y se utilizará con fines académicos para evaluar el proceso de casting de vidrio. Su participación es voluntaria, y podrá optar por no responder a alguna de las preguntas si lo desea. Agradezco de antemano su colaboración.

¿Te gustaría dejarme tu nombre y/o contacto por si requiero más información?
(Opcional)

1. Nombre

2. Teléfono de contacto (recuerda poner el código regional para que pueda contactarte)

3. Cómo te autoidentificas en relación al trabajo con vidrio? (ejemplo: Artista, Docente, Diseñadora, Técnica, Productora, Estudiante, Etc.)

Proceso de modelado con cera

Técnica Tradicional de Cera Perdida en Casting de Vidrio

4. ¿Cómo consideras la técnica de cera perdida para la creación de patrones detallados, como características finas o detalles pequeños?

Marca solo un óvalo.

- ☐ Muy precisa
☐ Precisa
☐ Algo precisa
☐ Poco precisa
☐ No es precisa

5. ¿Cuánto tiempo estimas, aproximadamente, se requiere para modelar esta pieza en cera? Ten en cuenta la precisión de los detalles y el tamaño de la mano como referencia de las dimensiones de la pieza.



Marca solo un óvalo.

- ☐ Menos de 2 horas
☐ 2-4 horas
☐ 4-6 horas
☐ Más de 6 horas
☐ No lo se/ No tengo experiencia



8. ¿Cuánto tiempo estimas que se requiere para extraer la cera del molde de esta pieza (en un proceso estándar)?



Marca solo un óvalo.

- ☐ Menos de 1 hora
☐ 1-2 horas
☐ 2-4 horas
☐ Más de 4 horas
☐ No lo sé / No tengo experiencia

9. ¿Qué porcentaje de piezas de cera que creas o manejas se descartan debido a errores durante la modelación o extracción del molde?

Marca solo un óvalo.

- ☐ Menos del 5%
☐ Entre el 5% y el 10%
☐ Entre el 10% y el 20%
☐ Más del 20%

10. ¿Te interesa la repetitividad en las piezas que fabricas?

Marca solo un óvalo.

- ☐ Sí
☐ No
☐ Tal vez

11. ¿Consideras que la repetitividad en la producción con la técnica de cera perdida es un desafío?

Marca solo un óvalo.

- ☐ Sí, es difícil producir piezas de manera repetitiva
☐ A veces, depende de la complejidad de las piezas
☐ No, se puede producir de manera repetitiva sin problemas
☐ No tengo experiencia suficiente para responder

Comparación de la técnica tradicional con el uso de filamentos 3D como positivos

12. ¿Qué tan factible consideras la integración de impresión 3D para la creación de moldes en el proceso de casting de vidrio, en comparación con la cera?

Marca solo un óvalo.

- ☐ Muy factible / Una mejora significativa
☐ Algo factible / Puede ser útil en algunos casos
☐ No muy factible / No veo mucha ventaja
☐ No es factible / No es adecuado para este tipo de trabajo

13. ¿Cuáles son los principales desafíos que ves en el uso de impresión 3D en el proceso de casting de vidrio?

Marca solo un óvalo.

- ☐ Alta complejidad en el proceso de impresión
- ☐ Falta de precisión en la reproducción de detalles
- ☐ Dificultad en la extracción de los moldes 3D
- ☐ Costo elevado del proceso
- ☐ No tengo conocimientos
- ☐ Otros: _____

14. En términos de tiempo de modelado y repetitividad, ¿cómo compararías el uso de impresión 3D con la técnica de cera perdida?

Marca solo un óvalo.

- ☐ Los filamentos 3D son mucho más rápidos y repetibles
- ☐ Los filamentos 3D son algo más rápidos, pero con menos repetitividad
- ☐ La cera es más rápida y repetible
- ☐ La cera es algo más rápida, pero con menos repetitividad
- ☐ No puedo comparar / No tengo suficiente experiencia con impresión 3D

15. En general crees que integrar impresión 3D en un proceso de producción en serie de piezas de vidrio usando el casting es:

Marca solo un óvalo.

- ☐ Muy fácil / Alta viabilidad
- ☐ Algo fácil / Viabilidad moderada
- ☐ Difícil / Baja viabilidad
- ☐ No es viable

16. ¿Considerarías utilizar la impresión 3D para crear modelos positivos en tus procesos de casting de vidrio?

Marca solo un óvalo.

- ☐ Sí, definitivamente.
- ☐ Tal vez, dependiendo de las condiciones y materiales disponibles.
- ☐ No, prefiero métodos tradicionales.
- ☐ No, por otros motivos (especificar)
- ☐ Otros: _____

Evaluación general y comentarios

17. ¿Cuáles crees que son las principales ventajas de la técnica de cera perdida frente al uso de impresión 3D?

18. ¿Qué aspectos mejorarías en la técnica de cera perdida si pudieras?

19. ¿Tienes algún comentario adicional sobre la posibilidad de reemplazar o complementar la técnica de cera perdida con filamentos 3D en la producción de moldes para el casting de vidrio?

Google no creó ni aprobó este contenido.

Google Formularios

Anexo C. Figuras a mayor tamaño

Figura 9. *Diagrama de Gantt*

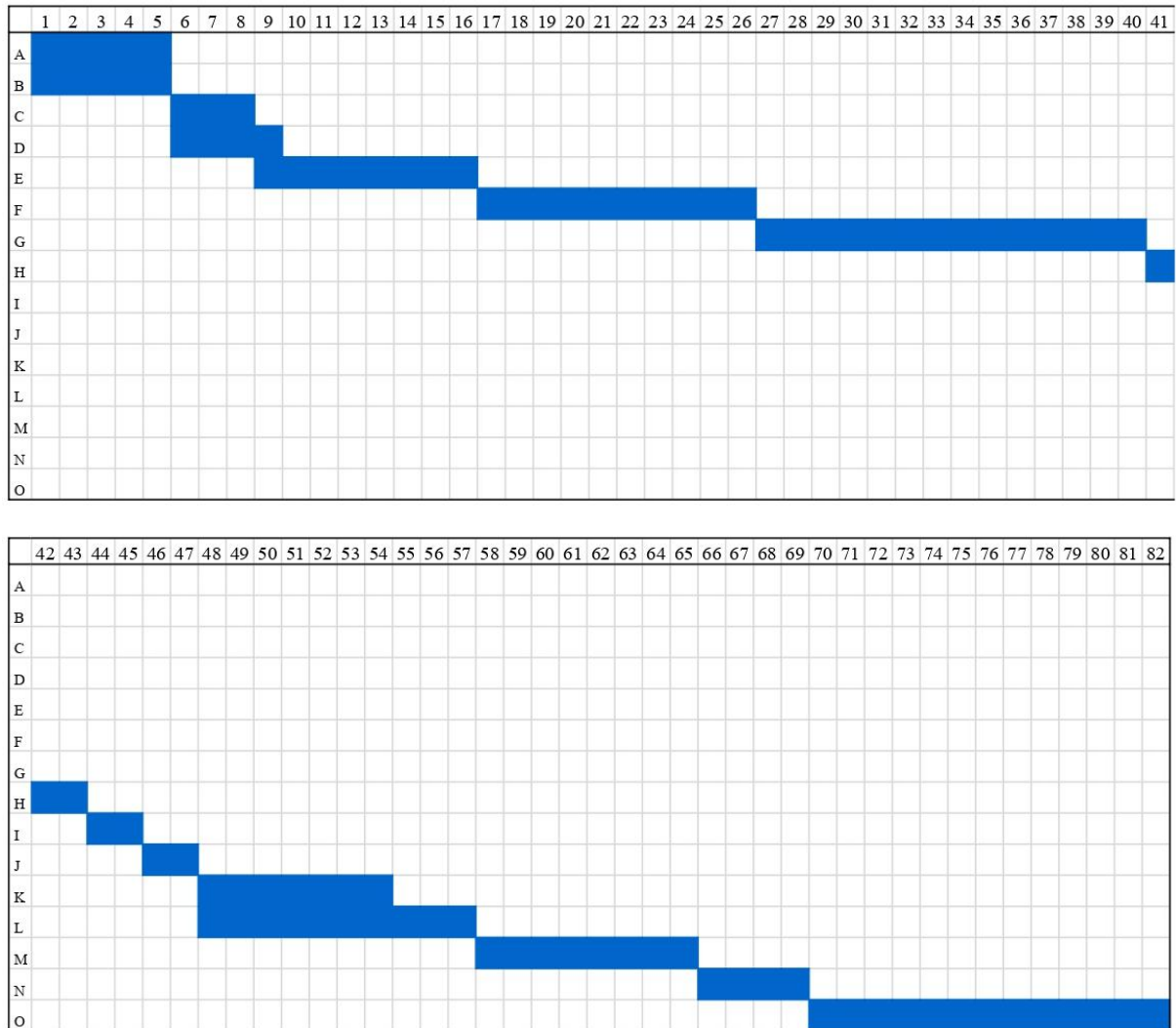


Figura 10. Captura de pantalla de proveedora local de filamentos



The screenshot shows the VACODIR website. The header includes the logo, navigation links (INICIO, EMPRESA, TIENDA, SOPORTE, BLOG, CONTACTO), a shopping cart icon, and a search icon. The main content area features a product listing for 'Filamento para impresora 3D eSUN ePVA (500g)'. The product image shows a spool of filament and its packaging. The text describes the filament as 'eSUN PVA soluble en agua: presentacion de 500g' and states that VACODIR SA is the official distributor in Uruguay. A 'CONTINUAR LEYENDO' link is provided. Below this, a section titled 'Impresión 3D de alta velocidad' begins with text about the popularity of high-speed 3D FDM printing, mentioning printers like Elegoo Neptune serie 4 and Ankermake M5. A WhatsApp chat icon is visible on the left side of the page.

VACODIR

INICIO EMPRESA ▼ TIENDA ▼

SOPORTE BLOG CONTACTO

Filamento para impresora 3D eSUN ePVA (500g)

Precios en Dólares Americanos.

eSUN PVA soluble en agua: presentacion de 500g

VACODIR SA es el único distribuidor oficial de eSUN en Uruguay

[CONTINUAR LEYENDO](#)

Impresión 3D de alta velocidad

Recientemente, el concepto de impresión 3D FDM de alta velocidad ha adquirido mucha popularidad gracias al

amiento de las impresoras como las Elegoo Neptune serie 4, la Ankermake M5, las...

[CONTINUAR LEYENDO](#)

Figura 11. Captura de pantalla de proveedora local de filamentos

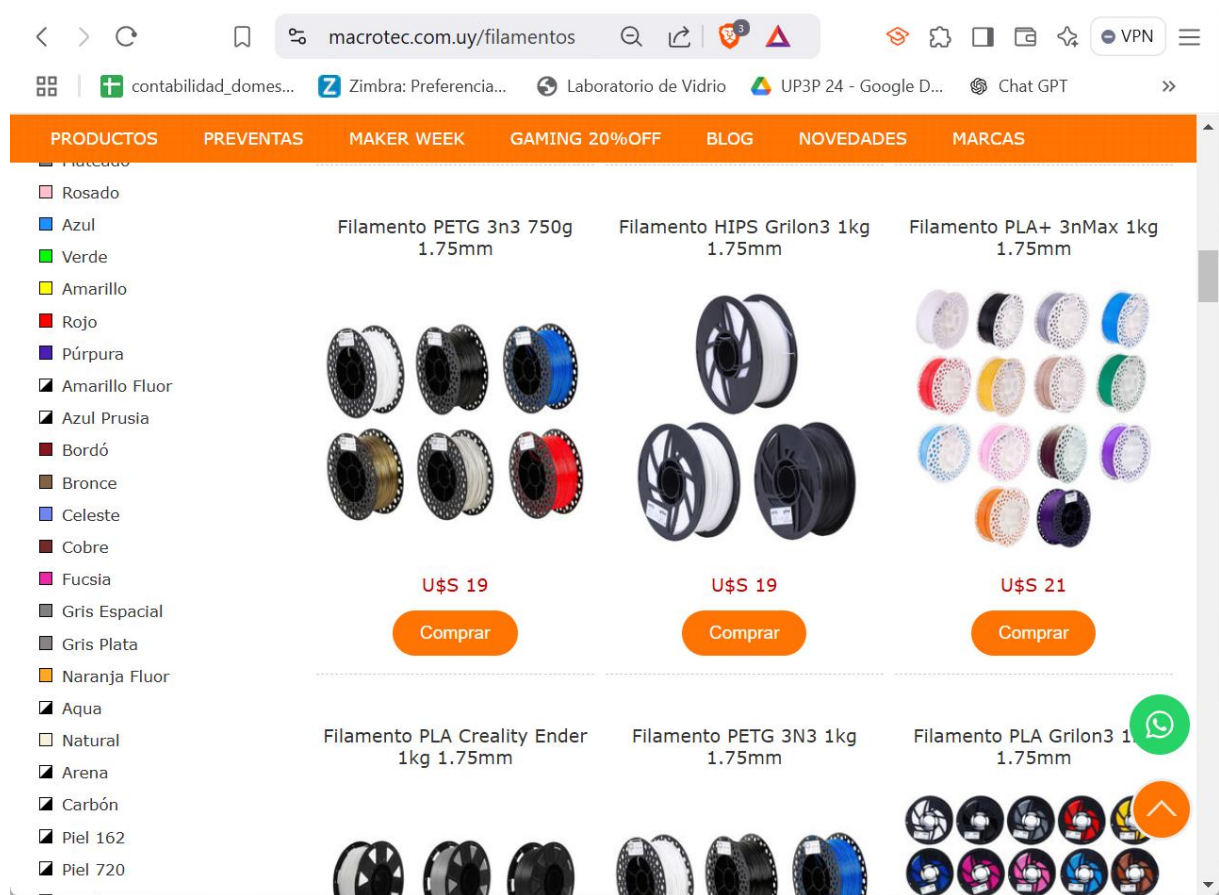


Figura 12. Captura de pantalla de proveedora local de filamentos. Especificaciones HIPS

PRODUCTOS

PREVENTAS

MAKER WEEK

GAMING 20%OFF

BLOG

NOVEDADES

MARCAS

Proyectores

Computadoras y Laptops

Informática (Accesorios)

Parlantes

Reproductores Multimedia

Criptomonedas

Ofertas Especiales

Filamento del Mes

Black Friday

PlayStation Promo Navidad

Logitech Navidad

Liquidación Gaming 20% off

Sonoff Nuevos Productos

Preventa K2 Plus y K2 Plus Combo

Ofertas



- Material de alto impacto (semi ingeniería) de los mas simples de usar.
- Acabado 100% opaco en impresiones.
- Lijable y alisable (con D-Limoneno).
- El mas económico de la gama.

Las piezas impresas en filamento HIPS de Grilon3 poseen propiedades similares a las del ABS, con mayor facilidad de uso y acabado totalmente opaco. Se puede lijar y pintar.

Es soluble en D-limoneno, propiedad que lo hace apto para la impresión de estructuras de soporte de otros materiales si se dispone de una impresora 3D de doble extrusor.

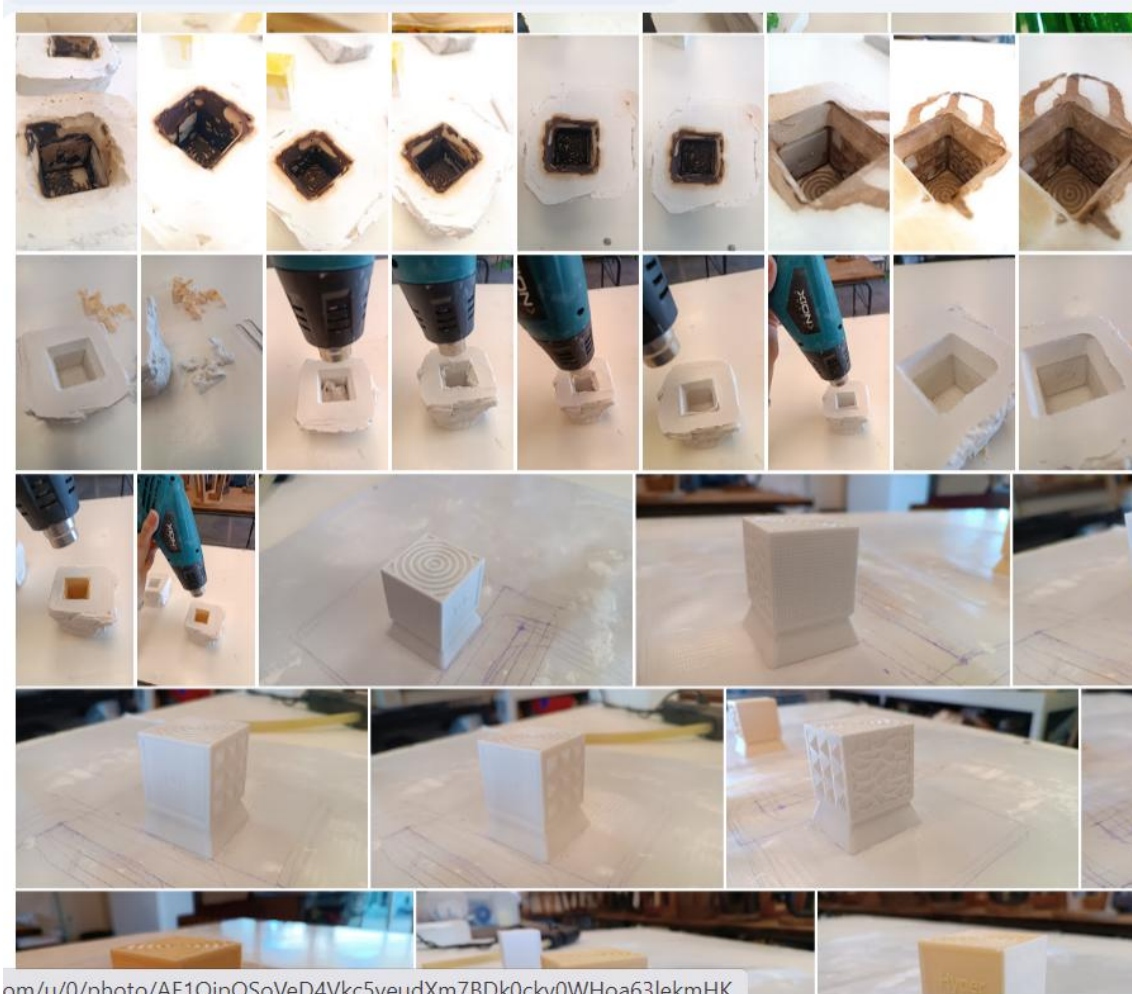
El resultado es excelente, ya que no se precisará de alicates, lijás ni ninguna otra herramienta de modo que la pieza resultante estará libre de impurezas y sobre todo, libre de marcas de manipulado, ya que luego de unas 24hs de emulsión en D-limoneno*, el HIPS utilizado como soporte, quedará completamente retirado de la pieza original.

Diámetro:	1.75 mm
Metros x Kg:	403,6 m
Tolerancia de diámetro:	+/- 0.03 mm
Temperatura extrusor:	235 / 245 °C
Temperatura plataforma (cama):	75 / 85 °C
Densidad:	1.04 grs/cm3
Adhesión:	100% adh. fuerte





Figura 33. *Conjunto de fotografías detalladas de los resultados de los ensayos de laboratorio*
Figura 32. *Conjunto de fotografías del proceso de los ensayos de laboratorio*



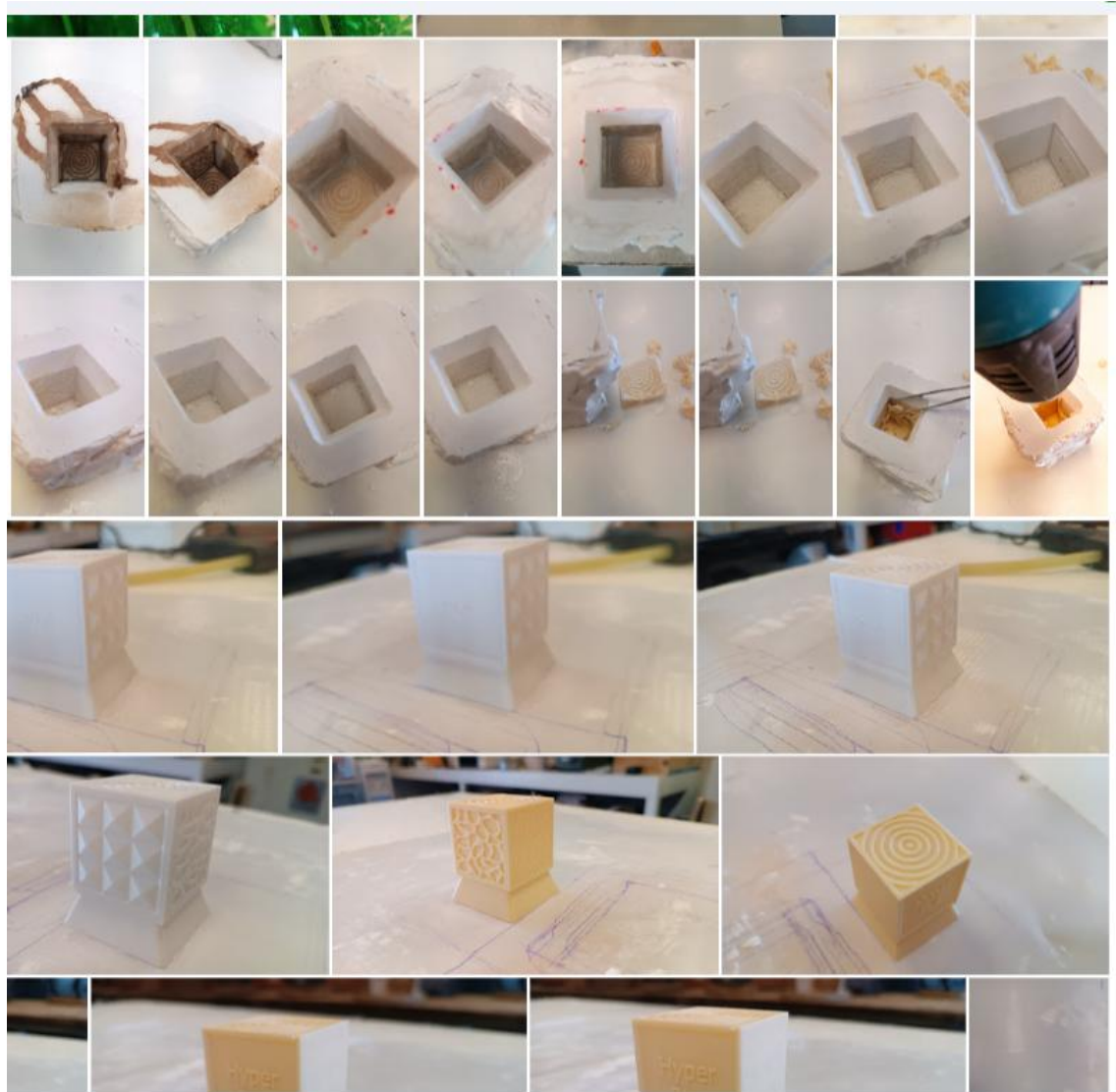
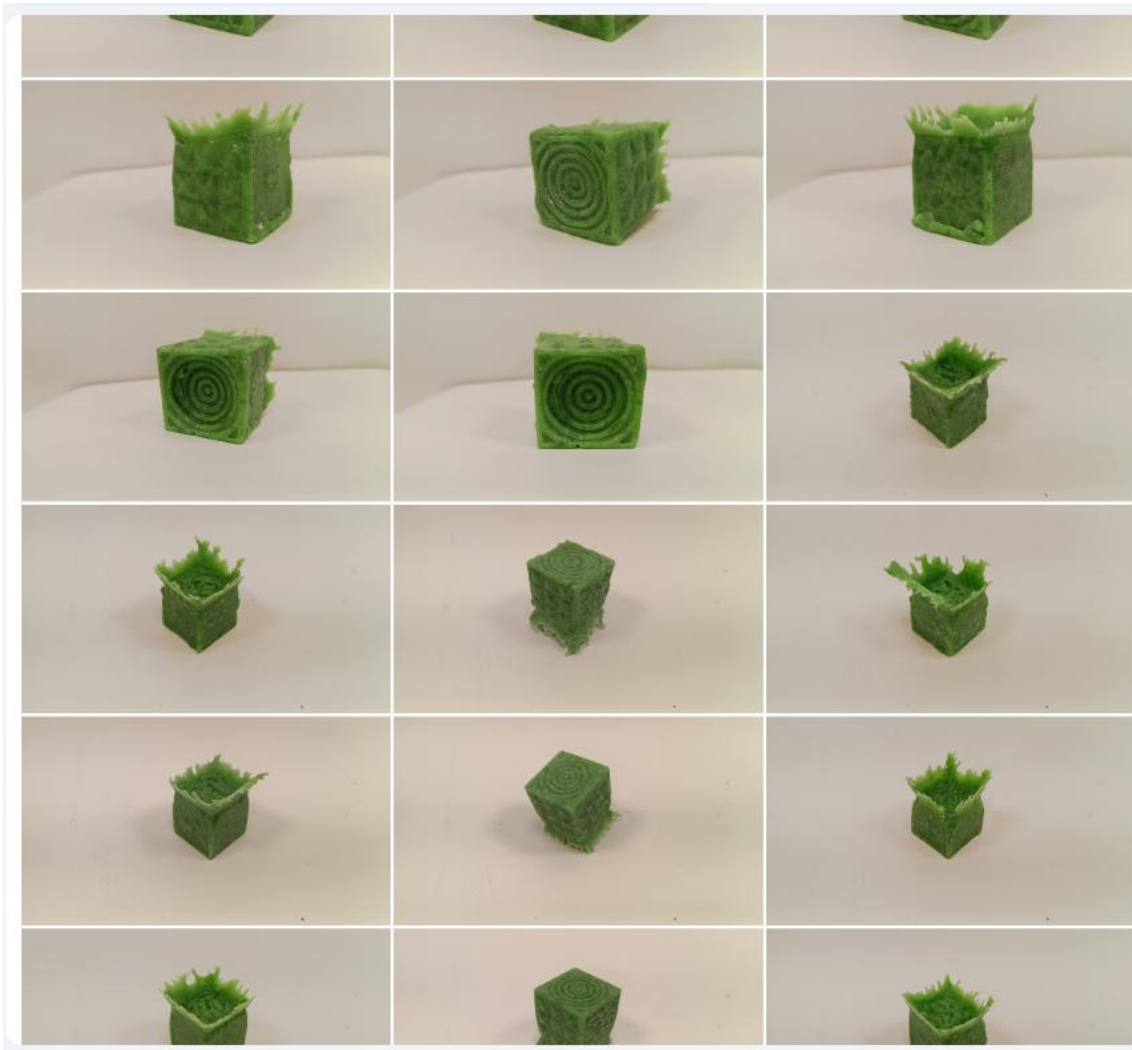
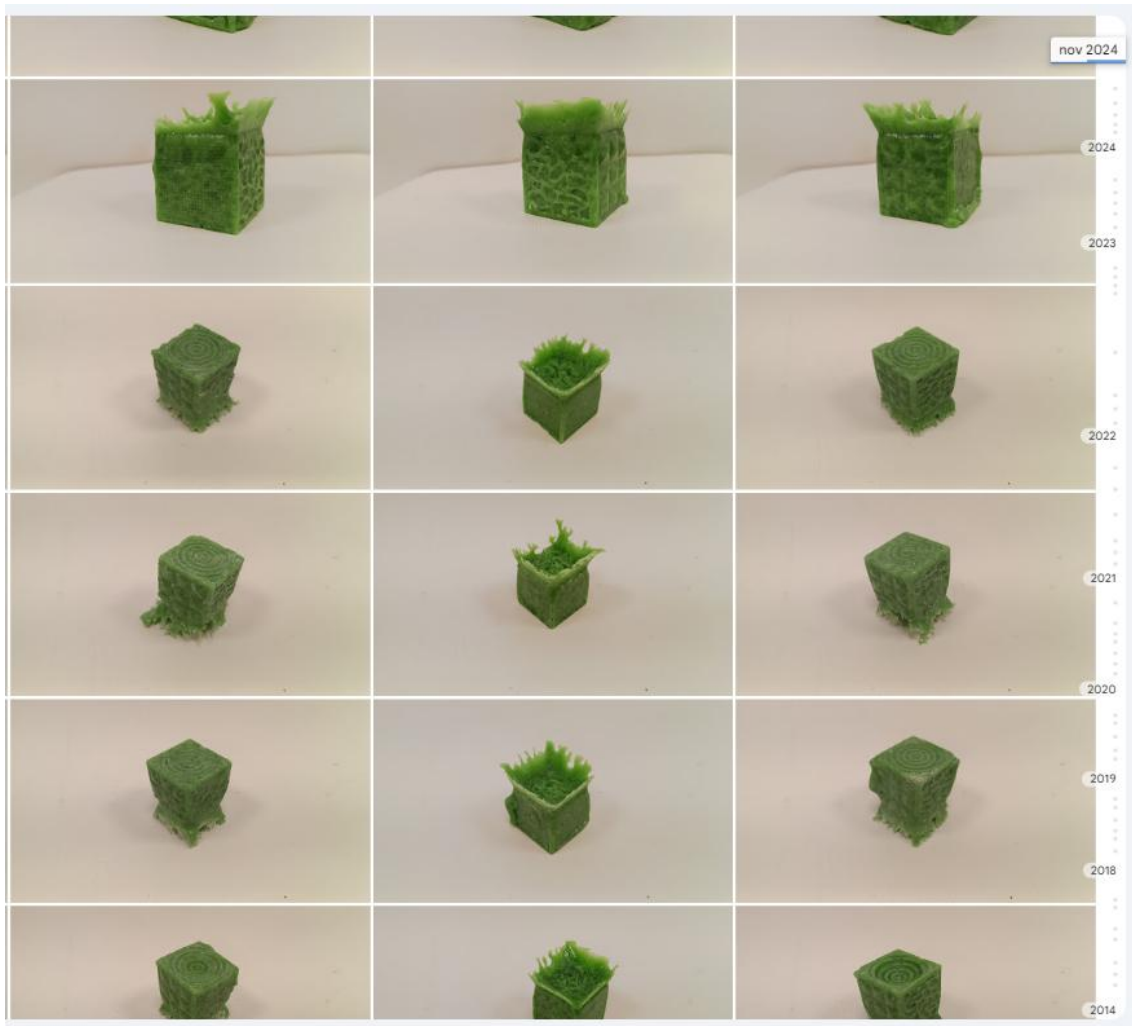


Figura 33. *Conjunto de fotografías detalladas de los resultados de los ensayos de laboratorio*





Índice de siglas y acrónimos

A

ABS: Acrilonitrilo Butadieno Estireno

ASTM: American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales)

C

CNC: Control Numérico Computarizado

E

EN: Normas Europeas

EUCD: Escuela Universitaria Centro de Diseño

F

FADU: Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo

I

ISO: International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización)

P

PET: Tereftalato de Polietileno

PETG: Tereftalato de Polietileno Glicol

PLA: Ácido Poliláctico

PC: Policarbonato

PTT: Tereftalato de Polibutileno

R

REACH: Registration, Evaluation, Authorization, and Restriction of Chemicals (Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias Químicas)

RoHS: Restriction of Hazardous Substances Directive (Directiva sobre la Restricción de Sustancias Peligrosas)

T

TPC: Copoliéster Termoplástico

TPE: Elastómero Termoplástico

TPN: Poliamida Termoplástica

U

UDELAR: Universidad de la República

UE: Unión Europea

UNE: Normas Españolas (Agencia Española de Normalización)

UNE-EN ISO/ASTM: Norma Europea adaptada de ISO y ASTM