



MÁSTER EN INGENIERÍA EN INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis y optimización del proceso de diseño y producción de piezas de joyería por fundición a la cera perdida mediante la utilización de tecnologías de impresión 3D

Autor: Sara Ruiz Asurmendi

Director: Dr. Mariano Jiménez Calzado

Madrid, Agosto 2024

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

**ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO Y PRODUCCIÓN DE
PIEZAS DE JOYERÍA PORFUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA MEDIANTE LA
UTILIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico
2023/24 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros
efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de
otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Sara Ruiz Asurmendi - Fecha: 24/ 08/2024



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado - Fecha: 24 /08/2024



MÁSTER EN INGENIERÍA EN INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis y optimización del proceso de diseño y producción de piezas de joyería por fundición a la cera perdida mediante la utilización de tecnologías de impresión 3D

Autor: Sara Ruiz Asurmendi

Director: Dr. Mariano Jiménez Calzado

Madrid, Agosto 2024

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO Y PRODUCCIÓN DE PIEZAS DE JOYERÍA POR FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D

Autora: Ruiz Asurmendi, Sara.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Análisis detallado de todas las fases que intervienen en el ciclo de desarrollo de un producto de joyería mediante impresión 3D en SLA (estereolitografía) y fabricación a la cera perdida. Se realiza un estudio exhaustivo de resinas calcinables y rampas de fundición. Posteriormente estas piezas se fabrican en un laboratorio de impresión 3D y de fundición.

Palabras clave: Fabricación aditiva, Fundición a la cera perdida, Estereolitografía, Piezas de joyería, Análisis

1. Introducción

El mundo de la joyería está en constante expansión, y apoyado en la investigación y los avances de la impresión 3D, este crecimiento es imparable. Con las infinitas opciones de fabricación y diseño de la fabricación aditiva, fabricar objetos que antes se creían imposibles es ahora una opción. En este proyecto convergen técnicas de fabricación aditiva por estereolitografía con fundición a la cera perdida. Mediante el empleo de estas dos técnicas de fabricación se ha conseguido elaborar piezas de joyería con el objetivo de estudiar su optimización y su viabilidad.

2. Definición del Proyecto

El proyecto ha seguido el flujo de trabajo del siguiente esquema. En él se explican las fases de producción del proyecto, con una perspectiva de mejora continua, iteraciones y ensayos para llevar a cabo el proceso de investigación.

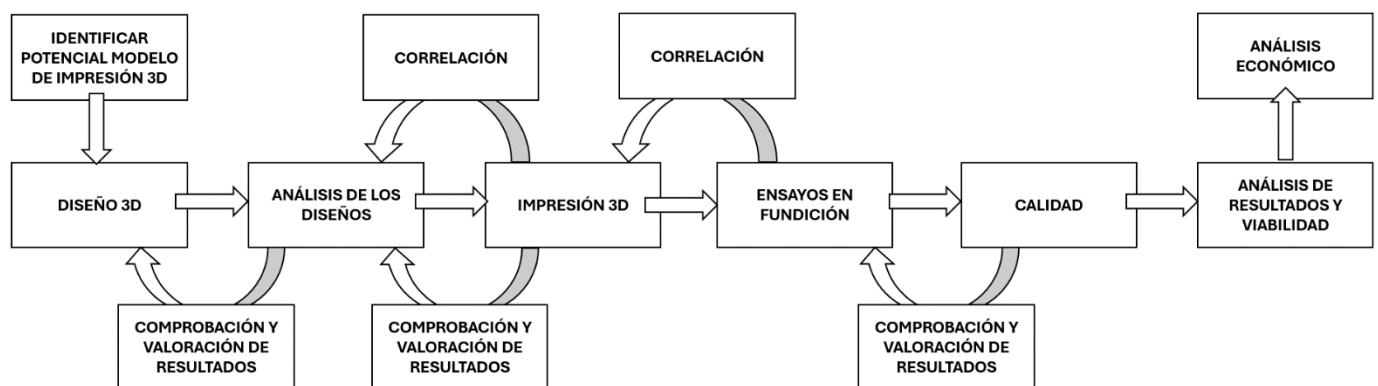


Figura 1: Flujo de trabajo del proyecto. (Elaboración propia)

El proyecto está dividido en dos fases clave, la fabricación por impresión 3D y la fabricación por fundición a la cera perdida.

La impresión 3D en SLA es un pilar fundamental en el desarrollo tecnológico, debido a la alta adaptabilidad en diferentes campos, desde la producción de piezas singulares, a la creación de prototipos precisos, dispositivos médicos personalizados y componentes detallados en la industria aeroespacial, permitiendo avances significativos en calidad, precisión y eficiencia. Es la tecnología más adecuada si el objetivo es llegar a piezas de alta precisión y buen acabado.

La fundición a la cera perdida es un proceso de fabricación con una extensa historia y desarrollo, que actualmente sigue en evolución, perfeccionado por la industria para llegar a límites antes considerados imposibles permitiendo la creación de componentes complejos y detallados en sectores como la joyería, la aeronáutica y la manufactura de alta precisión.



Figura 2: Modelo de anillos en impresión 3D en PreForm (Elaboración propia)

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Las herramientas empleadas se vuelven a caracterizar por corresponder a dos áreas: fabricación aditiva y fabricación por fundición.

En fabricación aditiva se ha utilizado la impresora Form3, con las resinas Castable Wax y Castable Wax 40; y software de preparación para la impresión en SLA.

En la fundición se han recurrido a una variedad de recursos amplia, comentados a lo largo del proyecto. Los más reseñables son un horno de mufla, un horno de fundición por inducción y una fundidora de microfusión.

Además se ha incluido un estudio de defectología en el que se ha empleado una máquina de visión de medición manual; y en post acabados una sierra de cinta vertical.

El acceso a estos recursos ha sido fundamental para poder llevar a cabo el proyecto.

4. Resultados

El resultado de este proyecto ha sido la elaboración de piezas de joyería de alta precisión, cumpliendo los criterios de diseño requeridos.

En la fabricación por SLA los resultados fueron positivos, con un 96,6% de éxito. Con la maquinaria empleada se llegaron a resoluciones de hasta 25 μm . Todas las piezas impresas cumplieron los criterios de diseño.

Los ensayos un 75% de las piezas se llegaron a fundir adecuadamente. En el estudio de calidad del producto final, un 38% cumple los requisitos finales de acabado superficial, dificultad, tamaño de orificios y precisión.

El gradiente de temperaturas en la penetración del metal en el molde es lo suficientemente elevado como para influir en el proceso de solidificación del metal, dando lugar a llenados incompletos. Esto afecta de tal manera que el metal antes de llenar la cavidad, se ha solidificado. Los esfuerzos de expansión dieron lugar a defectos superficiales. Por último, el método de colada no es el adecuado para piezas de alta complejidad.



Figura 3: Detalles de alta resolución e imágenes de anillos fundidos (Elaboración propia)

5. Conclusiones

El proceso de impresión 3D es idóneo para la fabricación de piezas de joyería de geometría compleja en estereolitografía. Es un campo de investigación con buenos resultados y constante innovación.

El proceso de fundición no ha sido el esperado, con una baja tasa de éxito en las piezas finales. Este método no es el idóneo para la fabricación de piezas con geometría compleja. No son compatibles. Para obtener mejores resultados, la fundición por colada por centrifugación hubiera sido posiblemente la mejor alternativa.

Con un método de fundición adecuado es posible llegar a la precisión y tolerancia superficial de los modelos 3D.

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF THE DESIGN AND PRODUCTION PROCESS OF JEWELRY PIECES BY LOST WAX CASTING USING 3D PRINTING TECHNOLOGIES

Author: Ruiz Asurmendi, Sara

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

Detailed analysis of all the phases involved in the development cycle of a jewellery product using 3D printing in SLA (stereolithography) and lost wax manufacturing. An exhaustive study of castable resins and casting ramps is carried out. These parts are manufactured in a 3D printer and casting laboratory.

Keywords: Additive manufacturing, Lost wax casting, Stereolithography, Jewelry pieces, Analysis

1. Introduction

The world of jewelry is constantly expanding, and supported by research and advances in 3D printing, this growth is unstoppable. With the endless manufacturing and design options of additive manufacturing, making objects once thought impossible is now an option. In this project, additive manufacturing techniques using stereolithography and lost wax casting converge. By using these two manufacturing techniques, it has been possible to create jewelry pieces with the aim of studying their optimization and viability.

2. Project Definition

The project has followed the workflow of the following diagram. It explains the production phases of the project, with a perspective of continuous improvement, iterations and tests to carry out the research process.

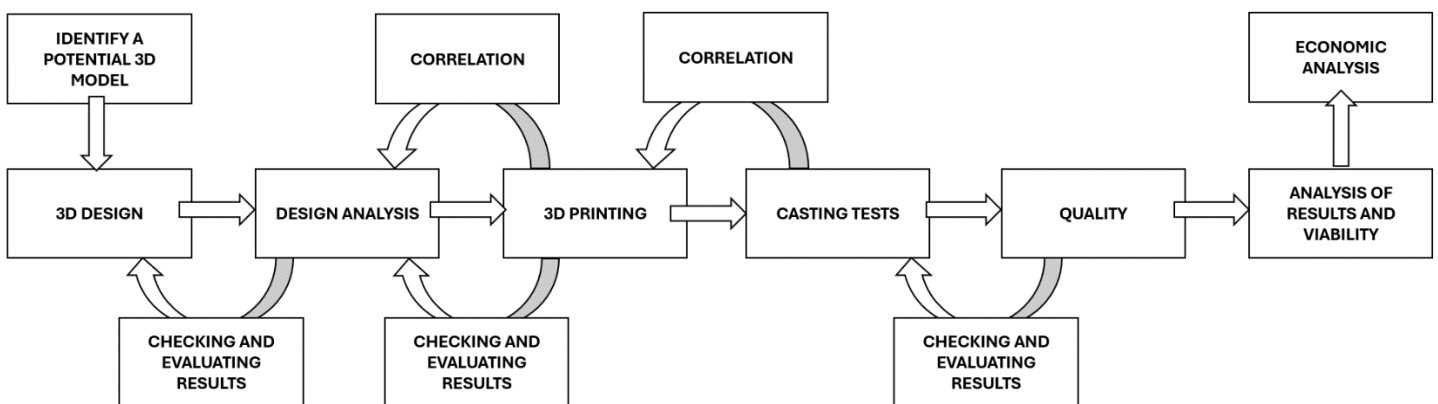


Figure 1: Project workflow. (Own source)

The project is divided into two key phases, manufacturing by 3D printing and manufacturing by lost wax casting.

3D printing in SLA is a fundamental pillar in technological development, due to the high adaptability in different fields, from the production of unique parts, to the creation of precise prototypes, personalized medical devices and detailed components in the aerospace industry, allowing significant advances in quality, precision and efficiency. It is the most suitable technology if the objective is to achieve high precision and good finish parts.

Lost wax casting is a manufacturing process with a long history and development, which is still evolving today, perfected by the industry to reach limits previously considered impossible, allowing the creation of complex and detailed components in sectors such as jewelry, aeronautics and high-precision manufacturing.



Figure 2: 3D printed ring model in PreForm (Own source)

3. Description of the model/system/tool

The tools used are correlated to the two main fields of this project: additive manufacturing and casting manufacturing.

In additive manufacturing, Form3 printer was used, using Castable Wax and Castable Wax 40 resins; and a preparation software for SLA printing.

In casting, a wide variety of resources were used, discussed throughout the project. The most notable are a muffle furnace, an induction casting furnace and a microfusion foundry.

In addition, a defectology study was included in which a manual measurement vision machine was used; and in the step of post-finishing, a vertical band saw was employed.

Access to these resources has been essential to be able to carry out the project.

4. Results

The outcome of this project has been the production of high-precision jewellery pieces, meeting the required design criteria.

In SLA manufacturing, the results were positive, with a 96.6% success rate. With the machinery used, resolutions of up to 25 μm were achieved. All printed pieces met the design criteria.

In the tests, 75% of the pieces were properly cast. The quality study of the final product showed that 38% met the final requirements of surface finish, difficulty, hole size and precision.

The temperature gradient in the penetration of metal into the mould is high enough to influence the metal solidification process, leading to incomplete fillings. This affects the metal to such an extent that before filling the cavity, it has solidified. The expansion forces led to surface defects. To conclude, the casting method is not suitable for highly complex pieces.



Figure 3: High-resolution details and images of cast rings (Own source)

5. Conclusions

The 3D printing process is ideal for the manufacture of jewellery pieces with complex geometry in stereolithography. It is a field of research with good results and constant innovation.

The casting process has not been as expected, with a low success rate in the final pieces. This method is not ideal for the manufacture of pieces with complex geometry. They are not compatible. To obtain better results, centrifugal casting would possibly have been the best alternative.

With an appropriate casting method it is possible to achieve the precision and surface tolerance of 3D models.

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	IMPRESIÓN EN SLA Y FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA.....	1
1.2	MOTIVACIÓN DEL PROYECTO.....	2
1.3	OBJETIVOS DEL PROYECTO	3
1.4	ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLES (ODS) 4	
1.5	METODOLOGÍA DE TRABAJO: METODOLOGÍAS ÁGIL Y LEAN.....	5
2.	CONTEXTO HISTÓRICO DEL PROYECTO	7
2.1	HISTORIA DE LA FABRICACIÓN DE JOYERÍA	7
2.2	HISTORIA DE LA FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA.....	17
2.3	HISTORIA DE LA IMPRESIÓN 3D EN JOYERÍA	21
3.	TÉCNICAS DE FABRICACIÓN EN JOYERÍA.....	25
3.1	TÉCNICAS DE IMPRESIÓN 3D EN JOYERÍA	25
3.2	IMPRESIÓN EN ESTEREOLITOGRAFÍA	34
3.2.1	METODOLOGÍA DE LA IMPRESIÓN EN SLA EN EL PROYECTO	34
3.2.2	MARCO TEÓRICO DE SLA	35
3.2.2.1	SLA, DLP Y LCD.....	36
3.2.2.2	BOTTOM-UP Y TOP-DOWN.....	36
3.2.2.3	CARACTERÍSTICAS DEL SLA.....	38
3.2.3	IMPRESORA Y RESINAS EMPLEADAS EN EL PROYECTO	44
3.2.3.1	LA IMPRESORA: FORM 3.....	44
3.2.3.2	LAS RESINAS	50
3.3	FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA	55
3.3.1	METODOLOGÍA DE LA FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA	56

3.3.2	PASO 1: PREPARACIÓN DE LOS MODELOS DE CERA.....	59
3.3.3	PASO 2: ÁRBOL DE CERA.....	60
3.3.4	PASO 3: REVESTIMIENTO CERÁMICO Y CILINDROS DE MICROFUSIÓN 62	
3.3.5	PASO 4: BATIDORA DE MICROFUSIÓN POR ASPIRACIÓN: BOMBA DE VACÍO 67	
3.3.6	PASO 5: HORNEADO Y CALCINADO DE LA RESINA.....	69
3.3.7	PASO 6: FUNDICIÓN DEL METAL: LATÓN	71
3.3.8	PASO 7: COLADO	75
3.3.9	PROCESOS DE ACABADO	80
4.	CRITERIOS DE DISEÑO.....	82
4.1	LA PIEZA SELECCIONADA: ANILLOS.....	83
4.1.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS ANILLOS	84
4.1.2	REQUISITOS DE LAS PIEZAS ACABADAS.....	88
4.2	PARÁMETROS.....	89
4.2.1	PARÁMETROS GEOMÉTRICOS	89
4.2.2	PARÁMETROS MECÁNICOS	92
4.2.3	VARIABLES DE IMPRESIÓN 3D Y CONSTANTES	93
4.2.4	PARÁMETROS GENERALES	93
5.	MODELOS SELECCIONADOS.....	94
6.	ENSAYOS EN IMPRESIÓN 3D.....	102
6.1	PRIMERA IMPRESIÓN	102
6.2	CONCLUSIONES DE LA PRIMERA IMPRESIÓN.....	103
6.3	SEGUNDA IMPRESIÓN	105
6.4	CONCLUSIONES DE LA SEGUNDA IMPRESIÓN	106
6.5	TERCERA IMPRESIÓN	108
6.6	CONCLUSIONES DE LA TERCERA IMPRESIÓN	109
6.7	CUARTA IMPRESIÓN	110

6.8	CONCLUSIONES DE LA CUARTA IMPRESIÓN	111
6.9	QUINTA IMPRESIÓN	112
6.10	CONCLUSIONES DE LA QUINTA IMPRESIÓN	113
6.11	SEXTA IMPRESIÓN.....	114
6.12	CONCLUSIONES DE LA SEXTA IMPRESIÓN.....	115
6.13	SÉPTIMA Y ÚLTIMA IMPRESIÓN.....	117
6.14	CONCLUSIONES DE LA SÉPTIMA IMPRESIÓN	118
6.15	CONCLUSIONES Y ANÁLISIS FINALES DE SLA	120
7.	ENSAYOS EN FUNDICIÓN.....	126
7.1	PRIMERA SERIE FUNDICIÓN	127
7.2	SEGUNDA SERIE DE FUNDICIÓN	130
7.3	TERCERA SERIE DE FUNDICIÓN	133
7.4	CUARTA SERIE DE FUNDICIÓN	138
7.5	QUINTA SERIE DE FUNDICIÓN	141
7.6	SERIE EXTRA DE FUNDICIÓN.....	144
7.7	CONCLUSIONES FINALES DE FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA	145
7.7.1	DISCUSIÓN DE ERRORES Y ELABORACIÓN DE LA HIPÓTESIS	145
7.7.2	PROPUESTAS PARA ABORDAR EL PROYECTO CON ÉXITO	148
7.7.3	ÚLTIMAS CONSIDERACIONES: METALES, ÉXITO Y REUTILIZACIÓN	150
8.	DEFECTOLOGÍA.....	154
8.1	TIPOS DE DEFECTOLOGÍA ENCONTRADOS EN EL PROYECTO	154
8.2	MAQUINARIA EMPLEADA.....	155
8.3	DEFECTOS Y DETALLES EN EL ÁRBOL 0	156
8.4	DEFECTOS Y DETALLES EN EL ÁRBOL 1	157
8.5	DEFECTOS Y DETALLES EN EL ÁRBOL 2	158
8.6	DEFECTOS Y DETALLES EN EL ÁRBOL 3	159
8.7	DEFECTOS Y DETALLES EN EL ÁRBOL 4	160
8.8	DEFECTOS Y DETALLES EN EL ÁRBOL 5	161

8.9	DEFECTOS Y DETALLES DE OTROS ÁRBOLES	162
8.10	CONCLUSIONES SOBRE DEFECTOLOGÍA.....	163
8.11	ANILLOS TERMINADOS	165
9.	TÉCNICAS DE ACABADO.....	166
10.	ANÁLISIS ECONÓMICO	168
10.1	COSTE DE IMPRESIÓN 3D	168
10.2	COSTE DE FUNDICIÓN	179
10.3	CONCLUSIONES DE ANÁLISIS ECONÓMICO.....	184
11.	EXPLORACIÓN SOSTENIBLE	187
12.	CONCLUSIONES	191
13.	PROPUESTAS PARA TRABAJOS FUTUROS	193
	BIBLIOGRAFÍA	195
	ANEXOS.....	212
	ANEXO 1.....	212
	ANEXO 2.....	214
	ANEXO 3.....	216
	ANEXO 4.....	218
	ANEXO 5.....	219
	ANEXO 6.....	220
	ANEXO 7.....	222
	ANEXO 8.....	223
	ANEXO 9.....	224
	ANEXO 9.....	226

ÍNDICE DE IMÁGENES

IMAGEN 1: PIEZA DE TOCADO SUMERIO DE LA REINA PU-ABI. PERIODO SUMERIO. HACIA 2600-2500 A.C. (HEADRESS SUMERIAN EARLY DYNASTIC IIIA THE METROPOLITAN MUSEUM OF ART, S. F.).....	8
IMAGEN 2: PECTORAL DE HALCÓN DE TUTANKAMÓN REALIZADO CON LA TÉCNICA DEL CLOISONNÉ. DINASTÍA 18ª TARDÍA. REINO DE TUTANKAMÓN (TUTANKHAMUN), HACIA 1332-1323 A.C. (MUSEUM EGYPT, 2024).....	10
IMAGEN 3: HOJA DE ORO. PERIODO MINOICO. HACIA EL 2300–2100 A. C. (GOLD LEAF MINOAN EARLY MINOAN II–III THE METROPOLITAN MUSEUM OF ART, S. F.).....	11
IMAGEN 4: LA MÁSCARA DE AGAMENÓN. PERIODO MINOICO. HACIA 1550–1500 A.C. (THE MASK OF AGAMEMNON: AN EXAMPLE OF ELECTROFORMED REPRODUCTION OF ARTWORKS MADE BY E. GILLIÉRON IN THE EARLY TWENTIETH CENTURY - THE METROPOLITAN MUSEUM OF ART, S. F.)	11
IMAGEN 5: FÍBULA DE LA TUMBA DE LICTOR EN VETULONIA. CIVILIZACIÓN ETRUSCA. HACIA 700 A.C. (VETULONIA, TOMB OF THE LICTOR, FIBULA - LIVIUS, S. F.).....	12
IMAGEN 6: PENDIENTE DE NIKÉ EN CARRUAJE TIRADO POR DOS CABALLOS. GRECIA CLÁSICA. HACIA 350-325 A.C. (EARRING WITH NIKE DRIVING A TWO-HORSE CHARIOT – WORKS – MUSEUM OF FINE ARTS, BOSTON, S. F.)	12
IMAGEN 7: FÍBULAS AGUILEÑAS DE ALOVERA. TEUTÓNICO. VISIGODOS. PENÍNSULA IBÉRICA. SIGLO V (FÍBULA AQUILIFORME DE ALOVERA - GOOGLE ARTS & CULTURE, S. F.)	14
IMAGEN 8: BROCHE PARA HOMBROS DE SUTTON HOO. TEUTÓNICO. VIKINGO. PRINCIPIOS DEL SIGLO VII (SADURNÍ, 2023).....	14
IMAGEN 9: CABALLOS DE SAN MARCOS. VENECIA. SIGLO IV A.C. (LOS CABALLOS DE LA BASÍLICA DE SAN MARCOS, 2022).....	18
IMAGEN 10: FRAGMENTO DEL GANCHO "THE DUNAVERNY FLESH HOOK". SIGLO IX. (FLESH-HOOK, S. F.) 18	
IMAGEN 11: DIAGRAMA DE FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA QUIMBAYA. (ECHAVARRÍA, S. F.)	18
IMAGEN 12: DIFERENTES PROPUESTAS DE RELLENOS DE UNA PIEZA IMPRESA POR FDM. (WHAT IS FDM (FUSED DEPOSITION MODELING) 3D PRINTING?, PROTO LABS NETWORK, S. F.).....	28
IMAGEN 13: PIEZA RECIÉN SACADA DEL TANQUE DE POLVO TRAS EL SINTETIZADO. WHAT IS SLS 3D PRINTING?, PROTO LABS NETWORK. (S. F.). WHAT IS SLS 3D PRINTING? PROTO LABS NETWORK. PROTO LABS NETWORK. HTTPS://WWW.HUBS.COM/KNOWLEDGE-BASE/WHAT-IS-SLS-3D-PRINTING/ ...	28
IMAGEN 14: FIGURA FABRICADA CON POLYJET. SE APRECIA EL CAMBIO DE SUPERFICIE BRILLANTE A MATE. (WHAT IS MATERIAL JETTING 3D PRINTING?, PROTO LABS NETWORK, S. F.).....	29
IMAGEN 15: PIEZA IMPRESA EN SLA RECIÉN SALIDA DE LA CUBA. (P & P, 2022).....	30
IMAGEN 16: PIEZA OBTENIDA DE IMPRESIÓN DLP. (PRODUCTOS PARA IMPRESIÓN 3D E IMAGEN DIRECTA TI.COM, S. F.).....	30
IMAGEN 17: ENGRANAJE FABRICADO CON TECNOLOGÍA SLM. (ZEAL 3D SERVICES, 2024)	31
IMAGEN 18: IMPRESIÓN EN TECNOLOGÍA EBM. (THE COMPLETE GUIDE TO ELECTRON BEAM MELTING (EBM) IN 3D PRINTING, 2022).....	31

IMAGEN 19: TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D EN FOTOPOLIMERIZACIÓN EN CUBA. («3D PRINTER TECHNOLOGY: WHAT ARE THE SLA, DLP AND LCD?», 2024)	36
IMAGEN 20: ESQUEMAS DE IMPRESORAS EN SLA BOTTOM-UP Y TOP-DOWN. (CARIMA, 2021)	37
IMAGEN 21: CURADO DE UNA PIEZA POR SLA TRAS LA SUPERPOSICIÓN DE BAÑOS DE LUZ UV. ISOTROPÍA. (VALIDACIÓN DE LA ISOTROPÍA EN LA IMPRESIÓN 3D POR ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA), S. F.)	38
IMAGEN 22: ANILLOS IMPRESOS EN RESINA CALCINABLE SOBRE PLATAFORMA FORMLABS. (CASTABLE WAX RESIN, S. F.)	41
IMAGEN 23: PIEZAS DE RESINA CALCINABLE EN PLATAFORMA BOTTOM-UP FORMLABS (CASTABLE WAX 40 RESIN, S. F.)	41
IMAGEN 24: RIZADO Y SOBRECRECIMIENTO EN FOTOPOLIMERIZACIÓN. (MINEV & MINEV, 2016)	42
IMAGEN 25: SISTEMA LPU DE LA FORMLABS 3. (FORMLABS, 2019)	44
IMAGEN 26: FORMLABS FROM3. (PAQUETE BÁSICO FORM 3, S. F.).....	44
IMAGEN 27: EJEMPLO DE CÓMO COLOCAR LAS PIEZAS EN PREFORM. (ELABORACIÓN PROPIA)	46
IMAGEN 28: LLENADO DE UN TANQUE FORMLABS. (FORMLABS, 2017).....	47
IMAGEN 29: DETALLES DE LA PLACA AGITADORA DEL TANQUE. (FORMLABS, 2017).....	48
IMAGEN 30: PIEZAS DE CASTABLE WAX 40 SACADAS INMEDIATAMENTE TRAS LA IMPRESIÓN Y PIEZA EN CASTABLE WAX 40 LAVADA TRAS IMPRESIÓN. (ELABORACIÓN PROPIA)	52
IMAGEN 31: PIEZAS DE CASTABLE WAX SACADAS INMEDIATAMENTE TRAS LA IMPRESIÓN. (ELABORACIÓN PROPIA)	54
IMAGEN 32:PIEZA EN CASTABLE WAX LAVADA TRAS IMPRESIÓN Y COMPARADA CON EL MODELO ORIGINAL DE FORMLABS. (ELABORACIÓN PROPIA).....	54
IMAGEN 33: VULCANIZADO DE UN ANILLO (IMPRESIÓN 3D PARA MINORISTAS DE JOYERÍA Y FUNDICIONES, S. F.).....	55
IMAGEN 34: MOLDES COMERCIALES DE CAUCHO PARA JOYERÍA (CASTING SILICONE RUBBER CASTALDO BLUE SUPER HIGH STRENGTH - 2,27KG, S. F.)	55
IMAGEN 35: KIT DE CABEZALES DE LIJADO DE MAKERX WORX (ELABORACIÓN PROPIA)	59
IMAGEN 36: DETALLES DE MARCAS DE SOPORTES EN LA IMPRESIÓN 3D ANTES DE SER LIJADOS (ELABORACIÓN PROPIA)	59
IMAGEN 37: TIPOS DE BEBEDEROS. INCORPORADO EN EL MODELO 3D Y CON CERA DE BAJO PUNTO DE FUSIÓN. (ELABORACIÓN PROPIA).....	60
IMAGEN 38: INYECTORA DE CERA EMPLEADA EN EL LABORATORIO CHAMORRO Y MORENO S.A. (ELABORACIÓN PROPIA)	61
IMAGEN 39: TRONCOS DEL ÁRBOL DE CERA RECIÉN ELABORADOS (ELABORACIÓN PROPIA)	61
IMAGEN 40: SOLDADOR MESTRA DE PARA TALLAR DIGITAL CON ESPÁTULA DOBLE (ELABORACIÓN PROPIA)	61
IMAGEN 41: BASES DE CAUCHO PARA FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA (ELABORACIÓN PROPIA).....	61
IMAGEN 42: ÁRBOL CON PIEZAS IMPRESAS EN CASTABLE WAX INCLUIDAS Y TERMINADO (ELABORACIÓN PROPIA)	61

IMAGEN 43: REVESTIMIENTOS CERÁMICOS DE MICROFUSIÓN. SATIN CAST 20 Y ARGENTUM INVESTMENT (ELABORACIÓN PROPIA)	63
IMAGEN 44: MÉTODO DE USO DEL SATIN CAST 20 (SATIN CAST 20 / KERRCAST 2000 DIRECTIONS FOR USE, S. F.).....	63
IMAGEN 45: FORMULACIÓN DE REVESTIMIENTO RANSOM & RANDOLPH ARGENTUM SEGÚN EL VOLUMEN DEL CILINDRO Y EL TIPO DE PIEZA (RANSOM & RANDOLPH ARGENTUM INVESTMENTS, S. F.)	65
IMAGEN 46: CILINDRO DE MICROFUSIÓN CON EL ÁRBOL INTRODUCIDO (ELABORACIÓN PROPIA).....	66
IMAGEN 47: CILINDRO DE MICROFUSIÓN CON UN ÁRBOL DE CERA (ELABORACIÓN PROPIA).....	66
IMAGEN 48: CÁMARAS DE COLADO DE REVESTIMIENTO DE LA BATIDORA (ELABORACIÓN PROPIA)	67
IMAGEN 49: ELEMENTOS DE LA BATIDORA (ELABORACIÓN PROPIA).....	67
IMAGEN 50: COLADO DEL REVESTIMIENTO (ELABORACIÓN PROPIA).....	68
IMAGEN 51: TANQUE DE AGUA DESIONIZADA DE LA BATIDORA (ELABORACIÓN PROPIA).....	68
IMAGEN 52: CILINDROS EN PROCESO DE SECADO (ELABORACIÓN PROPIA)	68
IMAGEN 53: IMAGEN DEL BEBEDERO DEL MOLDE FRAGUADO (ELABORACIÓN PROPIA).....	69
IMAGEN 54: CILINDROS DENTRO DEL HORNO MUFLA PARA SER COCIDOS (ELABORACIÓN PROPIA)	70
IMAGEN 55: HORNO DE MUFLA "SHUTTLE" EMPLEADO EN EL PROYECTO (ELABORACIÓN PROPIA)	70
IMAGEN 56: DETALLE DE CENIZAS DE RESINA Y DEMÁS RESTOS EN LA BASE DEL HORNO DE MUFLA (ELABORACIÓN PROPIA)	70
IMAGEN 57: LATÓN SIN UTILIZAR PREPARADO PARA FUNDIR. (ELABORACIÓN PROPIA)	72
IMAGEN 58: PLANCHAS DE LATÓN REUTILIZADO (ELABORACIÓN PROPIA)	72
IMAGEN 59: DETALLES DE ÓXIDO DE ZINC EN UN CRISOL (ELABORACIÓN PROPIA)	73
IMAGEN 60: PARTES DEL HORNO DE FUNDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	74
IMAGEN 61: PRIMERA ETAPA DE LA COLADA: APERTURA DEL HONRNO DE MUFLA Y COLOCACIÓN EN FUNDIDORA DE MICROFUSIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	76
IMAGEN 62: CILINDRO VOLTEADO LISTO PARA INCORPORARLO EN LA ASPIRACIÓN. (ELABORACIÓN PROPIA)	77
IMAGEN 63: CRISOL CALENTANDO A 1100°C Y RETIRADA DEL TERMOPAR (ELABORACIÓN PROPIA)	77
IMAGEN 64: COLADO DEL LATÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	78
IMAGEN 65: ENFRIAMIENTO DEL ÁRBOL DE METAL. (ELABORACIÓN PROPIA)	78
IMAGEN 66: DESVESTIMIENTO, EN LA PRIMERA FOTO SE APRECIA CÓMO LA PIEZA NO SE HA INTRODUCIDO. EN LA SEGUNDA EL REVESTIMIENTO SE DESHACE NADA MÁS TOCAR EL AGUA DEBIDO AL GRADIENTE DE TEMPERATURAS (ELABORACIÓN PROPIA)	79
IMAGEN 67: OBTENCIÓN DEL ÁRBOL DE LATÓN. (ELABORACIÓN PROPIA).....	79
IMAGEN 68: DISEÑO DE PIEZAS DE JOYERÍA (MÁSTER EN FABRICACIÓN Y DISEÑO DE JOYAS ESCUELA ARTESANÍA, 2023).....	82
IMAGEN 69: DISEÑO DE PIEZAS MEDIANTE 3DESIGN (HOW TO CHOOSE THE BEST JEWELRY DESIGN CAD SOFTWARE, S. F.).....	83
IMAGEN 70: SIMULACIÓN DE COLADO EN UN ÁRBOL DE ANILLOS POR FLOW3D (FLOW-3D, 2016B)	84

IMAGEN 71: EJEMPLO DE OCLUSIONES DE AIRE EN UNA PIEZA. DENTRO DEL CÍRCULO NARANJA NO DEBERÍA HABER MATERIAL. (ELABORACIÓN PROPIA).....	86
IMAGEN 72: SIMULACIÓN DE COLADO CENTRIFUGADO DE FABRICACIÓN DE PIEZAS DE JOYERÍA POR FLOW3D (FLOW-3D, 2016A).....	87
IMAGEN 73: EJEMPLO DE PARÁMETROS EN UN ANILLO (ELABORACIÓN PROPIA)	91
IMAGEN 74: PEQUEÑAS POROSIDADES Y DEPOSICIONES DE METAL MAL FUNDIDO EN PIEZAS FINALES (ELABORACIÓN PROPIA)	92
IMAGEN 75: PIEZAS EN PREFORM DE LA PRIMERA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	102
IMAGEN 76: RESULTADO DE LA PRIMERA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	103
IMAGEN 77: CORRECTO POSICIONAMIENTO DE LOS SOPORTES EN LA PRIMERA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	103
IMAGEN 78: IZDA. ROTURA DE LA PIEZA DCHA. DESPRENDIMIENTO DE LOS APOYOS (ELABORACIÓN PROPIA)	104
IMAGEN 79: PIEZAS CON UNA CORRECTA IMPRESIÓN DE LA PRIMERA TIRADA (ELABORACIÓN PROPIA).....	104
IMAGEN 80:PIEZAS EN PREFORM DE LA SEGUNDA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	105
IMAGEN 81:CORTES EN LA PIEZA (ELABORACIÓN PROPIA)	106
IMAGEN 82: DELAMINACIÓN TRAS EL LAVADO DE LA PIEZA (ELABORACIÓN PROPIA)	106
IMAGEN 83: PELADO OBSERVADO EN LA SEGUNDA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	107
IMAGEN 84: IMPRESIÓN INCOMPLETA EN LA SEGUNDA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	107
IMAGEN 85: PIEZAS REPETIDAS DE LA SEGUNDA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	107
IMAGEN 86:PIEZAS EN PREFORM DE LA TERCERA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	108
IMAGEN 87: PUNTO DE CONTACTO EN UNA PIEZA DE LA TERCERA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	109
IMAGEN 88: SOPORTES INTERNOS EN UNA PIEZA DE LA TERCERA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	109
IMAGEN 89:PIEZAS EN PREFORM DE LA CUARTA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	110
IMAGEN 90: BANDEJA CON LAS PIEZAS DE LA CUARTA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	111
IMAGEN 91: BANDEJA CON LAS PIEZAS DE LA CUARTA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	111
IMAGEN 92:PIEZAS LAVADAS DE LA CUARTA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	111
IMAGEN 93:PIEZAS EN PREFORM DE LA QUINTA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	112
IMAGEN 94: BANDEJA CON LAS PIEZAS DE LA QUINTA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	113
IMAGEN 95: PUNTOS DE CONTACTO Y DELAMINACIÓN LA QUINTA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	113
IMAGEN 96:PIEZAS EN PREFORM DE LA SEXTA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	115
IMAGEN 97:BANDEJA CON PIEZAS DE LA SEXTA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	116
IMAGEN 98: PIEZAS LAVADAS DE LA SEXTA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	116
IMAGEN 99: PIEZAS LAVADAS DE LA SEXTA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	116
IMAGEN 100: PIEZAS EN PREFORM DE LA SÉPTIMA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	118
IMAGEN 101: MODELO 17 DE LA SÉPTIMA IMPRESIÓN EN DETALLE (ELABORACIÓN PROPIA).....	119
IMAGEN 102: MODELO 4 DE LA SÉPTIMA IMPRESIÓN EN DETALLE (ELABORACIÓN PROPIA).....	119
IMAGEN 103: MODELO 6 DE LA SÉPTIMA IMPRESIÓN EN DETALLE (ELABORACIÓN PROPIA).....	119

IMAGEN 104: COMPARACIÓN DEL ALCANCE DE LA CASTABLE WAX 40 Y CASTABLE WAX (ELABORACIÓN PROPIA)	120
IMAGEN 105: COMPARACIÓN DEL ALCANCE DE LA CASTABLE WAX 40 Y CASTABLE WAX (ELABORACIÓN PROPIA)	120
IMAGEN 106: COMPARACIÓN DE SOPORTES, MODELO 4 EN LA 1ª IMPRESIÓN Y EN LA 2ª (ELABORACIÓN PROPIA)	124
IMAGEN 107: COMPARATIVA DEL MODELO 1 EN AMBAS RESINAS (ELABORACIÓN PROPIA).....	124
IMAGEN 108: COMPARATIVA DEL MODELO 16 EN AMBAS RESINAS (ELABORACIÓN PROPIA).....	125
IMAGEN 109: CLASIFICACIÓN DE ANILLOS EN CASTABLE WAX PREVIA A LA FUNDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	126
IMAGEN 110: CLASIFICACIÓN DE ANILLOS EN CASTABLE WAX 40 PREVIA A LA FUNDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	126
IMAGEN 111: ÁRBOL 0 DE CERA DE PIEZAS DEFECTUOSAS (ELABORACIÓN PROPIA).....	127
IMAGEN 112: PIEZAS OBTENIDAS EN LA PRIMERA SERIE DEL ÁRBOL 0. (ELABORACIÓN PROPIA)	128
IMAGEN 113: PIEZAS OBTENIDAS EN LA SEGUNDA SERIE DE LOS ÁRBOLES 1 Y 2. EN ORDEN DE IZQUIERDA A DERECHA EMPEZANDO POR LA ESQUINA SUPERIOR IZQUIERDA: MODELO 4, MODELO 1, MODELO 10, MODELO 1, MODELO 11 Y MODELO 4 (ELABORACIÓN PROPIA)	131
IMAGEN 114: TERCERA SERIE DE COLADO. DE IZQUIERDA A DERECHA: ÁRBOL 3, ÁRBOL 4, ÁRBOL 5 (ELABORACIÓN PROPIA)	135
IMAGEN 115: PIEZAS OBTENIDAS EN LA TERCERA SERIE DEL ÁRBOL 3. EN ORDEN DE IZQUIERDA A DERECHA: MODELO DE MUESTRA DE FORMLABS , MODELO 6, MODELO 6, MODELO 4 Y MODELO 4 (ELABORACIÓN PROPIA)	136
IMAGEN 116: PIEZAS OBTENIDAS EN LA TERCERA SERIE DEL ÁRBOL 4. EN ORDEN DE IZQUIERDA A DERECHA: MODELO 2, MODELO 2, MODELO 12 Y MODELO DESCARTADO EN LA 6ª IMPRESIÓN. (ELABORACIÓN PROPIA)	136
IMAGEN 117: PIEZAS OBTENIDAS EN LA TERCERA SERIE DEL ÁRBOL 5. EN ORDEN DE IZQUIERDA A DERECHA: MODELO 6, MODELO 15, MODELO 9 Y MODELO 7. (ELABORACIÓN PROPIA).....	136
IMAGEN 118: CUARTA SERIE DE COLADO. DE IZQUIERDA A DERECHA: ÁRBOL 6 Y ÁRBOL 7 (ELABORACIÓN PROPIA)	140
IMAGEN 119: QUINTA SERIE DE COLADO. DE IZQUIERDA A DERECHA: ÁRBOL 8 Y ÁRBOL 9 (ELABORACIÓN PROPIA)	143
IMAGEN 120: SERIE EXTRA DE COLADO. DOS ÁRBOLES DE FUNDICIÓN. (ELABORACIÓN PROPIA).....	144
IMAGEN 121: EJEMPLO DE SIMULACIÓN POR CENTRIFUGACIÓN (FLOW-3D离心铸造 FLOW SCIENCE CHINA, S. F.)	149
IMAGEN 122: EJEMPLO DE PREDICCIÓN DE POROSIDADES CON FLOW3D EN DIFERENTES BEBEDEROS. LAS ZONAS EN ROJO Y AMARILLO INDICAN NIVELES ALTOS DE POROSIDAD. (TIBERTO & KLOTZ, 2012)..	149
IMAGEN 123: MÁQUINA DE MEDICIÓN MANUAL POR VISIÓN Y LÁMPARA (ELABORACIÓN PROPIA)	155
IMAGEN 124: DETALLE DEL NUDO EN EL MODELO 3	156

IMAGEN 125: DETALLE DE LA CUERDA EN EL MODELO 3	156
IMAGEN 126: DETALLE SUPERFICIAL EN EL MODELO 2	156
IMAGEN 127: SUPERFICIE EN BRUTO DEL MODELO 2	156
IMAGEN 128: DELAMINACIÓN EN EL MODELO 2	156
IMAGEN 129: CORTES POR FALLOS EN I3D EN EL MODELO 1	156
IMAGEN 130: CORTES POR FALLOS EN IMPRESIÓN 3D EN EL MODELO 1	156
IMAGEN 131: RECHUPE EN EL MODELO 3	156
IMAGEN 132: CORTES POR FALLOS EN I3D Y SOPORTES INTERNOS EN EL MODELO 1	156
IMAGEN 133: ALCANCE DE LA FUNDICIÓN, DETALLES DE LAS CAPAS DE I3D	156
IMAGEN 134: GRIETAS EN EL MODELO 1	157
IMAGEN 135: RECHUPES Y RESTOS DE ESCORIA EN EL MODELO 1	157
IMAGEN 136: LLENADO INCOMPLETO Y OCLUSIONES DE AIRE EN EL MODELO 4	157
IMAGEN 137: DETALLE DE CUERDA Y RECHUPES EN EL MODELO 3	157
IMAGEN 138: GRIETA EN EL MODELO 4	157
IMAGEN 139: RECHUPE EN EL MODELO 1	157
IMAGEN 140: DETALLE DE LIJADO EN EL MODELO 2	157
IMAGEN 141: RECHUPE Y SOPLADURA EN EL MODELO 1	157
IMAGEN 142: MARCAS DE SOPORTES DE I3D EN MODELO 4	157
IMAGEN 143: DETALLE DE BUEN LLENADO EN EL MODELO 4	157
IMAGEN 144: SOPLADURAS EN EL MODELO 10	158
IMAGEN 145: SOPLADURAS EN EL MODELO 10	158
IMAGEN 146: SOPLADURAS EN EL MODELO 10	158
IMAGEN 147: DETALLE DE SOPORTES INTERNOS DEL MODELO 3	158
IMAGEN 148: RESTOS DE ESCORIA EN EL MODELO 11	158
IMAGEN 149: GRIETAS EN MODELO 4	158
IMAGEN 150: SUPERFICIE EN BRUTO Y RECHUPE DEL MODELO 11	158
IMAGEN 151: POROSIDADES DEL MODELO 3	158
IMAGEN 152: LÁGRIMAS CALIENTES EN MODELO 4	158
IMAGEN 153: POROSIDADES EN EL MODELO 11. DEBIDO AL COLOR, CANTIDAD Y AL TAMAÑO, SE PUEDE INTUIR QUE SE HAN PROVOCADO POR GASES INTERNOS	158
IMAGEN 154: LLENADO INCOMPLETO Y SUPERFICIE EN BRUTO EN EL MODELO 4	159
IMAGEN 155: LLENADO INCOMPLETO Y OCLUSIONES DE AIRE EN EL MODELO 6	159
IMAGEN 156: LLENADO INCOMPLETO Y OCLUSIONES DE AIRE EN EL MODELO 6	159
IMAGEN 157: DETALLES BIEN OBTENIDOS PERO LLENADO INCOMPLETO EN EL MODELO 4	159
IMAGEN 158: DEFORMACIÓN DEL METAL EN EL MODELO 6	159
IMAGEN 159: RESTOS DE ESCORIA EN EL MODELO 6	159
IMAGEN 160: DETALLE SUPERFICIAL DEL MODELO 12	160
IMAGEN 161: DETALLE SUPERFICIAL DEL MODELO 12	160

IMAGEN 162: DETALLE SUPERFICIAL DEL MODELO 12.....	160
IMAGEN 163: DETALLE SUPERFICIAL DEL MODELO 2.....	160
IMAGEN 164: CABEZA DE LA SERPIENTE DEL MODELO 2.....	160
IMAGEN 165: DETALLE SUPERFICIAL DEL MODELO 2.....	160
IMAGEN 166: ESCORIA ALOJADA EN LOS ENGARGES DEL MODELO 13.....	160
IMAGEN 167: LLENADO INCOMPLETO DEL MODELO 13	160
IMAGEN 168: LLENADO INCOMPLETO Y RECHUPES DEL MODELO 13.....	160
IMAGEN 169: DETALLES DE CAPAS EN I3D EN EL MODELO 13	160
IMAGEN 170: LÁGRIMAS CALIENTES Y GRIETAS EN EL MODELO 6.....	161
IMAGEN 171: LLENADO INCOMPLETO Y OCLUSIONES DE AIRE EN MODELO 6	161
IMAGEN 172: LLENADO INCOMPLETO DEL MODELO 7	161
IMAGEN 173: DETALLES Y ENGARGES DEL MODELO 15	161
IMAGEN 174: DETALLES Y TEXTURAS DEL MODELO 2.....	161
IMAGEN 175: OCLUSIONES DE AIRE EN EL MODELO 7	161
IMAGEN 176: POROSIDADES EN EL MODELO 9	161
IMAGEN 177: LLENADO INCOMPLETO EN EL MODELO 9.....	161
IMAGEN 178: DETALLES DE CAPAS EN I3D EN EL MODELO 15	161
IMAGEN 179: OLEAJE EN EL MODELO 7	162
IMAGEN 180: OLEAJE Y ROTURA EN EL MODELO 7.....	162
IMAGEN 181: FUSIÓN INACABADA DE DOS CUERPOS DEL MODELO 14	162
IMAGEN 182: POROSIDADES EN EL MODELO 14	162
IMAGEN 183: SUPERFICIES EN BRUTO Y POROSIDADES EN EL MODELO 14	162
IMAGEN 184: SUPERFICIES EN BRUTO Y POROSIDADES EN EL MODELO 10	162
IMAGEN 185: RECHUPE Y LIJADO SOBRE EL MODELO 11.....	162
IMAGEN 186: POROSIDADES Y RESTOS DE ESCORIA EN EL MODELO 11.....	162
IMAGEN 187: DETALLES DE SOPORTES EN EL MODELO 7.....	162
IMAGEN 188: DETALLES DE SOPORTES EN EL MODELO 7.....	162
IMAGEN 189: ANILLOS TERMINADOS SIN POSTACABADO (ELABORACIÓN PROPIA).....	165
IMAGEN 190: IMÁGENES DE LA CHORREADORA DE ARENA NORBLAST (ELABORACIÓN PROPIA).....	166
IMAGEN 191: MODELO 2. OBTENIDO CON PROTOLABS (ELABORACIÓN PROPIA).....	175
IMAGEN 192: MODELO 5. OBTENIDO CON PROTOLABS (ELABORACIÓN PROPIA).....	175
IMAGEN 193: MODELO 6. OBTENIDO CON PROTOLABS (ELABORACIÓN PROPIA).....	175
IMAGEN 194: : PRESUPUESTO DE IMPRESIÓN DEL MODELO 2 MEDIANTE PROTOLABS (ELABORACIÓN PROPIA)	175
IMAGEN 195: PRESUPUESTO DE IMPRESIÓN DEL MODELO 5 MEDIANTE PROTOLABS (ELABORACIÓN PROPIA)	176
IMAGEN 196: PRESUPUESTO DE IMPRESIÓN DEL MODELO 6 MEDIANTE PROTOLABS (ELABORACIÓN PROPIA)	176

IMAGEN 197: PRESUPUESTO DE IMPRESIÓN DEL MODELO 2 MEDIANTE IMATERIALISE (ELABORACIÓN PROPIA)	177
IMAGEN 198: PRESUPUESTO DE IMPRESIÓN DEL MODELO 5 MEDIANTE IMATERIALISE (ELABORACIÓN PROPIA)	177
IMAGEN 199: PRESUPUESTO DE IMPRESIÓN DEL MODELO 6 MEDIANTE IMATERIALISE (ELABORACIÓN PROPIA)	177
IMAGEN 200: FABRICACIÓN EN SERIE POR CERA PERDIDA EN COLADO CENTRIFUGADO DE PANDORA (BEN BRIDGE JEWELER, 2014)	184
IMAGEN 201: RESIDUOS DE RESINA CALCINABLE (ELABORACIÓN PROPIA)	189

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: PROPORCIONES PARA LA FABRICACIÓN DEL NIELLO. (NIELLO – ANTIQUE JEWELRY UNIVERSITY, S. F.)	13
TABLA 2: COMPARATIVA ENTRE FDM, SLA Y SLS (COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D: FDM, SLA O SLS, S. F.).....	33
TABLA 3: PROPIEDADES DE QUEMADO DE CASTABLE WAX 40 (WHITE PAPER: INTRODUCTION TO DESKTOP STEREOLITHOGRAPHY, 2015)	51
TABLA 4: RAMPA DE FUNDICIÓN DE LA CASTABLE WAX 40 (CASTABLE WAX AND CASTABLE WAX 40: JEWELRY PATTERN BURNOUT PROCESS, 2022)	51
TABLA 5: PROPIEDADES DE QUEMADO DE CASTABLE WAX (WHITE PAPER: INTRODUCTION TO DESKTOP STEREOLITHOGRAPHY, 2015)	52
TABLA 6:RAMPA DE FUNDICIÓN DE LA CASTABLE WAX (CASTABLE WAX AND CASTABLE WAX 40: JEWELRY PATTERN BURNOUT PROCESS, 2022)	53
TABLA 7:RAMPA DE FUNDICIÓN DE LA CASTABLE WAX ACELERADA (CASTABLE WAX AND CASTABLE WAX 40: JEWELRY PATTERN BURNOUT PROCESS, 2022)	53
TABLA 8: TABLA DE COMPOSICIÓN DE SATIN CAST 20 (SATIN CAST 20 / KERRCAST 2000 DIRECTIONS FOR USE, S. F.)	63
TABLA 9: TABLA DE PARÁMETROS DE PIEZA Y SENSIBILIDAD (ELABORACIÓN PROPIA)	90
TABLA 10: CARACTERÍSTICAS DE LA PRIMERA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	102
TABLA 11:CARACTERÍSTICAS DE LA SEGUNDA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	105
TABLA 12: CARACTERÍSTICAS DE LA TERCERA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	108
TABLA 13: CARACTERÍSTICAS DE LA CUARTA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	110
TABLA 14: CARACTERÍSTICAS DE LA QUINTA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	112
TABLA 15: CARACTERÍSTICAS DE LA SEXTA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	114
TABLA 16: CARACTERÍSTICAS DE LA SÉPTIMA IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	117
TABLA 17: TABLA COMPARATIVA DE LAS IMPRESIONES EN CERA (ELABORACIÓN PROPIA).....	122
TABLA 18: CARACTERÍSTICAS DE LA PRIMERA SERIE DE FUNDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	127
TABLA 19: CONCLUSIONES DE LA SEGUNDA SERIE DE FUNDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	129
TABLA 20: CARACTERÍSTICAS DE LA SEGUNDA SERIE DE FUNDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	130
TABLA 21: CONCLUSIONES DE LA SEGUNDA SERIE DE FUNDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	132
TABLA 22: CARACTERÍSTICAS DE LA TERCERA SERIE DE FUNDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	133
TABLA 23: CONCLUSIONES DE LA TERCERA SERIE DE FUNDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	137
TABLA 24: CARACTERÍSTICAS DE LA CUARTA SERIE DE FUNDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	138
TABLA 25: CONCLUSIONES DE LA CUARTA SERIE DE FUNDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	140
TABLA 26: CARACTERÍSTICAS DE LA QUINTA SERIE DE FUNDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	141
TABLA 27: CONCLUSIONES DE LA QUINTA SERIE DE FUNDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	143

TABLA 28: TABLA CON CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES TÍPICAMENTE UTILIZADOS EN JOYERÍA (ELABORACIÓN PROPIA)	150
TABLA 29: TABLA DE PRECIOS POR ÁRBOL (ELABORACIÓN PROPIA)	151
TABLA 30: VELOCIDAD DE LA SIERRA DE CINTA EN FUNCIÓN DEL ESPESOR DEL LATÓN (SIERRAS EVEI, s. F.)	167
TABLA 31: ANÁLISIS DE COSTES DE LA BANDEJA 1 (ELABORACIÓN PROPIA).....	168
TABLA 32: ANÁLISIS DE COSTES DE LA BANDEJA 2 (ELABORACIÓN PROPIA).....	169
TABLA 33: ANÁLISIS DE COSTES DE LA BANDEJA 3 (ELABORACIÓN PROPIA).....	169
TABLA 34: ANÁLISIS DE COSTES DE LA BANDEJA 4 (ELABORACIÓN PROPIA).....	170
TABLA 35: ANÁLISIS DE COSTES DE LA BANDEJA 5 (ELABORACIÓN PROPIA).....	170
TABLA 36: ANÁLISIS DE COSTES DE LA BANDEJA 6 (ELABORACIÓN PROPIA).....	171
TABLA 37: ANÁLISIS DE COSTES DE LA BANDEJA 7 (ELABORACIÓN PROPIA).....	171
TABLA 38: COSTE MEDIO UNITARIO DE LA FABRICACIÓN 3D POR RESINAS (ELABORACIÓN PROPIA).....	172
TABLA 39: RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE LA PRODUCCIÓN EN LA BANDEJA 7 (ELABORACIÓN PROPIA) ...	173
TABLA 40: COMPARACIÓN DE COSTES EN EL LABORATORIO CONTRA PRODUCCIÓN BAJO PEDIDO (ELABORACIÓN PROPIA)	178
TABLA 41: PRECIO DE COMPRA DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN EL PROYECTO (ELABORACIÓN PROPIA)	180
TABLA 42: CÁLCULO DE LA AMORTIZACIÓN DE LAS MÁQUINAS DE FUNDICIÓN	181
TABLA 43: ANÁLISIS DE COSTES DE FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA (ELABORACIÓN PROPIA)	182
TABLA 44: TABLA ANÁLISIS DE DIFERENTES MÉTODOS DE PRODUCCIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).....	186

ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1: COMPARATIVA DE LAS IMPRESIONES EN CERA (ELABORACIÓN PROPIA)	123
GRÁFICA 2: RAMPA DE FUNDICIÓN EMPLEADA EN EL ÁRBOL 0 (ELABORACIÓN PROPIA)	128
GRÁFICA 3: RAMPA DE FUNDICIÓN EMPLEADA EN LOS ÁRBOLES 1 Y 2 (ELABORACIÓN PROPIA)	130
GRÁFICA 4: RAMPA DE FUNDICIÓN EMPLEADA EN EL ÁRBOL 3 (ELABORACIÓN PROPIA)	134
GRÁFICA 5: RAMPA DE FUNDICIÓN EMPLEADA EN LOS ÁRBOLES 4 Y 5 (ELABORACIÓN PROPIA)	134
GRÁFICA 6: RAMPA DE FUNDICIÓN EMPLEADA EN LOS ÁRBOLES 6 Y 7 (ELABORACIÓN PROPIA)	139
GRÁFICA 7: RAMPA DE FUNDICIÓN EMPLEADA EN LOS ÁRBOLES 8 Y 9 (ELABORACIÓN PROPIA)	142
GRÁFICA 8: TABLA COMPARATIVA ENTRE TODAS LAS RAMPAS DE CALENTAMIENTO (ELABORACIÓN PROPIA)	147
GRÁFICA 9: CANTIDAD DE PIEZAS SOLDADAS ORIGINALMENTE EN EL ÁRBOL DE CERA (ELABORACIÓN PROPIA)	152
GRÁFICA 10: CANTIDAD DE PIEZAS PRODUCIDAS POR FUNDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	152
GRÁFICA 11: PROPORCIÓN DE ÉXITO EN LOS ENSAYOS DE FUNDICIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	153
GRÁFICA 12: RELACIÓN DEL COSTE TOTAL CON LOS LITROS DE RESINA (ELABORACIÓN PROPIA)	172
GRÁFICA 13: RELACIÓN DEL COSTE UNITARIO CON LOS LITROS/UD DE RESINA (ELABORACIÓN PROPIA) ...	173
GRÁFICA 14: DIAGRAMA DE CAJAS DE MODELOS Y SOPORTES DE LA BANDEJA 7 (ELABORACIÓN PROPIA)	174
GRÁFICA 15: DIAGRAMA DE CAJAS DE COSTES DE LA BANDEJA 7 (ELABORACIÓN PROPIA)	174

ÍNDICE DE ESQUEMAS

ESQUEMA 1: METODOLOGÍA AGILE (COGNODATA, 2023).....	5
ESQUEMA 2: FLUJO DE TRABAJO DEL PROYECTO. (ELABORACIÓN PROPIA)	6
ESQUEMA 3: FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA MEDIANTE TECNOLOGÍA SLA (I.MATERIALISE, S. F.).....	23
ESQUEMA 4: TIPOS DE IMPRESIÓN 3D CON LAS COMENTADAS SUBRAYADAS. (3D PRINTING: WHAT IS IT & HOW DOES IT WORK?, PROTOLABS NETWORK, S. F.)	26
ESQUEMA 5: DIFERENTES TECNOLOGÍAS EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE JOYERÍA. (ELABORACIÓN PROPIA)	32
ESQUEMA 6: DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN DE JOYERÍA EN FUNCIÓN DE SUS PROCESOS DE IMPRESIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	32
ESQUEMA 7: DIAGRAMA DE FABRICACIÓN EN SLA EN EL PROYECTO (ELABORACIÓN PROPIA).....	35
ESQUEMA 8: ELEMENTOS DE UNA IMPRESORA FORM 3. (SLA Vs. DLP Vs. MSLA Vs. LCD: GUÍA DE IMPRESORAS 3D DE RESINA, S. F.)	45
ESQUEMA 9: ESQUEMA BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA IMPRESORA DE SLA. (ELABORACIÓN PROPIA.)	49
ESQUEMA 10: DIAGRAMA DE FABRICACIÓN EN FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA EN EL PROYECTO (ELABORACIÓN PROPIA)	58
ESQUEMA 11:MEZCLADO TIEMPOS DE MEZCLADO POR ASPIRACIÓN DE SATIN CAST 20 (SATIN CAST 20 / KERRCAST 2000 DIRECTIONS FOR USE, S. F.).....	64
ESQUEMA 12: PROPUESTA DE TIEMPOS DE QUEMADO DE LA SATIN CAST 20 (SATIN CAST 20 / KERRCAST 2000 DIRECTIONS FOR USE, S. F.)	65
ESQUEMA 13: PROCESO DE FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA EN JOYERÍA. (RAMA, 2021)	80
ESQUEMA 14: ADAPTACIÓN Y TRADUCCIÓN DEL ESQUEMA DEL PROCESO DE FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA (C. CHELLADURAI ET AL., 2020).....	81
ESQUEMA 15:COMPARATIVA DE ALTURA DE CAPA: 200 µM Y 25 µM (WHITE PAPER: INTRODUCTION TO DESKTOP STEREOLITHOGRAPHY, 2015)	85
ESQUEMA 16: PARTES DE UN ANILLO. (KAIA, 2014)	88
ESQUEMA 17: ESQUEMA RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DE CADA ANILLO (ELABORACIÓN PROPIA)	101

1 Introducción

1.1 Impresión en SLA y fundición a la cera perdida

En el presente proyecto se pretende realizar el análisis detallado de todas las fases que intervienen en el ciclo de producción de un producto de joyería mediante impresión 3D y fabricación a la cera perdida.

Se analizarán con detalle las fases de diseño y fabricación de un objeto como es una pieza de joyería de cara a su optimización mediante la utilización de tecnologías y nuevos materiales de impresión 3D, para su posterior producción como un producto terminado utilizando los recursos disponibles en el laboratorio.

El análisis de este proceso se enfoca en la metodología empleada y todos los factores que intervienen, ya sean materiales, temperatura, geometrías, acabado superficial... también se realiza un análisis detallado de cada ensayo realizado y decisiones tomadas, en base a un criterio de mejora continua. Por último se enfoca el análisis en el estudio de costes del proyecto.

La optimización del proyecto se realiza en base a la reducción de costes, mejora del proceso productivo e investigación de métodos con los que elaborar un producto final a menor coste y mayor calidad.

La impresión 3D en SLA, así como el resto del campo de la fabricación aditiva, es un pilar fundamental en el desarrollo tecnológico, debido a la alta adaptabilidad en diferentes campos, desde la producción de piezas singulares, a experimentar con geometrías complejas y las posibilidades que ofrece en la industria.

La fundición a la cera perdida es un proceso de fabricación con una extensa historia y desarrollo que actualmente sigue en evolución, perfeccionado por la industria para llegar a límites antes considerados imposibles.

1.2 Motivación del proyecto

La motivación de este proyecto es analizar la metodología de fabricación de piezas de joyería complejas mediante fundición utilizando como modelo diseños impresos en impresión 3D.

Presenta un enfoque diferente de la ingeniería académica convencional, ya que es mucho más empírico y experimental. Con la posibilidad de realizar ensayos, se puede llegar a resultados predecibles, lo cual reafirmaría esta metodología, o no esperables, lo cual abre una línea de desarrollo y análisis de problemas y defectos.

Con este Trabajo Final de Máster se pretende ahondar en los límites y las posibilidades que hay con la fabricación aditiva en SLA desde un punto de vista cualitativo y estético. Esta técnica está siendo implementada en pequeños talleres y en cuanto se llegue a perfeccionar cabe la posibilidad de que se emplee en la producción industrial.

Puede servir como inicio de línea de investigación en la impresión por SLA, arrojando nuevas preguntas. Actualmente el ámbito de las resinas fotopolimerizables está en constante desarrollo como demuestra la industria dental y sus aplicaciones en soluciones médicas.

Por último, mencionar que este es un trabajo que permite ver todo el ciclo de producción de una pieza, desde su concepción, hasta el estudio de impacto económico. Se realiza un estudio que abarca todas las fases de desarrollo de este tipo de pieza: diseño, producción, fabricación..., no solo en una etapa. Esta cohesión del proceso hace que se elabore un informe completo y detallado de fabricación que puede llevar a nuevas líneas de investigación.

1.3 Objetivos del proyecto

Los objetivos de este Trabajo Fin de Máster se resumen en cuatro pilares fundamentales:

- **Conocimiento de parámetros de diseño** en la elaboración de anillos de joyería. Discusión de sus características enfocadas al proceso de fabricación.
- Aprendizaje del **proceso de fabricación en impresión 3D**. Estudio en profundidad de la fabricación aditiva y diferentes métodos de impresión disponibles para anillos. Especialización en SLA y análisis en detalle de métodos de orientación, geometrías de soportes, métodos de fabricación de piezas de joyería y materiales disponibles de cara a su optimización.
- Desarrollo del **proceso de fundición a la cera perdida**. Desarrollo de técnicas de fundición con los materiales disponibles y estudio de resultados. Especialización en colado por gravedad en latón. Análisis de rampas de calentamiento. Valoración de calidad de los productos finales.
- Identificación de puntos clave en el proceso para reducir costes y gasto de material de cara a un análisis económico y medioambiental que soporte esta metodología.

1.4 Alineación con los objetivos de desarrollo sostenibles (ODS)

Los ODS que se alinean con este proyecto suponen un compromiso a implementar acciones que ayuden a equilibrar áreas sociales, económicas y medioambientales que están actualmente en desarrollo.

Los ODS que engloba el proyecto serían principalmente los siguientes:

8

TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO

ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico.

La joyería es un negocio que tiene un alto impacto económico y social. Con respecto a trabajo decente, la extracción de gemas y oro llevan en muchos países a explotación laboral y abusos. Respecto al crecimiento económico, la impresión 3D abarata costes de producción y permite hacer tiradas mayores de piezas. Con este trabajo se espera que mediante el empleo de fabricación 3D se puedan elaborar piezas de alta calidad que puedan generar interés en el público de alto poder adquisitivo, cambiando el foco de interés del consumidor principal de oro y transaccionando a la fabricación 3D.

9

INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA

ODS 9: Industria, innovación e infraestructura.

Con este proyecto se espera fomentar la innovación en el desarrollo de piezas de joyería, para que, en vista a su implementación en la industria, su proceso de producción sea más rápido, menos costoso, y óptimo.

12

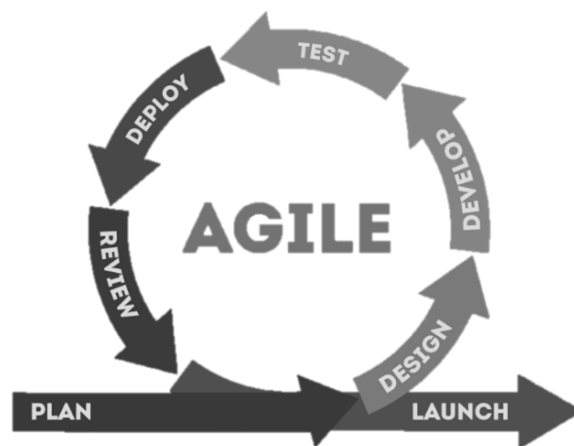
PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES

ODS 12: Producción y consumo responsables

Atendiendo a la problemática ambiental actual, se espera llegar a un sistema de fabricación óptimo que dé lugar a una producción sostenible, reduciendo residuos, abaratando costes y garantizando un consumo responsable.

1.5 Metodología de trabajo: metodologías ágil y lean.

La metodología de trabajo está basada principalmente en la **metodología ágil** (AGILE), en la que se divide en trabajo en un gran número de pequeñas tareas y tras acabar cada una, se pasan por una revisión. Estas revisiones son iterativas y forman parte de un proceso de mejora continua. Al ser un proceso iterativo, el tiempo de desarrollo es mayor que siguiendo una metodología de fabricación tradicional, en la que cada bloque productivo sigue al anterior pasando pocos controles de calidad, pero asegura mejores resultados y es más flexible ante cambios e imprevistos. Esta metodología está orientada a la satisfacción del cliente final, en este proyecto se ha orientado a la inspección de calidad y las iteraciones de mejora continua.

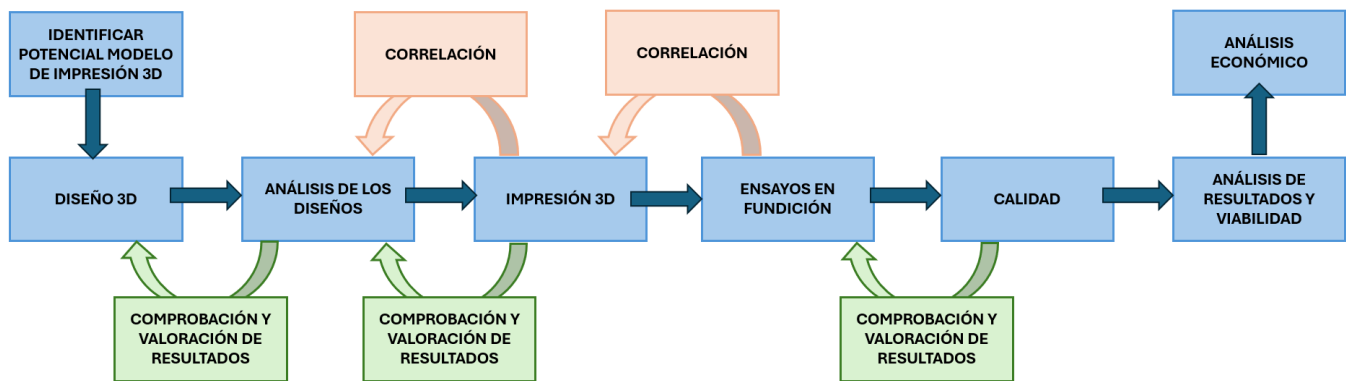


Esquema 1: Metodología AGILE (Cognodata, 2023)

Se complementa con algunos de los pilares de la **metodología LEAN**, en la que se busca eliminar todo lo que no agregue valor, así como la reducción de desperdicios, la mejora continua y la toma de decisiones orientadas a su perduración en el largo plazo.

Si bien estas dos metodologías no son iguales ni orientadas a los mismos campos, la primera al desarrollo de software y la segunda a producción en serie; se han tomado los postulados convenientes de estas dos para conseguir un flujo de trabajo adecuado en el proyecto.

El **flujo de trabajo** en la elaboración del proyecto ha sido el siguiente, basado en las metodologías enunciadas y en las metodologías de fabricación y su toma de decisiones.



Esquema 2: Flujo de trabajo del proyecto. (Elaboración propia)

- Se llevará a cabo un análisis en profundidad de los fundamentos de diseño de piezas complejas en impresión 3D. De esta forma se podrán categorizar y definir según sus parámetros y requisitos.
- Preparación y análisis de la tecnología de impresión 3D en SLA (estereolitografía con rayo láser de luz ultravioleta. Obtención de conocimientos sobre la técnica de fabricación y su comprensión en profundidad.
- Análogamente, estudio, análisis y comprensión del proceso de fundición a la cera perdida. Se valorarán todos los parámetros influyentes que se deben tener en cuenta para el correcto desarrollo en físico.
- Desarrollo de técnicas de optimización y mejora en el proceso de fabricación.
- Propuestas de mejora, identificación de defectos y formulación de hipótesis en caso de fallo.
- Análisis de calidad y mejora continua a lo largo del proceso de producción mediante iteraciones ante fallos y modificaciones para obtener resultados concluyentes.
- Elaboración de costes para valorar el alcance económico del proyecto, así como las conclusiones acerca del proyecto, su alcance y su éxito.

2. Contexto histórico del proyecto

2.1 Historia de la fabricación de joyería

La fabricación de joyería se remonta a la Edad de Piedra, cuando se utilizaban útiles rudimentarios y cualquier recurso inmediatamente disponible para elaborar productos decorativos que se pudieran emplear como muestra de poder, destreza manual y belleza. En un principio, para la elaboración de piezas de joyería se utilizaban piedras, huesos de animales, o caparazones de moluscos y otros bivalvos. Con el progresivo descubrimiento de piedras preciosas, apreciadas por su rareza en la naturaleza y características como su brillo o colores. La evidencia más antigua de la que se tiene constancia procede de la Cueva de los Aviones, localizada en Cartagena, Región de Murcia, España. (Hoffmann et al., 2018). Estas piezas se remontan a hace 115.000 – 120.000 años; siendo de interés antropológico y científico. En esta cueva se hallaron pequeños abalorios cuidadosamente perforados, realizados con conchas marinas.

En la Edad de Bronce (3000 a.C. – 1200 a.C.) se empezaron a elaborar piezas con nuevas particularidades que el hueso o las piedras no permitían. No se tiene una fecha exacta de la época en la que se produjo la transición al bronce, debido a que el desarrollo no fue simultáneo, dependía de la zona geográfica, y el descubrimiento de técnicas de aleación de bronce sigue siendo hoy en día objeto de discusión. (*Bronze Age – Antique Jewelry University*, s. f.). La principal ventaja que presentaba el **bronce** en aquella época era su carácter para **reutilizar el material**, ya que se podía volver a fundir y utilizarlo para la elaboración de armas. Además, por su facilidad para ser **moldeable, afilable, dureza y resistencia**, se convirtió en un material clave para el desarrollo de la joyería. Apareció el oficio de orfebres y artesanos, que utilizaban placas y piezas tubulares para elaborar sus piezas. Gracias a las características del bronce, se desarrollaron técnicas como el repujado, el grabado, la filigrana y el granulado. El **repujado** es una técnica artesanal que emplea buriles de diferentes formas y diámetros para, desde el reverso de la pieza, ir deformando la plancha con las formas deseadas; siendo estas de cuero, bronce, oro... La **filigrana** es una técnica que consiste en rellenar formas y figuras previamente diseñadas y fundidas con hilos de metal. Este proceso

requiere una alta delicadeza, debido a que los hilos de metal son especialmente delgados, el cual solo estaba al alcance de los orfebres más experimentados.

Uno de los ejemplos más antiguos que se tienen de este tipo de joyería se encuentra en Las Tumbas Reales de Ur, concretamente en la cripta sumeria de la Reina Pu-abi (periodo de 2900-2350 a.C.). Esta fue hallada entre 1920 y 1930 en una expedición del Museo Británico con por Sir Leonard Woolley, en la cual se descubrieron dieciséis tumbas pertenecientes a miembros de la realeza de Ur, Sumeria (la actual Tall al-Muqayyar). En este hallazgo destacó el tocado de la Reina Pu-abi, rico en detalles y exquisitos adornos en piedras preciosas, pieza clave para comprender el alcance técnico en esta disciplina de los maestros joyeros. Esta tumba destaca la riqueza de los reyes de la Dinastía Temprana de Mesopotamia. En añadidura, todos los asistentes al entierro real, los cuales morían una vez finalizaba la ceremonia y sus restos se encontraron en el yacimiento, portaban exquisitas piezas de orfebrería que **reflejan los avances técnicos y el alto nivel de destreza** que existía en aquella época. (Headdress | Sumerian | Early Dynastic IIIa | The Metropolitan Museum Of Art, s. f.)



*Imagen 1: Pieza de tocado sumerio de la Reina Pu-abi. Periodo Sumerio. Hacia 2600-2500 a.C.
(Headdress | Sumerian | Early Dynastic IIIa | The Metropolitan Museum Of Art, s. f.)*

Los siguientes avances se remontan al año 2500 a.C. en Egipto. Además de su innegable influencia por parte de la religión y su iconografía, además de dotárseles poderes mágicos y trascendentales, las piezas de joyería son de una calidad y alto grado de

refinamiento que pocas veces ha sido superado, o incluso igualado en la historia de la joyería.

El ejemplo más representativo de esta época es la tumba de Tutankamón (18º dinastía; 1539–1292 a.C.) que son las bases en el imaginario colectivo de la iconografía y paleta cromática de la joyería del antiguo Egipto. El **oro** fue el metal predominante en esta sociedad, el cual se complementaba con **pastas vitrificadas**, lapislázuli y otras piedras preciosas. La llegada de metales preciosos facilitó el crecimiento de significativos talleres en las ciudades egipcias, especialmente en Menfis, Coptos, Tebas y Alejandría. Estos talleres estaban respaldados por el Estado, que estableció una amplia gama de puestos y expertos relacionados con el trabajo del metal: desde jefes de talleres, maestros artesanos, y jefes de orfebres, hasta cinceladores, grabadores y sopladores, entre otros. Aunque no firmaban sus creaciones, los orfebres gozaban de un gran prestigio. (Mellado, 2024). Se empleaban las técnicas ya mencionadas, el cincelado, el repujado, el grabado y la filigrana y a partir del Reino Medio (2050 - 1750 a. C.) se introduce la técnica del **granulado**, que consiste en la realización de pequeñas esferas o granos de metal, habitualmente oro y plata, que mediante la **soldadura** se adherían a las piezas de joyería. Otra técnica que cabe destacar es el tabicado, esmalte alveolado o **cloisonné**, que consistía en dividir una pieza en pequeñas celdas, dispuestas en finas láminas, que se adherían al cuerpo principal mediante fundición las cuales se rellenaban de pasta vítrea o jade, turquesa, lapislázuli... Uno de los ejemplos más relevantes de esta nueva técnica se encuentra en el pectoral de halcón de Tutankamón, el cual ha trascendido hasta ser un icono en nuestra época. Estas joyas pectorales tenían una importancia significativa en el Imperio Nuevo del antiguo Egipto. Los pectorales eran piezas ornamentales que usaban los reyes y las personas de alto rango como símbolo de su poder y estatus. (Museum Egypt, 2024).



*Imagen 2: Pectoral de halcón de Tutankamón realizado con la técnica del cloisonné. Dinastía 18ª tardía.
Reino de Tutankamón (Tutankhamun), Hacia 1332-1323 a.C. (Museum Egypt, 2024)*

Signos de influencia extranjera en la civilización Egipcia se localizan en la 18ª dinastía, con la aparición de pendientes en las tumbas, nunca antes vistas en la producción clásica egipcia; así como diademas hechas de cobre entrelazado que cubrían todo el cabello, de estilo helenístico. (*Headdress Element -- See 26.8.117a | New Kingdom | The Metropolitan Museum Of Art*, s. f.). Durante las últimas dinastías griegas y la predominancia de la cultura griega, la tradición en orfebrería egipcia murió, dando paso a un estilo helénico y romano.

En la Grecia Antigua, en la isla de Creta, floreció la civilización minoica. Debido a su enclave estratégico en el Mediterráneo propició el comercio con otras regiones con las costas de Asia y África, dio paso a un desarrollo económico próspero, que estimuló las actividades de joyería. Las técnicas utilizadas en la joyería minoica-micénica fueron grabados y filigrana, pero lo más común derivó en **técnicas de corte y estampación** de láminas de oro en cuentas y otros patrones para crear collares, coronas y adornos para ropajes. Muchos de los ornamentos se tallaban a partir de oro martillado en láminas finas, algunas previamente repujadas. Importado principalmente de Egipto, el oro era extremadamente raro. Solo los muy ricos podían permitirse tales adornos. Alrededor del 1500 a. C., los principales métodos de procesamiento del oro en Grecia incluían la **fundición**, el **laminado de varillas** y la **fabricación de alambre**. Muchas de estas técnicas complejas eran comunes durante el período micénico, pero desafortunadamente estas habilidades desaparecieron al final de la Edad del Bronce. (*Gold Leaf | Minoan | Early Minoan II-III | The Metropolitan Museum Of Art*, s. f.)

Sobresalientes en el granulado, esta civilización se especializó en la talla de máscaras mortuorias de bronce (ocasionalmente de oro), en la que resalta la famosa máscara de Agamenón, hecha de una gruesa lámina de metal martillada sobre un fondo de madera, a la que se le aplicaron los detalles posteriormente con una herramienta afilada en la que se llegaba a un aceptable nivel de detalle. Dos agujeros cerca de las orejas servían para sujetar la máscara con un cordel sobre el rostro del difunto.

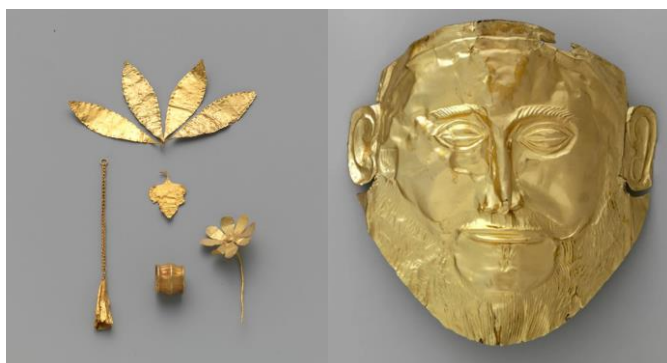


Imagen 3: Hoja de oro. Periodo Minoico. Hacia el 2300–2100 a. C. (Gold Leaf | Minoan | Early Minoan II–III | The Metropolitan Museum Of Art, s. f.)

Imagen 4: La máscara de Agamenón. Periodo Minoico. Hacia 1550–1500 a.C. (The Mask Of Agamemnon: An Example Of Electroformed Reproduction Of Artworks Made By E. Gilliéron In The Early Twentieth Century - The Metropolitan Museum Of Art, s. f.)

El arte y desarrollo de la orfebrería Etrusca, desarrollada en la Italia central entre el siglo IX y el siglo II a. C, destaca un elemento respecto de sus coetáneos, y es la aparición de las fíbulas (***fibulae***), similares a lo que se conoce como broches y alfileres. Se recubrían con polvo de oro, y se empezaron a desarrollar técnicas para desarrollar estos objetos, como fabricación de láminas tubulares de oro. Estos elementos permitían al orfebre desarrollar su virtuosismo con filigrana y granulado. Uno de los broches más notables de esta cultura es la fíbula de la tumba de Lictor en Vetulonia, de la que destacan sus relieves y sus imágenes evocativas, influenciadas de civilizaciones del suroeste asiático. Este tipo de motivos etruscos influenciaron todo el Mediterráneo.



Imagen 5: Fíbula de la Tumba de Lictor en Vetulonia. Civilización Etrusca. Hacia 700 a.C. (Vetulonia, Tomb Of The Lictor, Fibula - Livius, s. f.)

En el periodo de la Grecia Clásica, la joyería era escasa debido a la poca disponibilidad de oro y piedras preciosas. En el siglo V a.C., el estilo jónico se volvió predominante. No hubo avances en las técnicas de fabricación, así que los joyeros decidieron especializarse y **pulir sus técnicas**, así surgió una nueva corriente que tendía a demostrar su virtuosismo a través de las miniaturas, como la figura de Niké conduciendo un carro de dos caballos. Se trata de una finísima obra, con el propósito de ser un pendiente, de una altura de 5cm y peso de 15,8 g en la se soldaron más de 100 elementos.



Imagen 6: Pendiente de Niké en carruaje tirado por dos caballos. Grecia Clásica. Hacia 350-325 a.C. (Earring With Nike Driving A Two-horse Chariot – Works – Museum Of Fine Arts, Boston, s. f.)

Roma utilizó la joyería como un elemento distintivo clave de escala social. No solo era un elemento clave, distinguía entre rangos militares, profesiones, nobles y senadores.

Los **anillos** pasaron a ser un elemento común al que personas de clases inferiores podían acceder. La diferenciación ya no se daba tanto en tener la joya, si no en cómo era la joya, su **complejidad**, y su **cantidad de metal**; además de emplear oro y plata para otros usos, las clases más pudientes se permitían tener objetos domésticos elaborados con estos dos metales. La joyería romana derivaba tanto de la etrusca como de la helénica, pero con el tiempo incluyó elementos propios distintivos, como el volumen y el peso de los elementos. En cierto modo, se devaluó la importancia de la destreza en el artesano. En las zonas del Imperio Romano mayormente influenciadas *a la italiana* se desprendieron de las características griegas, y desarrollaron el **opus interrabile**, obra calada. Consistía en perforar láminas de metal para trazar diseños en las propias oquedades, imitando hojas, celosías... y el **niello**, (del latín nigellus, ennegrecido), cuya técnica consistía en aplicar plata, cobre y azufre sobre una base metálica. Esta mezcla dejaba un tono negro sobre la superficie, que solía ser plata, para aumentar el contraste. Dependiendo de la fuente histórica que se consulte, se obtienen las siguientes proporciones para la fabricación del niello.

Recipes					
METALS:	Silver	Copper	Lead	Sulfur	Other
Pliny	1	0.33	none	1	
Theophilus	2	1	.05	In Excess	
Cellini	1	2	3	In Excess	
Kunz	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Antimony ⁹
Brepohl	2	1	1	In Excess	
(Partially After Untracht) ¹⁰					

Tabla 1: Proporciones para la fabricación del Niello. (Niello – Antique Jewelry University, s. f.)

Teófilo indica en su libro “*De diversis artibus*” que las proporciones son las siguientes: “Componga el niello de esta manera: tome plata pura y divídala en partes iguales, agregándole una tercera parte de cobre puro, y tomando azufre amarillo, triture bien... y cuando haya licuado la plata con el cobre, revuélvalo uniformemente con carbón, y al instante vierta en él plomo y azufre.” (Niello – Antique Jewelry University, s. f.)

Las proporciones de Cellini, escrita en su libro “*I trattati dell'oreficeria e della scultura*” son las que se siguen utilizando actualmente para elaborar este compuesto.

En la Edad Media, no hubo gran avance en las técnicas ya mencionadas. Se introdujeron nuevas piedras preciosas, se potenció el uso de perlas, y dominaron los motivos religiosos cristianos y los arabescos. Ya sea en el arte bizantino, islámico o teutónico (godos , vándalos , anglos, hunos , francos y lombardos), los avances fueron consonantes a las inclinaciones del público que demandaba ornamentos.

Se tendía al **trenzado** y al repujado, un uso notable de **loza** y **cerámica** como elementos decorativos, y técnicas de esmaltado. En áreas influenciadas por el gusto bizantino, la joyería pasó a tener una función puramente ornamental, en la que los orfebres lucían su virtuosismo a expensas de su utilidad. Los pueblos bárbaros por otro lado, sustituyeron las piezas romanas, área en declive y desarrollo en decadencia, con un alto nivel de policromado. En la Europa Occidental se optó por dejar de lado los ritos funerarios. Así, desde el siglo VIII, prácticamente los únicos objetos de oro importantes que han llegado hasta nuestros días son los que se conservaban en los monasterios y catedrales, así como en las cortes y palacios reales. Hay muy pocas joyas entre estos artículos de oro. Sin embargo, con el desarrollo de la escritura, se documentó el uso de joyas en esta época. Según estas fuentes, en el periodo románico (950 – 1150) apenas se usaba joyería.

Finalmente la joyería en Europa occidental se fue liberando gradualmente del patrocinio eclesiástico centralizado para el servicio de muchas cortes y familias nobles. Se organizaron los primeros **gremios de orfebrería**. Los elementos que se potenciaron son los anillos, fíbulas y hebillas de cinturón.



Imagen 7: Fíbulas aguileñas de Alovera. Teutónico. Visigodos. Península ibérica. Siglo V (Fíbula Aquiliforme de Alovera - Google Arts & Culture, s. f.)

Imagen 8: Broche para hombros de Sutton Hoo. Teutónico. Vikingo. Principios del siglo VII (Sadurní, 2023)

En el periodo de los siglos XV y XVI, con el Renacimiento y la vuelta a los ideales grecorromanos hubo un cambio de paradigma, la orfebrería dejaba de ser una labor para ser tratada y respetada como un arte. Los joyeros pasaron a ser personas altamente valoradas en sociedad, llegando a colocarse en los estamentos más altos de la sociedad. Casi todos los artistas aprendieron nociones de orfebrería para satisfacer las demandas de sus clientes, como Brunelleschi o Botticelli. Durante todo el Renacimiento hubo un aumento sustancial del uso de joyas en las cortes de España, Inglaterra y Francia, así como los ducados de la Toscana y Borgoña. La orfebrería pasó a ser una exhibición de **poder y riqueza**, con amplias decoraciones y ornamentos con piedras preciosas, perlas y oro. A través de la pintura tenemos constancia de cómo era esta moda y su evolución. En esta época surgieron los **camafeos**, los collares se hacían de amplia envergadura, y se tendían a colgar de la ropa, no del cuello como podría parecer.

Las obras más populares de esa época fueron los grabados sobre piedras preciosas; tela bordada con pequeñas perlas; talla de marfil para crear objetos litúrgicos; insignias, colgantes y anillos. Los joyeros europeos intentaron enriquecer la decoración de los diamantes dándoles, entre otras cosas, trazos de letras, rosas o azucenas. También se hicieron populares los ramos de flores o poemas cortos grabados en la circunferencia interior de los anillos, así como las joyas esmaltadas de colores brillantes. (Zapata, s. f.)

Los siglos XVII y XVIII estuvieron marcados por poco avance tecnológico, si no por la moda de la época. En el periodo barroco se puso de moda la decoración floral y la abundancia de nudos, lazos, y volutas. Al principio, los ornamentos pasaron a ser primordialmente mediante calado, el ya mencionado *opus interrasile*. Las joyas de oro se pintaban con esmaltes y con el perfeccionamiento del tallado de gemas, las joyas cambiaron drásticamente su composición.

Sobre 1725 se importaron a Europa una cantidad de diamantes y otras piedras que dieron lugar al comienzo de **imitaciones**. Las formas densas de la joyería barroca fueron reemplazadas por un diseño completamente diferente, en el que el patrón diseñado se vislumbraba en las piedras preciosas y el metal estaba lo más oculto posible. La mayor luminosidad resultante se ve potenciada aún más por la gran cantidad de espacios vacíos de la composición y, en muchos casos, por su falta de simetría. Como tal, **no hubo más avances en la fabricación y técnicas de joyería**, mas que seguir puliendo las existentes

con útiles de trabajo mejorados. Sí surgió una nueva forma de joyería, mediante una **pasta blanca**, se imprimían relieves sobre cerámica de colores, de forma ovalada, octogonal y rectangular. Estas piezas de cerámica estarían recubiertas por oro por sus contornos, y estaban inspiradas en camafeos y alfileres clásicos.

La Revolución Industrial trajo consigo **nueva maquinaria**, y consigo nuevas técnicas. Por ejemplo, se inventó la técnica del **dorado eléctrico**, aleaciones de metales en lugar de oro y plata, las excavaciones para conseguir gemas aumentó progresivamente. Pese a todo, la calidad de los artesanos siguió en aumento. Además de la producción en masa, en el siglo XIX se fundaron grandes empresas de comercio de arte que producían joyas de alta calidad adaptadas a las demandas de la nueva y rica burguesía.

Con el desarrollo de la **galvanoplastia** se consiguió unir finas capas de oro y plata sobre una placa base de metal. Esta técnica introdujo un amplio rango opciones de joyería que eran más livianas y económicas que los artículos más caros y pesados hechos de metales preciosos. Las pulseras chapadas en oro con diseños complejos experimentaron una gran demanda, siendo bastante asequibles y disponibles para el ciudadano promedio. Se produjeron grandes cantidades de piezas bañadas en oro que se exhibieron en catálogos, lo que brindó a los compradores una variedad de estilos para elegir. Personas de todos los ámbitos tenían acceso a opciones modernas y de alta calidad, lo que modificó la industria de la joyería para siempre.

2.2 Historia de la fundición a la cera perdida

La **fundición a la cera perdida** es un método de fabricación mediante fundición en el que se obtienen piezas de metal mediante un molde, el cual alberga un modelo del objeto que se quiere fundir, habitualmente elaborado con cera. Este método sirve para elaborar piezas de **alta complejidad**.

Existen evidencias de su empleo que datan de los años (4550-4450 a. C.) en la Necrópolis de Varna, Bulgaria. Es un lugar arqueológico de vital importancia a nivel mundial, puesto que es considerado el yacimiento con piezas de orfebrería en **cera perdida más antiguo de la humanidad**. Fue descubierto en 1972, y aproximadamente falta el 30% del yacimiento por excavar. Los años han podido ser determinados con exactitud gracias a las pruebas de datación de carbono-14 realizadas en 2006. También se han encontrado piezas de cobre fundido en el tesoro de Nahal Mishmar, en una cueva del desierto de Judea en una expedición de 1961. Estos objetos datan del año 3500 a.C.

Una de las evidencias más antiguas que quedan de la aplicación de la cera perdida en cobre es del año 4000 a.C. en un amuleto con forma de rueda en Mehrgarh, Pakistán. En la civilización del valle del Indo (cuenca del río Indo, Pakistán) se encontró la figura “la bailarina” datada entre 2300-1750 a.C. La estatua mide 10.5cm, fue descubierta en 1926 y actualmente se expone en el Museo Nacional de Nueva Delhi. El nivel de detalle en la escultura permitió descubrir nuevos aspectos sobre la civilización del Indo, no solo aspectos técnicos, pues mostraba que no solo tenían conocimientos sobre aleaciones, fundición y métodos sofisticados como la cera perdida; si no aspectos culturales y sociales de la época. En Tailandia, donde se utilizó esta técnica para fabricar brazaletes entre los años 1200 a.C. y 200 d.C. se revelaron restos de cera animal en el interior de los brazaletes, siendo claro **indicio del uso de cera para fabricar los modelos**.

En el Mediterráneo, se empleó sobre todo en la Grecia Clásica, para fabricar grandes **estatuas de bronce**. En la región etrusca se encuentran restos de elementos antropomórficos elaborados mediante la cera perdida, como pomos de puertas, fíbulas y colgantes. Figuras como los cuatro caballos de cobre de San Marcos (Venecia) son ejemplos de esculturas fundidas en bronce en varias partes y después unidas, como el

Poseidón de bronce de Artemision. Otro ejemplo representativo es la cabeza de bronce de Afrodita de Satala.



Imagen 9: Caballos de San Marcos. Venecia. Siglo IV a.C. (Los Caballos de la Basílica de San Marcos, 2022)



Imagen 10: Fragmento del gancho "The Dunaverny Flesh Hook". Siglo IX. (Flesh-hook, s. f.)

En el siglo XI d.C. en Europa hay datos de fabricación a la cera perdida gracias a unos complejos instrumentos denominados “ganchos para carne” de Dunaverney y Little Thertford, cuya función era ser meramente unos colgadores de carne en grandes celebraciones y eventos ceremoniales.

En Colombia hay evidencias de orfebrería Quimbaya, data entre los siglos X y XII d.C. en la que realizaban fundición a la **cera perdida con núcleo**, método mediante el cual conseguían una vasija de oro hueca. Se empleaba un núcleo de arcilla y carbón moldeado con la forma deseada, y tras esto, se recubría con cera. Se unía al núcleo una capa exterior de arcilla, y conseguían derretir la cera dejando libre suficiente espacio para que penetrase el oro. (Echavarría, s. f.)



Imagen 11: Diagrama de fundición a la cera perdida Quimbaya. (Echavarría, s. f.)

Quedan evidencias de estas técnicas por medio de pequeños escritos y anotaciones en la Grecia Clásica, así como imágenes en ánforas de este proceso. Teófilo Presbítero, autor ya mencionado, escribe en uno de sus tratados información sobre la cera perdida, como qué materiales para el molde son más aptos según la geometría, las proporciones de cera con el bronce, o cómo lograr fundir elementos de alta precisión. El escultor y artista Benvenuto Cellini posiblemente utilizó sus escritos para fundir su obra “Perseo con la cabeza de Medusa”. Esta obra es considerada como el **renacimiento de la técnica de cera perdida en la Edad Moderna**. Se sabe además que en el proceso de fundición de esa escultura, si no hubiera estado el artista **controlando el enfriamiento de esta pieza**, lo más probable es que hubiera acabado destruida. El método de Cellini, habitualmente utilizado, era recubrir el modelo de cera y su núcleo estar compuesto por arena, arcilla y crin de caballo. Esta forma de relleno de las piezas de cera perdida se utilizó hasta el siglo XVIII.

Con la llegada de la Revolución Industrial, la tecnología de la cera perdida evolucionó con nuevos materiales y procesos que permitieron una mayor eficiencia de producción. En los siglos XX y XXI, la fundición en cera se ha convertido en un **método flexible** en la producción artística y en la producción de piezas industriales de alta complejidad.

En 1897 el dentista B.F.Philbrook utilizó este método para el proceso de **implantes dentales de oro**, lo cual provocó un aumento de la demanda y un interés generalizado en la salud bucodental. En 1929 se planteó el cobalto como material para implantes. Finalmente en 1936 se llevó hasta aleaciones **cromo-cobalto**, con unas propiedades mecánicas excepcionales para la época. (*History Of The Process — Hitchiner Manufacturing*, s. f.)

Con el empleo **producción industrial en serie** tras la Primera Guerra Mundial, la fabricación mediante la cera perdida cobró especial protagonismo, ya que se tenía un control especial de la calidad y las dimensiones de las piezas. Piezas que tradicionalmente se habían fabricado manualmente pasaron a fabricarse en árboles de fundición, haciendo de este un proceso mucho más rentable.

Tras la Segunda Guerra Mundial, se utilizaron los mismos revestimientos de la industria dental para fabricación de armamento en Estados Unidos. Debido al alto control de las

dimensiones, el poder obtener la pieza **sin mecanizado ni soldaduras**, pasó a ser el estándar en la industria. A esto siguieron mejoras en maquinaria como la centrifugación, hornos eléctricos y tratamientos químicos.

2.3 Historia de la impresión 3D en joyería

La **impresión 3D** se empezó a plantear como una posibilidad de creación de piezas complejas de forma **automatizable** a finales del siglo XIX, por parte de François Willème.

François planteó la idea del escáner 3D. Estableció la idea de escultura asistida por fotografía en su artículo “Escultura fotográfica” en el periódico “Moniteur de la Photographie” en mayo de 1861. Combinando la fotografía y el pantógrafo, obtenía figuras prácticamente iguales a las originales. Como explicaron en la sociedad general de fotoescultura de Francia, el principio se basaba en que todos los perfiles de un cuerpo, combinados, resultan en una figura tridimensional. (*François Willème Inventeur Ardennais de la Photosculpture*, s. f.)

En esta época, concretamente en 1840, Charles Wheatstone inventa el estereoscopio, siendo un visor con lentes convergentes que permiten la visión de imágenes almacenadas en un arcaico “carrete”. Con este artefacto se podían ver imágenes tridimensionales. (Gómez, s. f.)

A finales de la década de los 70 se desarrollan equipos y materiales de **fabricación aditiva**. Por ejemplo, Joseph E. Blather consiguió patentar una técnica de fabricación aditiva mediante la **estratificación de material sobre capas**.

La auténtica revolución comenzó con el padre de la fabricación 3D, **Hideo Kodama**. En 1981, en el instituto de Investigación de Nagoya, ideó un proyecto cuyo objetivo era la fabricación mediante el **tratamiento de un fotopolímero con luz ultravioleta**. Este proyecto se patentó, pero no llegó a ningún desarrollo por falta de fondos. Lo mismo le ocurrió a Alain Méhauté, que con su compañero Olivier de Witte y Jean Claude André; que observaron que algunas resinas se podían curar con luz ultravioleta. A ellos se les conoce como los precursores de la polimerización en tanque, o estereolitografía. Este es el proceso que se aplica en las impresoras SLA, que son las que aplican a este proyecto. (Blog Structuralia, s. f.)

1984 fue el año clave en la tecnología de la impresión 3D y vino de la mano de **Charles Hull**, el cual inventa la **primera tecnología de impresión en SLA**. Charles patenta su invento y a la vez, funda 3D Systems. Con esta empresa comercializa la primera impresora 3D SLA, la SLA-1. Sobre esta época se plantean las tecnologías del FMD y SLS. (Impresoras3d.com, 2024) (Adlughmin & Adlughmin, 2021)

La tecnología **SLS** se desarrolló en 1987, por **Carl Deckard**. No se comenzaron a comercializar impresoras de SLS hasta 2006. Utiliza como material principal **polvo que es fusionado mediante láser**. Esta fusión por capas resulta en un material sólido. El láser traza el patrón de cada sección de un diseño, tras esto, la plataforma desciende un nivel equivalente a una capa, y construye una capa por encima de la ya fabricada. Entre sus principales ventajas es que se pueden elaborar piezas finales, sin necesidad de postprocesado, piezas complejas, soluciones robustas, y de bajo volumen, además de que la pieza final termina sobre una cama de polvo, por lo que no necesita apoyos, como otras tecnologías. (*Sinterización Selectiva Por Láser* | 3D Systems, 2023)

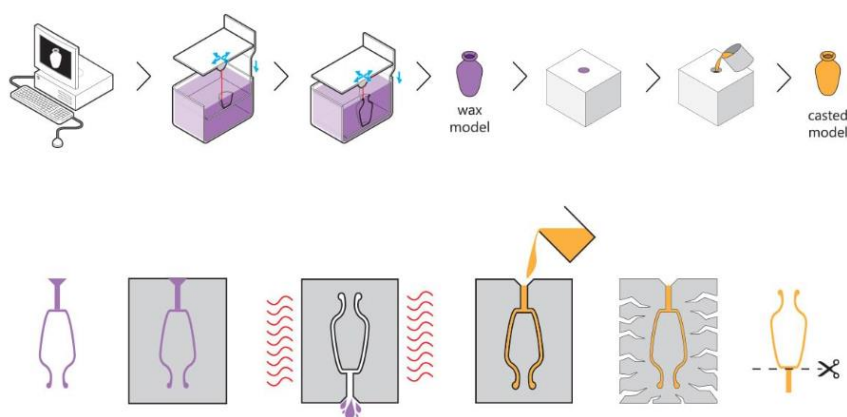
La tecnología **FDM** es la más conocida, que es la de modelado por deposición fundida. Se patentó en 1988 por S. **Scott Crump** y **Lisa Crump**, quienes terminaron fundando una de las empresas más importantes de esta tecnología, Stratasys. Funciona mediante la extrusión de material bobinado, en un carrete. Este filamento termoplástico se calienta a través de un extrusor, pasa por una boquilla, y se desplaza a lo largo de una placa de impresión. Es la más extendida en la industria por que con la estandarización y globalización de su uso, es de las más sencillas de usar, y económica, es rápida, y una tecnología con un postprocesado limpio. Para acabados bastos y poco precisos, es una tecnología ideal. (Systèmes, 2022)

Entre los avances que se han conseguido a través de la tecnología de impresión 3D, contamos con la aparición de la **Medicina Regenerativa**, gracias a la cual se plantean trasplantes de órganos elaborados mediante tecnologías de fabricación aditiva, como en 1999 con un trasplante de una vejiga recubierto con las propias células del paciente para eliminar cualquier rechazo que pudiera producirse. En 2002 consiguen diseñar un riñón completamente funcional. En 2008 se desarrolló la primera prótesis de pierna basada en la tecnología Impresión 3D. Ese mismo año se consiguió fabricar el primer avión hecho

mediante impresión 3D. El proceso de producción duró 7 días, con un peso de 21 kg y 4 metros, y un presupuesto de 7000€ Airbus consiguió un avión un 30% más ligero que los análogos que se ofertaban en el mercado. (C & C, 2024)

La siguiente revolución comenzaría con la entrada de la **impresión 3D en joyería**, industria, electrónica, construcción, medicina... pero la tecnología tenía un alto coste. Aunque se orientaba a la producción en masa, con la comercialización de la tecnología SLS, no fue hasta 2008 cuando se creó la **primera impresora autoreplicante**. Esto quiere decir que los usuarios de impresoras 3D no solo podían imprimir objetos, también podían producir sus propias piezas de impresoras, ensamblarlas y reparar componentes. Además se presentó Thingiverse, una plataforma para compartir diseños de forma gratuita entre usuarios. Funcionaría como apoyo soporte con la empresa RepRap, que ya llevaba 3 años democratizando el uso de la tecnología 3D ante el gran público.

En 2011 se orienta la **fabricación aditiva para la impresión en oro y plata**. La empresa Materialise ofreció un servicio de total personalización de joyas de alta gama con oro de 14 kilates y plata de ley mediante fundición a la cera perdida.



Esquema 3: Fundición a la cera perdida mediante tecnología SLA (I.Materialise, s. f.)

Tras esto, los avances han ido en constante progreso. En 2014 la Estación Espacial Internacional incorporó su primera impresora 3D capaz de crear objetos, con la finalidad de crear los objetos que consideren necesarios y usarla como herramienta de reparación. En 2015 se anunciaron las zapatillas Under Armour, diseñadas e impresas en

3D, con el propósito de ser de alto rendimiento. En ese mismo año, la empresa Heijmans planteó el primer puente de hacer impreso en 3D. en 2018 la primera familia se muda a una vivienda íntegramente hecha de hormigón impreso.

Actualmente la fabricación aditiva orbita entorno a la **fabricación aditiva en metal**, que cuenta con varios procesos de fabricación, por extrusión de metal, deposición directa manual, inyección de aglutinante y fusión de lecho de polvo. Entre sus ventajas, se encuentra la posibilidad de crear piezas de geometría compleja sin soldaduras, rápida, y el costo por pieza es consistente en volúmenes altos y bajos. Es un sector del que se espera una proyección de 3.000 millones de dólares en 2030. (Kauppila, 2024).

Los materiales más utilizados para esta técnica son: aceros inoxidables (17-4 PH, 316L, 304), aceros para herramientas (H13, A2, D2), aleaciones especiales (Inconel, cromo-cobalto y otras), titanio (Ti64), aluminio (4047, 6061, 7075) (*3D Printing Basics*, 2022).

No es posible poner un punto y final al desarrollo de la historia de la fabricación aditiva por medio de la impresión 3D ya que es una industria en constante renovación y desarrollo, con el desarrollo de nuevos materiales y técnicas. Destaca el revolucionario “*Freeform Multi-material Assembly Process (FMAP)*” que sería capaz de fabricar piezas de **diferentes materiales**, evitando la necesidad de ensamblar piezas tras el postprocesado. Según los ingenieros desarrolladores, esta técnica consiste en “integrar en una sola máquina tres métodos de fabricación distintos gracias a tres boquillas diferentes: la impresión 3D gracias a una boquilla de filamentos fundidos (FFF), la escritura directa de tinta (DIW) y la inducción por láser de forma libre (FLI), encargada de tallar formas y 'crear' nuevos materiales. (*No Assembly Required*, 2024)

3. Técnicas de fabricación en joyería

3.1 Técnicas de impresión 3D en joyería

La fabricación aditiva se ha empleado como un vehículo novedoso y revolucionario de cara al mundo del diseño. Permitiendo a sus creadores imponer sus normas y con pocas restricciones reales, como pasaba antiguamente con los productos manufacturados.

Es especialmente interesante en la industria de la joyería, donde el diseño y la creatividad son los dos pilares que sustentan su constante evolución. Además gracias a la libertad que otorgan las herramientas de modelado, como Solidworks, AutoCAD, PTC Creo y Rhinoceros (Rhino 3D); el negocio de la joyería personalizada y por encargo se ha vuelto un estándar en los pequeños negocios joyeros.

Las joyas se pueden obtener a través de un gran número de técnicas, como se desarrollará en este punto. Además, cuentan con una gran variedad de materiales con los que poder fabricarse, acero inoxidable, bronce o polímeros... Por ejemplo, derritiendo un lecho de polvo metálico mediante un haz de electrones se pueden conseguir piezas metálicas directamente. (Yap & Yeong, 2014)

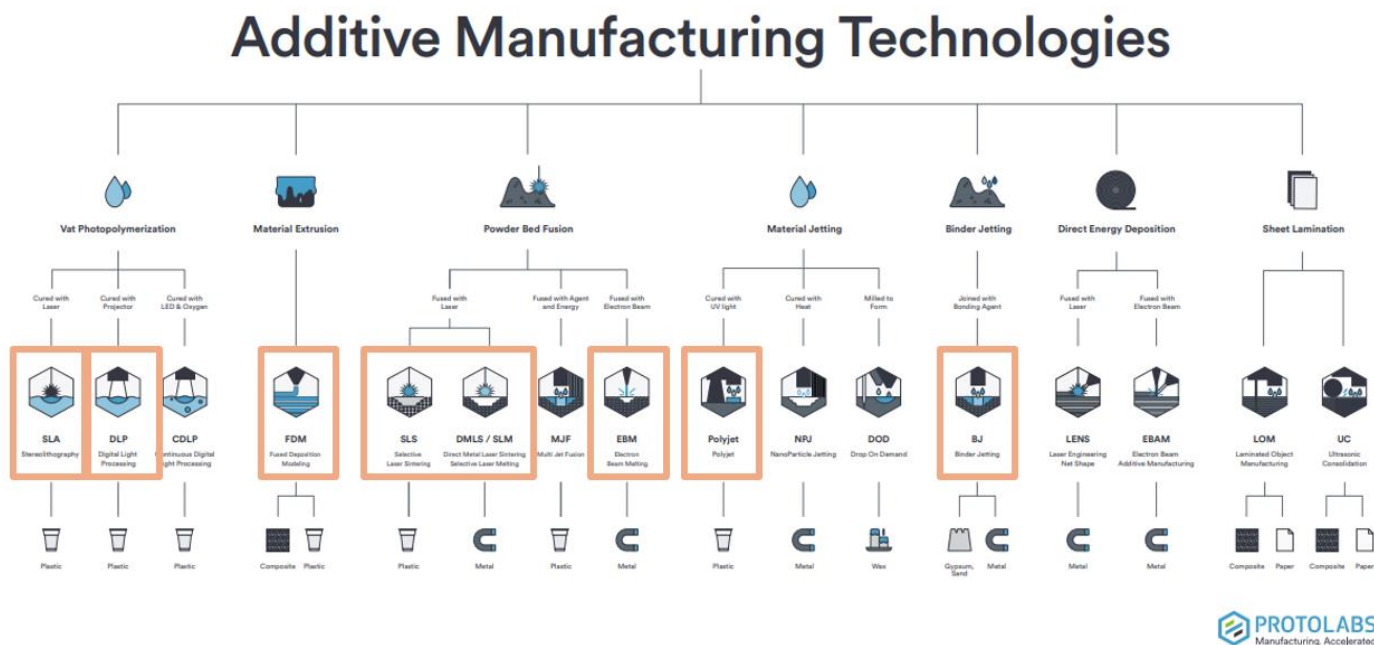
En primer lugar, se debe establecer la diferencia entre fabricación de piezas de joyería directa o indirecta.

- **Fabricación directa:** el producto final se obtiene tras la impresión 3D. Ejemplos de ello son el SLM o el EBM. Pueden requerir cierto nivel de postprocesado, y tiene unos costes mucho más elevados que la indirecta.
- **Fabricación indirecta:** tras la impresión 3D no se obtienen piezas finales, lo que se fabrican son patrones o modelos, los cuales suelen ser desechables. Habitualmente se emplean en fabricación a la cera perdida, pero también se pueden enfocar a producir directamente los moldes de fundición. Tiene precios competitivos, ya que los materiales son estándar y los procesos de fabricación están mucho más desarrollados.

- También se pueden producir piezas metálicas de forma mixta, mediante el **Binder Jetting**. Esta técnica consiste en la inyección de tinta sobre un lecho de polvo, depositando un aglutinante. Este polvo puede ser cerámico, metálico o plástico. Este aglutinante provoca que el material se unifique, hasta que se ha formado un modelo tridimensional. Tras esto, se retira el material sobrante, y se infiltra de metal fundido. Dependiendo de su uso, el cabezal puede depositar colorante en el aglutinante para obtener piezas a color, y en caso de modelos cerámicos, estos se deben recubrir de esmaltes. (Laboratorios 3d, 2021).

Empresas como ExOne o M-Print utilizan el método de fabricación mediante aglutinante para producir piezas completamente metálicas. La estereolitografía (SLA) produce tanto patrones como modelos para fundición, mediante procesamiento digital de luz (DLP) se generan modelos indirectamente orientados a la cera perdida.

(Yap & Yeong, 2014) Las técnicas indirectas utilizadas actualmente para la fabricación de piezas de joyería son las siguientes; ampliadas en el ANEXO 6:



Esquema 4: Tipos de impresión 3D con las comentadas subrayadas. (3D printing: What is it & how does it work?, Protolabs Network, s. f.)

- **Modelado por deposición fundida (FDM):** Es un proceso de fabricación a través del cual se extruye un material y se deposita a través de una boquilla. En primer lugar se carga una bobina del filamento termoplástico. En cuanto la boquilla alcanza la temperatura necesaria, la impresora extruye el material a través del cabezal y la boquilla. El cabezal está conectado a un sistema de orientación triaxial. Una vez el material se ha depositado, el material se solidifica.

Los materiales que se suelen utilizar son ABS, PLA y PLA flexible (ABS, acrilonitrilo butadieno estireno; PLA, ácido poliláctico), PET (tereftalato de polietileno), nailon y TPU (poliuretano termoplástico). En el caso de la joyería, se emplean ABS, PLA y PLA flexible.

Es la tecnología más utilizada en el mundo, y el proceso de referencia cuando se piensa en impresión 3D. (What is FDM (fused deposition modeling) 3D printing?, Protolabs Network, s. f.)

- **Sinterización selectiva por láser (SLS):** Este proceso pertenece a la familia de fusión de lecho en polvo. Se calienta un recipiente de polvo y la bandeja de construcción se mantiene a una temperatura inferior a la de fusión del polímero. Tras esto se extiende una capa de polvo sobre la bandeja. Con un laser de CO₂, se escanea el contorno de la capa siguiente, y se fusionan las partículas que aplican a la geometría cargada. Cuando termina este proceso, la plataforma se desliza hacia abajo, la altura de una capa de impresión, hasta que repitiendo este proceso, se termina la pieza. Tras la impresión, las piezas quedan recubiertas en polvo no fusionado, y deben esperar un tiempo considerable a ser extraídas.

Los materiales que utiliza este proceso son diversos, e incluso se les pueden añadir aditivos, como metales o fibras de vidrio. Materiales comúnmente empleados son Poliamida 12 (PA 12), Poliamida 11 (PA 11), y nailon reforzado. En joyería se emplea la poliamida. (What is SLS 3D printing?, Protolabs Network, s. f.)

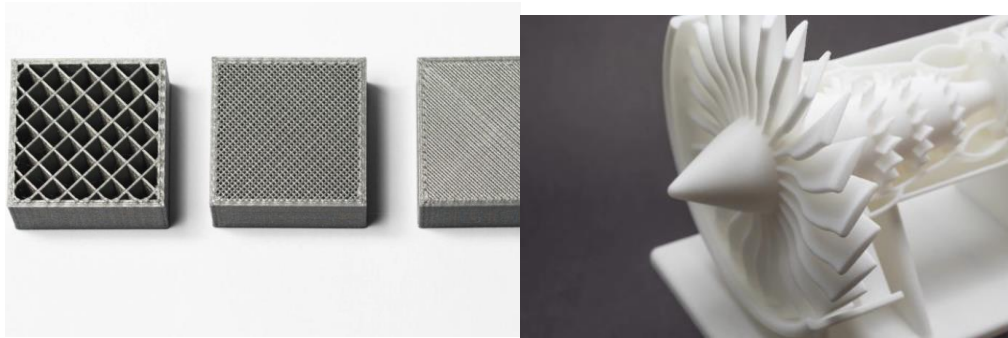


Imagen 12: Diferentes propuestas de rellenos de una pieza impresa por FDM. (What is FDM (fused deposition modeling) 3D printing?, Protolabs Network, s. f.)

Imagen 13: Pieza recién sacada del tanque de polvo tras el sintetizado. What is SLS 3D printing?, Protolabs Network. (s. f.). What is SLS 3D printing? | Protolabs Network. Protolabs Network. <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/>

- **PolyJet:** Este proceso se asemeja al funcionamiento de las impresoras convencionales. El material se inyecta a través de un cabezal, similares a los de la impresión 2D y descarga unas gotas fotosensibles, que ante la exposición de luz ultravioleta se solidifican. Cada a capa, la pieza se termina formando. Resultan piezas de suaves acabados y alta calidad. Hay una amplia gama de productos que puede utilizar como material base. Cuentan con la ventaja de que los soportes de impresión se realizan en un material soluble al agua, por lo que no quedan marcas en la pieza final, además de muchos acabados, ya que se puede elaborar en acabado brillante.

El proceso de impresión comienza con el calentamiento de la resina, para que pueda ser manipulable en la impresión. En el cabezal se depositan gotitas de resina sobre la plataforma de impresión. Tras una primera pasada del cabezal, estas gotas reciben un baño de luz UV, solidificando la impresión y creando las capas. Tras realizarse este paso, la plataforma se desliza hacia abajo, para permitir la siguiente impresión, y se repite este proceso.

A nivel de material, el PolyJet permite una amplia gama de opciones de resinas fotopoliméricas termoendurecibles, similares a las del SLA, pero con propiedades mecánicas inferiores. Una variación de esta tecnología son los DOD, Drop-On-Demand, que son unos cabezales utilizados en la industria de la

joyería que exclusivamente se usan para elaborar patrones de fundición en cera.
(What is Material Jetting 3D printing?, Protolabs Network, s. f.)



Imagen 14: Figura fabricada con PolyJet. Se aprecia el cambio de superficie brillante a mate. (What is Material Jetting 3D printing?, Protolabs Network, s. f.)

- **Estereolitografía (SLA):** El SLA es la técnica más influyente en este proyecto. Como introducción, el SLA pertenece a la familia de fotopolimerización en cuba, la cual se distingue por curar la resina con luz ultravioleta. Es la tecnología más adecuada si el objetivo es llegar a piezas de alta precisión y buen acabado. La impresión en SLA funciona colocando una plataforma o bandeja a la distancia de una capa de la superficie del líquido. El líquido es la resina, que se aloja en una cuba. Cuando la bandeja toca la resina, un láser UV traza una sección del objeto, solidificando la capa que se debe adherir a la bandeja. En la fotopolimerización se da un proceso en el que las cadenas de carbono que forman la resina se activan, y crean enlaces muy fuertes, dando rigidez y estructura a la pieza. Dependiendo del uso, puede necesitar postprocesado. Los materiales utilizados son resinas líquidas, que en función de su uso pueden tener un precio más elevado. Generalmente tienen una resistencia baja, es por ello que se utilizan para modelos y prototipos, y no productos finales. (What is SLA printing? The original resin 3D print method, Protolabs Network, s. f.)

- **Procesamiento por luz digital (DLP):** Este proceso, similar al SLA, utiliza una imagen proyectada en el fotopolímero de la cuba. Se necesita un archivo STL que el programa de tratamiento de la impresora divide en capas. Estas capas se proyectan sobre la cuba y se curan homogéneamente, a diferencia del SLA, que se debe trazar la línea de cada capa. Son apreciadas en el mercado por su efectividad y su alcance, obteniendo un grado alto de calidad, pero no extendidas, ya que en favor de la velocidad con la que consiguen obtener las piezas, sacrifican la precisión; además de emitir olores perjudiciales para la salud. (*¿Qué Es el Procesamiento Digital de Luz (DLP)?*, 2023)

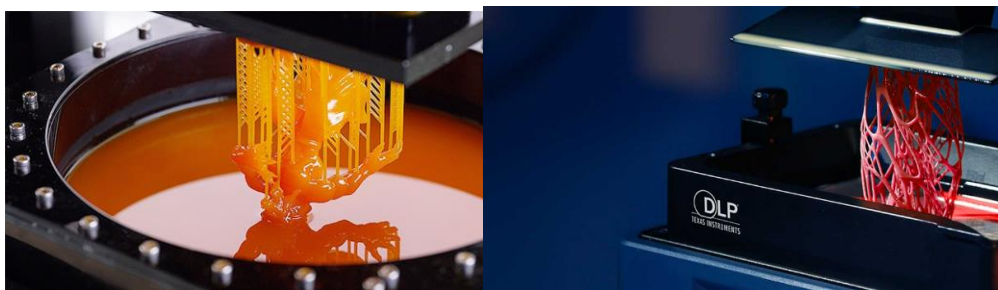


Imagen 15: Pieza impresa en SLA recién salida de la cuba. (P & P, 2022)

Imagen 16: Pieza obtenida de impresión DLP. (Productos Para Impresión 3D E Imagen Directa | TI.com, s. f.)

Habiendo revisado todas las tecnologías de fabricación indirecta, las técnicas directas utilizadas actualmente para la fabricación de piezas de joyería son las siguientes:

- **Fusión selectiva por láser (SLM o DMLS):** Es uno de los nombres con los que se denomina al proceso que trata de una deposición directa de energía en el que se potencia la energía térmica para fusionar materiales, fundiéndolos a medida que se depositan. Está fuertemente relacionada con el SLS pues ambas tecnologías utilizan lecho de polvo y unen este polvo mediante láser. El SLM emplea el láser para fundir polvo metálico. Se introduce un archivo STL que el propio programa se encarga de dividir en capas. Al ser una fundición metálica, el ambiente está exhaustamente controlado, con un 1% de oxígeno y el resto de la cuba se rellena de gas inerte. Esto se hace para prevenir riesgo de incendio, evitar la oxidación y facilitar el proceso de fusión. Aunque el DMLS y el SML

se confunden por el mismo tipo de fabricación, ya que en rasgos generales funcionan igual y el producto final es el mismo, en el DMLS el polvo metálico no se funde, es un proceso que requiere menos energía que el SLM que sí funde el metal. Por sus características, el DMLS tiene la capacidad de producir piezas muy resistentes y precisas ($\pm 0,05$ mm). (Manufacturing explained: direct metal laser sintering (DMLS), Protolabs Network, 2020)

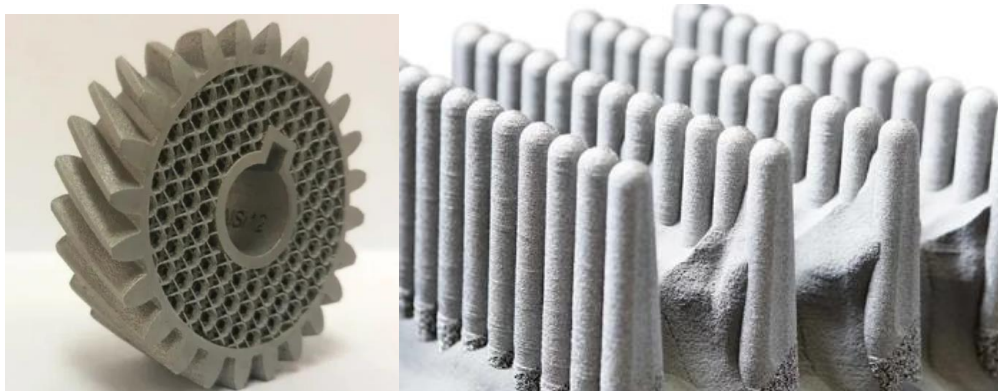
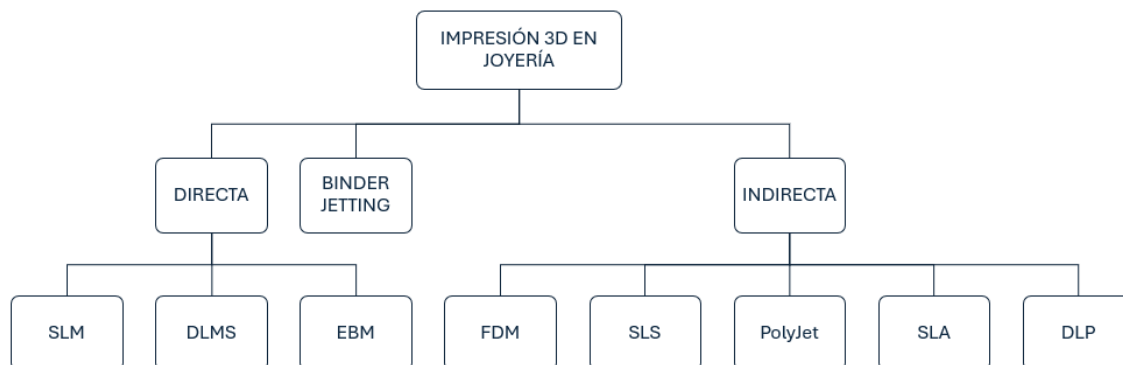


Imagen 17: Engranaje fabricado con tecnología SLM. (Zeal 3D Services, 2024)

Imagen 18: Impresión en tecnología EBM. (The Complete Guide To Electron Beam Melting (EBM) In 3D Printing, 2022)

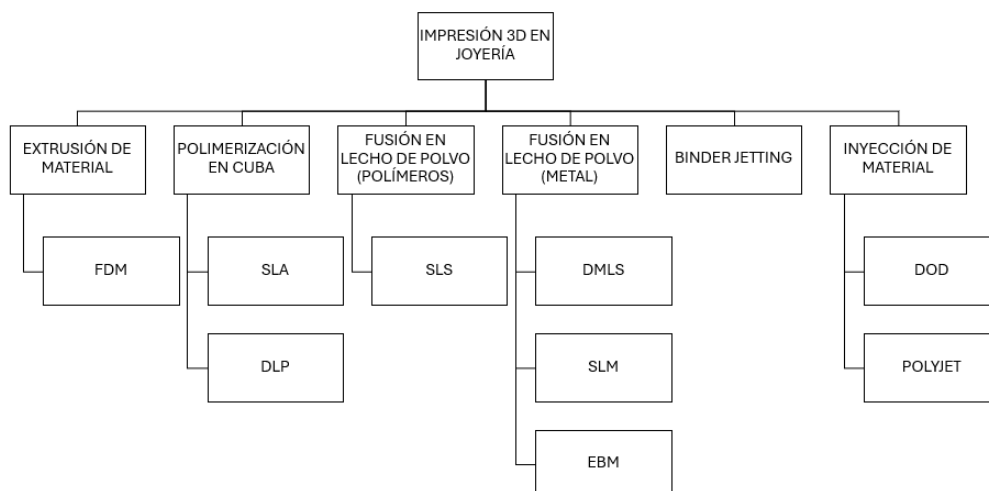
- **Fabricación aditiva mediante haz de electrones (EBM):** este tipo de fabricación aditiva está orientada a la fabricación de piezas metálicas, siendo la materia prima el metal, y así como el SLM usaba un láser, el EBM emplea un haz de electrones para fusionar el polvo metálico. La fabricación es análoga al SLM y salvando las distancias, el SLS. Este proceso se lleva a cabo inundando la cubeta con gases inertes, para evitar su reacción con el oxígeno, esto además evita que los granos de polvo se oxiden al calentarse, por lo que se puede reutilizar prácticamente todo el polvo sobrante del proceso. Muchas de las piezas producidas por EBM deben recalentarse para liberar las tensiones internas después de la fabricación. Esta tecnología se emplea en implantes y en elementos aeronáuticos, ya que está sobre todo enfocado a la manipulación de titanio (por su biocompatibilidad) y otras aleaciones. Diferentes grados de acero, así como aluminios, vidrio metálico o cobre se han adaptado para esta tecnología.

Estas son las diferentes tecnologías que se emplean en la industria para la fabricación de joyería, sin olvidar el mencionado Binder Jetting.



Esquema 5: Diferentes tecnologías empleadas en la fabricación de joyería. (Elaboración propia)

Así como la tecnología SLA y DLP son las más extendidas en la industria, tecnologías de fabricación directa (SLM, DLMS, EBM) son menos comunes, o se usan solo como línea de investigación en el área de la joyería debido al alto coste inicial y de producción. Adicionalmente el interés en imprimir en metal objetos que no están sometidos a trabajo es bajo. Tecnologías como el FDM, que es la más común y extendida, acerca al usuario común a la tecnología 3D y permite elaborar diseños propios, de baja precisión y calidad baja. El SLS, por ejemplo, se enfoca en ser un elemento de núcleo para pasar a ser recubrimiento, o un patrón con el que se hagan moldes, no es una tecnología susceptible a pasar por fundición a la cera perdida.



Esquema 6: Diferentes tecnologías de fabricación de joyería en función de sus procesos de impresión (Elaboración propia)

No todas las tecnologías de impresión son válidas para la fabricación de piezas de joyería finales, pues están enmarcadas en un marco teórico que confirma su viabilidad en impresión, pero no su practicidad.

Es por ello que el SLA es la mejor tecnología para producir piezas de pequeño tamaño y complejas en fundición a la cera perdida. (Jimenez Calzado & Álvarez Hernández, s. f.)

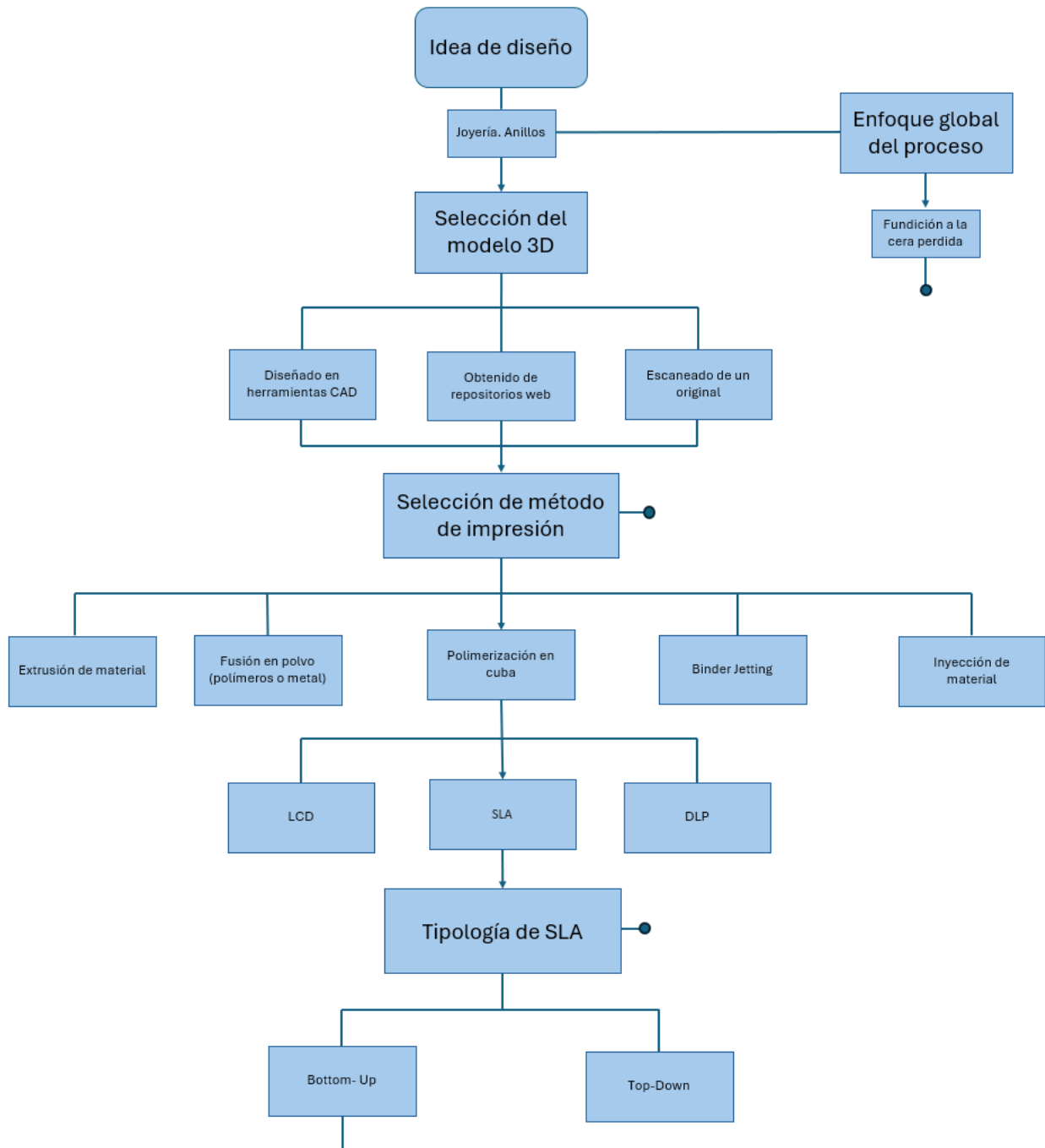
Por último, según Formlabs, esta es la comparativa entre FDM, SLA y SLS.

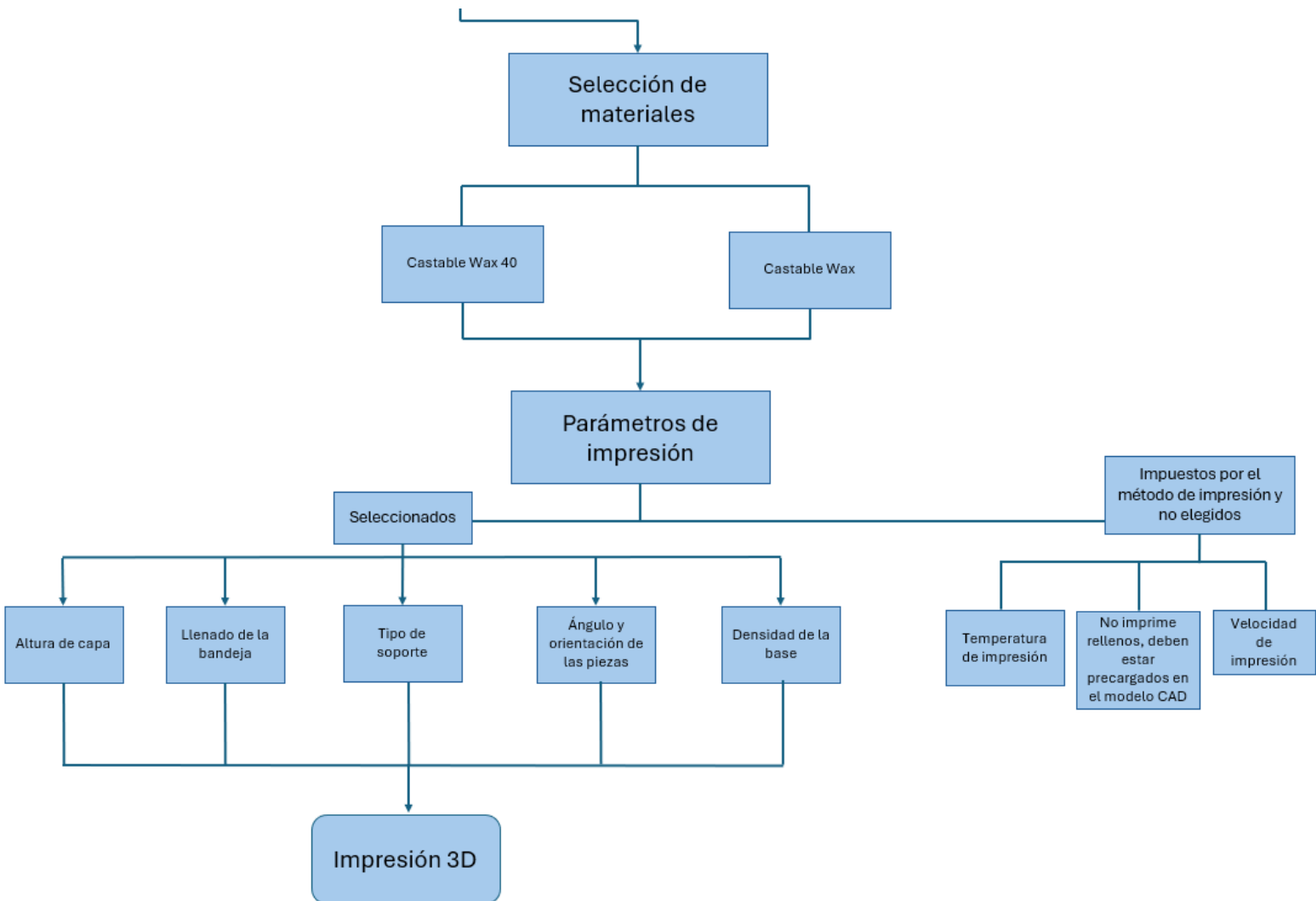
	MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)	ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA)	SINTERIZADO SELECTIVO POR LÁSER (SLS)
Resolución	★★☆☆☆	★★★★★	★★★★☆
Precisión	★★★★☆	★★★★★	★★★★★
Acabado de la superficie	★★☆☆☆	★★★★★	★★★★☆
Rendimiento	★★☆☆☆	★★★★☆	★★★★★
Diseños complejos	★★☆☆☆	★★★★☆	★★★★★
Facilidad de uso	★★★★★	★★★★★	★★★★☆

Tabla 2: Comparativa entre FDM, SLA Y SLS (Comparación de Tecnologías de Impresión 3D: FDM, SLA o SLS, s. f.)

3.2 Impresión en estereolitografía

3.2.1 Metodología de la impresión en SLA en el proyecto





Esquema 7: Diagrama de fabricación en SLA en el proyecto (Elaboración propia)

3.2.2 Marco teórico de SLA

La tecnología del SLA (se suele emplear como término paraguas para la **estereolitografía**) es la más idónea para la fabricación de piezas de joyería, como se ha concluido en el apartado anterior, no solo por la exactitud con la que produce las piezas, si no por su resolución y velocidad. La estereolitografía es el método de impresión 3D por excelencia a la hora de elaborar piezas de pequeñas dimensiones, isotrópicos y alta precisión. (*Guide To Stereolithography (SLA) 3D Printing*, s. f.) (Jimenez Calzado & Álvarez Hernández, s. f.)

3.2.2.1 SLA, DLP y LCD

La tecnología SLA pertenece a al área de fabricación aditiva de fotopolimerización en cuba; y de esta familia se emplean tres categorías. La diferencia entre las tres es el método de curado de la resina:

- **SLA:** emplea **láseres de luz ultravioleta** que trazan la figura que se desea curar en la resina polimérica. Esta forma de curado es lenta, pero da resultados de mayor precisión que el resto.
- **DLP:** como se ha desarrollado en el punto anterior, el DLP emplea un **proyector como luz ultravioleta** para curar la resina en la que incide. Es decir, en lugar de trazar líneas poco a poco como la SLA, el DLP proyecta la capa y la cura simultáneamente.
- **LCD:** esta tecnología se llama pantalla de cristal líquido. Su forma de imprimir las capas es análoga al DLP, pero una **pantalla LCD filtra la luz UV**, no se emplea en joyería.

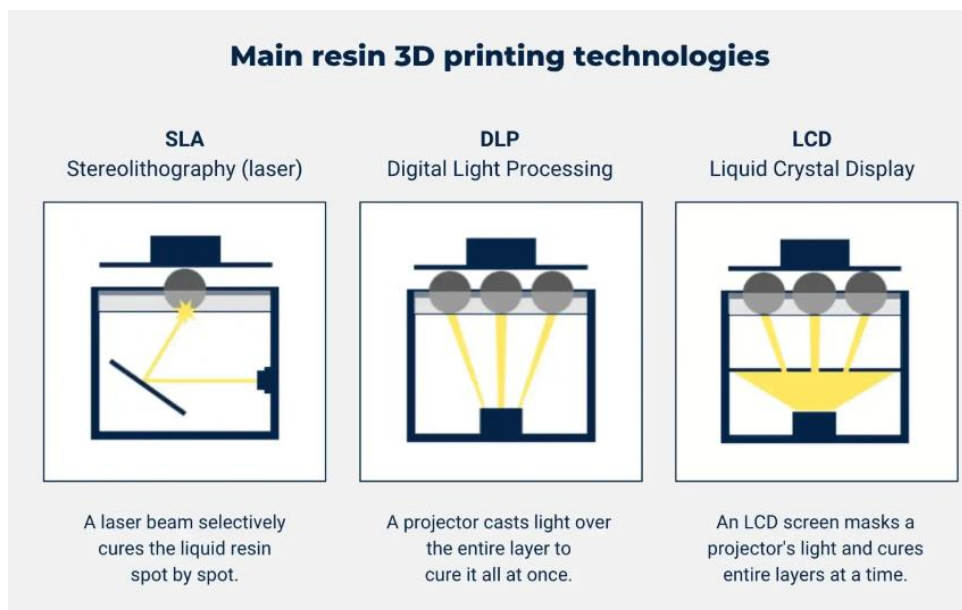


Imagen 19: Tecnologías de impresión 3D en fotopolimerización en cuba. («3D Printer Technology: What Are The SLA, DLP And LCD?», 2024)

3.2.2.2 Bottom-up y top-down

La tipología de las impresoras SLA se distingue según si imprimen **desde arriba “bottom-up”** o **desde abajo “top-down”**. La diferencia entre las que imprimen desde arriba o desde abajo es dónde se sitúa el haz de luz UV; si es desde arriba, este haz

incide sobre la resina directamente, si es desde abajo, incide en la resina a través de la bandeja de impresión. Las más utilizadas actualmente son las que imprimen desde abajo, porque suponen una ventaja respecto a las otras.

- Se requiere menos resina para llenar el tanque, por lo que supone un ahorro en compra de material.
- Los tanques “bottom-up” se consideran un beneficio pasivo de las empresas fabricantes de máquinas SLA, ya que tiene un alto desgaste, así como las bandejas, por lo que se requiere un recambio relativamente frecuente para garantizar una impresión adecuada.
- Al tener tanques más pequeños, las impresoras “bottom-up” son más pequeñas que las “top-down”, y requieren un número menos de piezas mecánicas. (Frey, 2017)

Cabe mencionar que las impresoras “bottom-up” tienen una gran desventaja ante las que imprimen desde arriba, requieren un paso de “pelado” entre capas, para construir la siguiente capa se debe separar la pieza en construcción del fondo del tanque. Análogo a las SLS que con cada pasada, la bandeja de impresión desciende una capa para curar la siguiente capa, las SLA bottom-up aumentan una capa. Hacen de este proceso más lento que las “top-down”, que curan las piezas en pasadas rápidas ante la exposición del haz de luz. (Frey, 2017)

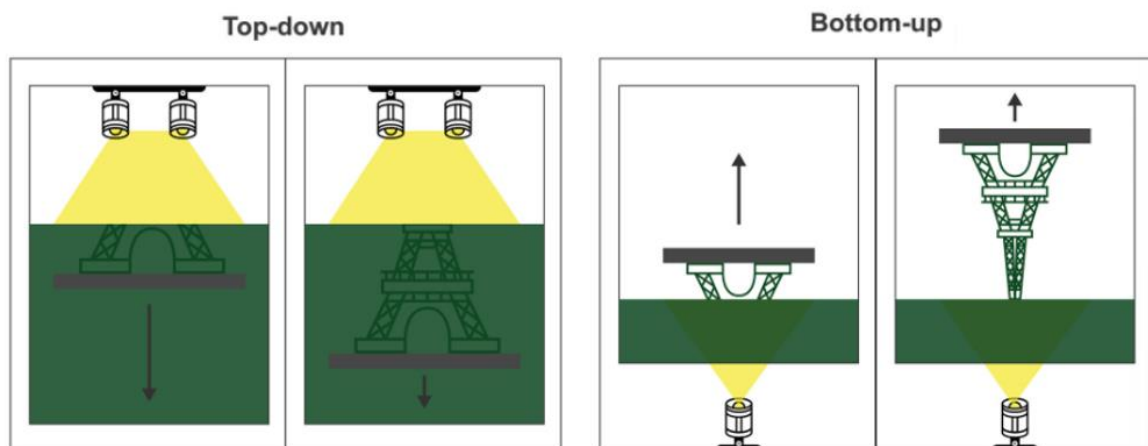


Imagen 20: Esquemas de impresoras en SLA bottom-up y top-down. (Carima, 2021)

3.2.2.3 Características del SLA

Los **criterios de posicionamiento de los apoyos** de las piezas finales son diferentes. En las que imprimen desde arriba, se intenta **minimizar el soporte**, mientras que en las que imprimen desde abajo se intenta **minimizar la sección transversal**. Esto es para evitar el desprendimiento de la pieza en la cubeta por las fuerzas aplicadas en la pieza cuando esta se eleva una capa cuando ha terminado un ciclo de curado. Por ello la orientación de las mismas es crucial en estos procesos. Se suelen imprimir con un ángulo de entre 30° y 45° respecto del plano principal de la pieza.

Los objetos fabricados en SLA tienen propiedades **isotrópicas**, esto quiere decir que sus propiedades mecánicas y térmicas son las mismas en todas direcciones. Esto se debe a que con la superposición de pasadas del láser UV sobre la resina, las capas tienen un grado de fusión muy alto, por lo que el objeto final se comporta como un sólido, no como una adhesión de cientos de pequeñas capas. Con los postprocesados, como el curado y el lavado final, la pieza se vuelve más dura y resistente, a la par que frágil. La **resistencia** tras un curado en luz UV suele aumentar al doble, y el **alargamiento a rotura** pasa a ser de casi el 50%. No todas las resinas necesitan curado con luz UV, como se verá en este proyecto; pero es habitual pasarlas por un baño ultravioleta.

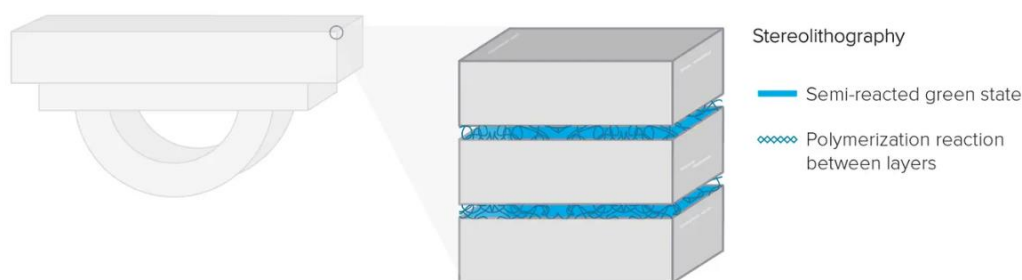


Imagen 21: Curado de una pieza por SLA tras la superposición de baños de luz UV. Isotropía.

(Validación de la Isotropía En la Impresión 3D Por Estereolitografía (SLA), s. f.)

Por finalizar con las impresoras bottom-up y top-down, cabe mencionar que las “bottom-up”, impresión desde abajo, son impresoras consideradas de escritorio, no de fabricación industrial. Su precisión dimensional varía entre ambas, siendo:

- **Precisión bottom-up:** $\pm 0,5 \%$ (límite inferior: $\pm 0,010$ – $0,250$ mm).
- **Precisión top-down:** $\pm 0,15 \%$ (límite inferior $\pm 0,010$ – $0,030$ mm).

(What is SLA printing? The original resin 3D print method, Protolabs Network, s. f.)

Las impresoras SLA bottom-up fueron desarrolladas por el laboratorio FormLabs en 2011 por los cofundadores Max Lobovsky, David Cranor y Natan Linder, con la idea de mejorar el proceso de curado y el método de impresión. Tras este avance, desarrollaron tanques de resina transparentes y flexibles, que reducían las fuerzas que sufrían las piezas al separarse de la superficie de la resina.

El funcionamiento de la impresora se desarrollará en el siguiente apartado del proyecto, ya que se explicará la utilizada en el proyecto: Formlabs Form3 SLA con tecnología FLS bottom-up.

Respecto a los materiales que se emplean, se trata de **resinas líquidas**. Con una variación notable entre los precios de las mismas, llegando a costar hasta 400€ el litro. Dependiendo de la industria a la que se oriente, el precio es más elevado. En función de la tecnología de impresión, la forma de curado es diferente, por ejemplo las resinas para LCD requieren de una **longitud de onda UV** superior a la SLA. Las resinas dentales son las más costosas, y tienen características biocompatibles, en cambio, las resinas transparentes requieren un postprocesado para obtener su cualidad transparente.

Esta es la gama de resinas que existe en el mercado, dependiendo de la fuente a consultar, este listado es susceptible a variaciones. (Impresoras3d.com, 2021)

- **Resina Estándar:** se emplea para prototipos y decoración, es la que mayor variedad ofrece, suave al tacto, con acabado listo y fácil de lijar.
- **Resinas Dentales:** son las más costosas de producir, y están en constante desarrollo. Es una tecnología relativamente nueva. Además de ser biocompatible, tiene alta resistencia a la abrasión.
- **Resinas Flexibles:** imitan el caucho, y están basadas en el comportamiento de los materiales TPU y TPE en la impresión FDM. Tienen menos precisión dimensional y bajo coste, por lo que es una resina ideal para pruebas. Sus propiedades son similares a la goma, y como pieza final se puede emplear en

amortiguación. Actualmente hay una línea de desarrollo de combinación de resinas flexibles y elásticas.

- **Resinas Industriales o Resistentes:** estas resinas son producto de los avances en las tecnologías de SLA, DLP y LCD. Tienen características similares al ABS, y propiedades mecánicas excelentes. Se reducen costes y aumenta la velocidad de producción.
- **Resinas Resistentes a Altas Temperaturas:** son empleadas en piezas mecánicas de alto rendimiento, debido a su alta capacidad al desgaste. Se utilizan en herramientas fabricadas por moldeo de inyección, o en circulación de fluidos a alta temperatura.
- **Resinas lavables al agua:** tienen las mismas propiedades que las estándar pero una vez se saca la pieza del tanque, no es necesario lavarlas en alcohol isopropílico, si no en agua. Destacan por su baja viscosidad, poco olor y acabado seco.
- **Resinas de Alto Detalle y Transparentes.**
- **Resinas Calcinables:** son las empleadas en joyería. Las resinas calcinables, también denominadas “castables” están hechas a base de cera y se emplean en este área porque son capaces de quemarse sin dejar residuos ni cenizas, dejando un molde en el revestimiento perfecto para el colado de una pieza compleja. Como son de alto detalle, el modelo producido es capaz de producir piezas sin imperfecciones y duraderas. En el mercado existe una amplia gama de esta resina calcinable, y la variación de precios queda reflejada en la precisión del objeto final.

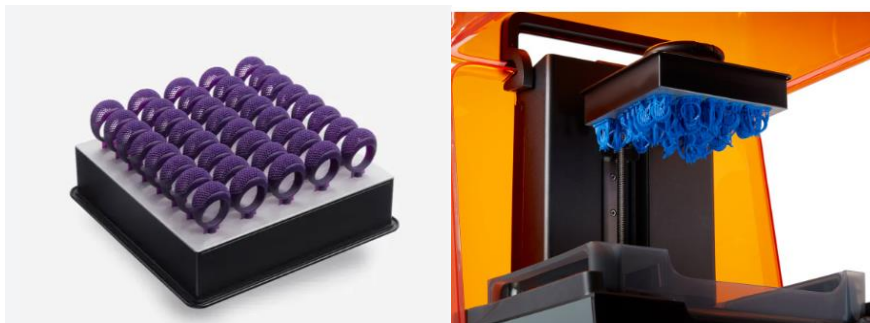


Imagen 22: Anillos impresos en resina calcinable sobre plataforma Formlabs. (Castable Wax Resin, s. f.)

Imagen 23: Piezas de resina calcinable en plataforma bottom-up Formlabs (Castable Wax 40 Resin, s. f.)

Las resinas empleadas en este proyecto se desarrollarán en el siguiente punto.

Las ventajas de la impresión 3D en SLA son:

- Alta precisión.
- Impecable acabado superficial.
- Variedad de materiales.
- Velocidad.
- Baja deformación.
- Bajo desperdicio.
- Alta resolución.

Como desarrollo sobre las anteriores ventajas descritas, la precisión y su resolución dependen del fabricante de la resina y la impresora, así como su velocidad. Cada fabricante desarrolla su propia tecnología de cara a mejorar el acabado final del producto.

La variabilidad de materiales depende del área a la que se oriente su uso, ya que existe un amplia gama de resinas estándar, pero las dentales son mucho más específicas.

La deformación de la resina es baja, casi nula; pero habitualmente se da el fenómeno de rizado. El **rizado** es un fenómeno que se da en el proceso de curado en el que la pieza se encoje ligeramente por los contornos a exponerse a la luz UV. Cuando el rizado es considerable, se producen tensiones internas en la pieza que terminan rompiéndola, es por ello que los soportes son de vital importancia para evitar este fenómeno. El rizado también se puede dar con la exposición directa al sol. Otra deformación que se suele dar

es el sobrecrecimiento, que ocurre cuando se polimerizan partes de resina por exposición indirecta a la luz UV. Esta resina realmente son adhesiones a la pieza final de líquido sobrante.

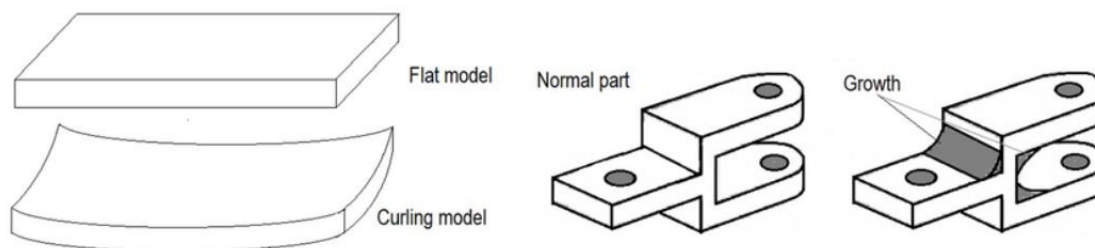


Imagen 24: Rizado y sobrecrecimiento en fotopolimerización. (Minev & Minev, 2016)

Respecto al **desperdicio**, la resina líquida sí es reutilizable, toda aquella que quede en el tanque sin fotopolimerizar, se puede emplear en otros usos. La resina ya fotopolimerizada que puede restar, debido a malas impresiones, colocación deficiente de los soportes de impresión, o los propios soportes una vez se ha limpiado la pieza **no** son **reutilizables**.

La resina fotopolimerizable funciona de la siguiente manera: diferentes longitudes de onda penetran en la resina. Los radicales, que son unas **moléculas fotoiniciadoras**, inician la polimerización mediante un crecimiento en cadena. Este crecimiento se da por el ataque a los **dobles enlaces a moléculas de monómero**. Las siguientes reacciones forman una red de polímeros y finalmente el objeto final. Las propiedades mecánicas de la resina se las atribuyen aditivos y estabilizadores, así como pigmentos que contribuyen al desempeño final de la resina. (Kočí, 2022)

Este proceso es **irreversible**, si se intentase volver a fundir, las partes se quemarían, es por ello que la resina una vez curada no es reutilizable.

Las desventajas de la impresión 3D SLA son:

- Fragilidad.
- Degradación ante la exposición a rayos UV.
- Necesidad de estructuras de soporte.

- Manipulación complicada, debido a la posible toxicidad, viscosidad y alta adherencia.
- Pobre funcionalidad, ya que no sirve habitualmente para producir piezas finales.
- Posible postcurado.

La información de este apartado ha sido tomada de (What is SLA printing? The original resin 3D print method, Protolabs Network, s. f.), que sirve como fuente principal del texto, así como Kočí, J – (*Todo lo que siempre quisiste saber sobre las Resinas e Impresión en SLA segura - Original Prusa 3D Printers*) y los laboratorios Formlabs.

3.2.3 Impresora y resinas empleadas en el proyecto

3.2.3.1 La impresora: Form 3

La impresora empleada en el desarrollo de este proyecto ha sido la **Form 3**, una impresora de estereolitografía SLA, desarrollada por Formlabs. En su año de lanzamiento, esta impresora siguió la estela que había distinguido a la empresa de las del resto del mercado por su modo de funcionamiento, bottom-up, lo cual fue una revolución en el sector de la impresión SLA. Además se distinguía por su LPU (unidad de procesamiento de luz).

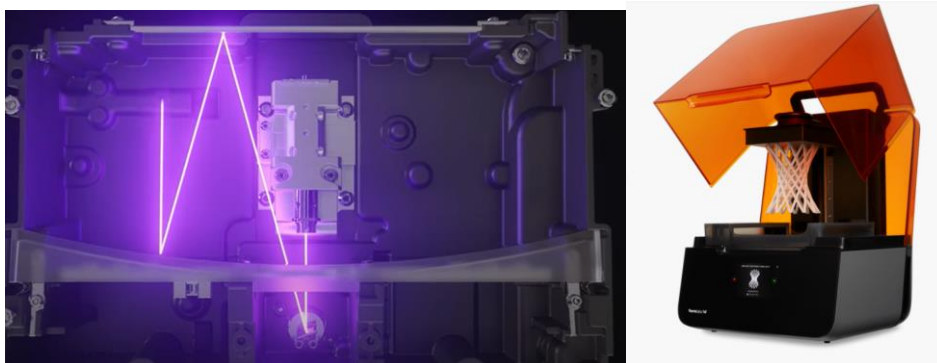


Imagen 25: Sistema LPU de la Formlabs 3. (Formlabs, 2019)

Imagen 26: Formlabs Form3. (Paquete Básico Form 3, s. f.)

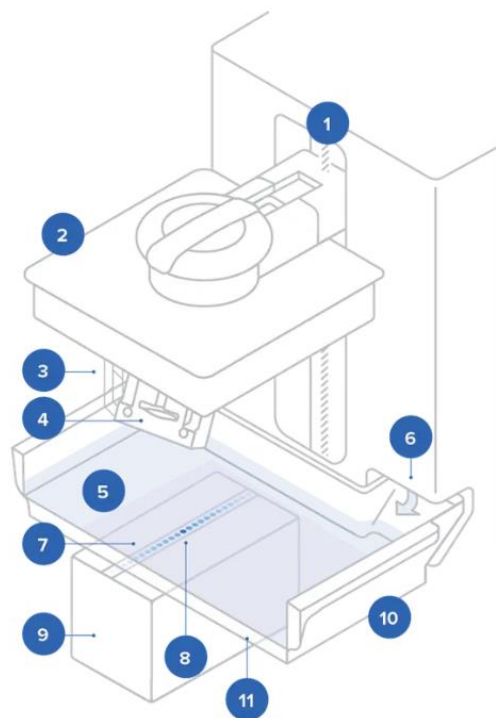
La Form 3 además cuenta con una tecnología desarrollada por la propia empresa en la que emplean la **estereolitografía de baja fuerza (LFS)**, que supone una revolución en la orientación previa del láser. Con una trayectoria extendida, se garantiza que la manera de impactar el rayo en la resina sea totalmente perpendicular, procurando una calidad homogénea en todo el contorno de la capa. La unidad de LPU se mueve en ejes X e Y, y cuenta con un potente sistema de amortiguamiento, evitando vibraciones, que es un gran problema de la impresión 3D por SLA. (Mensley, 2020). Consultar vídeo (Formlabs, 2022).

No solo cuenta con los ya mencionados sistemas de estereolitografía de baja fuerza (LFS, Low Force Stereolithography™) y la **unidad de procesamiento de luz (LPU, Light Processing Unit)**; además contiene sistemas de control inteligente, manipulación automática de la resina, y un tanque flexible. La velocidad de impresión es de 31mm

por hora. El volumen de impresión es de 4,05 litros; y el área de la bandeja de impresión es de 210 cm². Está diseñada para funcionar en un entorno de entre 18 y 28°C y pesa 17,5kgs. Puede imprimir resoluciones de capa de hasta 25µm.

Entre las características de la impresora, cabe mencionar el sistema de **calentamiento de la resina en el tanque**, ya que antes de empezar a imprimir mediante láser, debe calentarse hasta unos 35°C. Este proceso se hacía mediante una cámara de aire. Una vez se termina una impresión, la Formlabs 3 mantiene durante 30 minutos la temperatura a la espera de introducir un nuevo elemento de impresión. (*Compara las Especificaciones Técnicas de las Impresoras 3D SLA de Formlabs, s. f.*)

Actualmente la hoja de características de impresoras Form 3 no está fácilmente al alcance ya que la empresa está orbitando a un tipo de impresión diferente, la Estereolitografía enmascarada (MSLA), y estas impresoras las están descatalogando.



Esquema 8: Elementos de una impresora Form 3. (SLA Vs. DLP Vs. MSLA Vs. LCD: Guía de Impresoras 3D de Resina, s. f.)

Como se puede ver en la imagen superior, las **partes** son:

1. Sistemas de control
2. Plataforma de trabajo. Sobre ella se adhiere magnéticamente una plancha en la que se imprimen las piezas.
3. Soportes de piezas impresas
4. Pieza impresa en resina
5. Resina.
6. Dispensador de resina. Detrás del mismo se introducen los cartuchos de resina. Cuando cae, llena el tanque.
7. Plataforma del láser.
8. Rayo láser.
9. Unidad de procesamiento de luz, LPU.
10. Tanque de resina, el cual es retirable. A la hora de trabajar con diferentes resinas, cada una tiene su propio tanque, el cual se debe guardar cuidadosamente para su posterior reutilización.
11. Película a través la cual pasa el láser, es transparente y facilita la fotopolimerización.

Los siguientes pasos corresponden al funcionamiento de la impresora:

1. En primer lugar se cargan en el software de Formlabs, **Preform**, las piezas que se quieren imprimir, y se seleccionan una serie de **parámetros**, como la altura de capa, la resina que se va a utilizar, y se colocan en la bandeja. Se deben tener en cuenta parámetros como la inclinación de la figura, la cantidad de soportes o la disposición de las piezas en la bandeja, para que sea más **eficiente**.



Imagen 27: Ejemplo de cómo colocar las piezas en Preform. (Elaboración propia)

2. Se debe introducir el **cartucho de resina** en la impresora. La resina debe ser seleccionada en base a unos criterios, como su flexibilidad, dureza o si es calcinable.

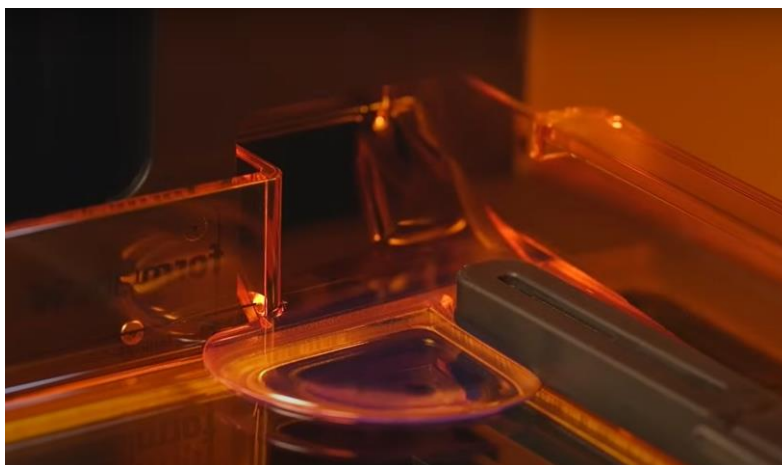


Imagen 28: Llenado de un tanque Formlabs. (Formlabs, 2017)

3. **Descarga de las piezas** en Preform a la impresora.
4. La plataforma de impresión está en la parte superior de la impresora, por lo que **la plataforma desciende** y se sumerge en la resina.
5. Una primera capa fotopolimerizada **se traza con un láser UV**, en este caso con el sistema LPU, y **se polimeriza la primera capa** de la base de los modelos. En este paso una pequeña capa sólida con la sección de la base se ha generado a través de la polimerización de las cadenas de carbono.
6. La plataforma se eleva al menos unos 1cm, y la parte de impresión se retira del fondo del tanque. En este paso, una **pala agitadora** renueva la resina de la parte superior del tanque, para que no se genere **estanqueidad** en el líquido. **Desciende** hasta quedar a una **distancia de una capa de la resina**.

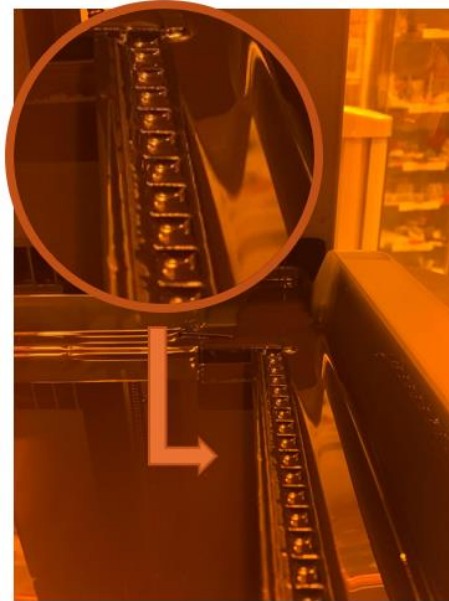
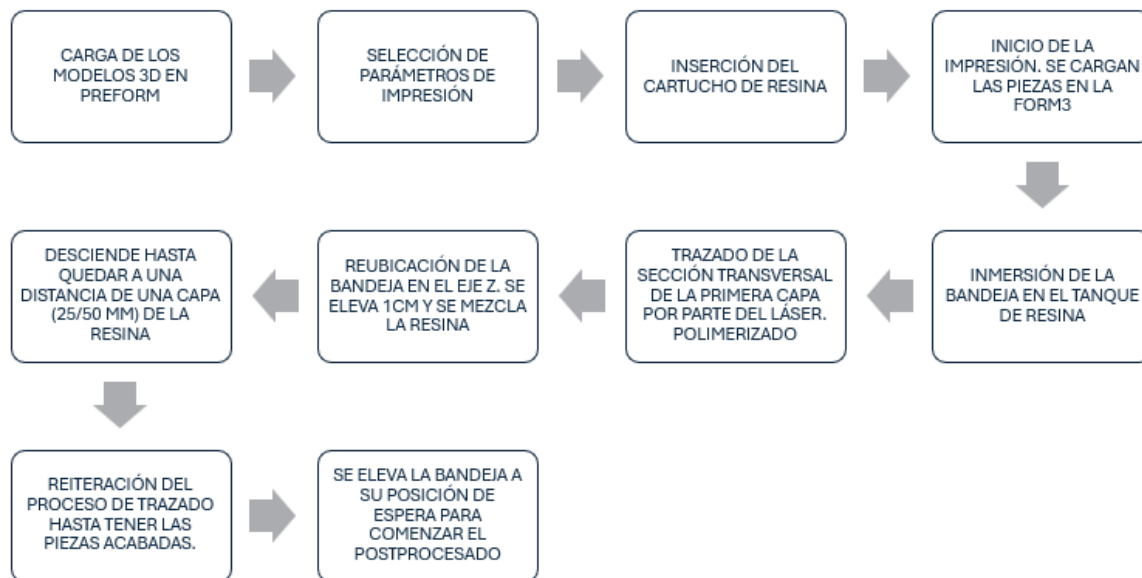


Imagen 29: Detalles de la placa agitadora del tanque. (Formlabs, 2017)

7. Se repite el 5º paso, el sistema LPU traza la sección de una capa sobre la primera capa ya impresa. En este caso **se adhieren las resinas previas**, y el haz de luz residual termina la polimerización.
8. Este proceso es cíclico hasta que terminan de imprimirse las piezas. Una vez terminadas, la plataforma **sube hasta su posición más alta** y espera su recogida. Pequeñas gotas de resina no polimerizada pueden caer al tanque. En este paso, las piezas no se aprecian como precisas debido a que necesitan un lavado posterior que retire esta resina líquida.
9. Con un leve toque las piezas deberían **separarse de la bandeja extraíble**, y pasa a lavado. Dependiendo de sus características, se lavan con agua, o alcohol isopropílico.
10. Muchas resinas necesitan un **postprocesado** con luz ultravioleta si requieren propiedades mecánicas o térmicas exigentes.



Esquema 9: Esquema básico de funcionamiento de una impresora de SLA. (Elaboración propia.)

3.2.3.2 Las resinas

Las **resinas** empleadas en este proyecto son especializadas en joyería, **calcinables**, de marca Formlabs. En la tecnología SLA no se ha “democratizado” el uso de resinas, es decir, aunque existen resinas genéricas, las propias impresoras no detectan otras que no sean de su propia marca. Por otro lado, es preferible utilizar resinas especializadas, ya que son garantía de calidad y buen desempeño. Resinas como las dentales o las de alta resistencia e ingeniería no van a sufrir la misma demanda y exigencia que un filamento extruido de FDM casero.

La empresa tiene un amplio catálogo de resinas y polvos, fácilmente seleccionables según su uso, si son para SLA o SLS, si son dentales, para ingeniería, uso médico, joyería...

Actualmente Formlabs dispone de cinco modelos para joyería, de los cuales dos son los que se pueden utilizar en el proyecto:

- Resina gris V5
- Resina gris V4
- Resina de alta temperatura
- **Resina de cera moldeable; Castable Wax**
- **Resina de cera 40 moldeable; Castable Wax 40**

De todas estas, las dos últimas son “*castables*” es decir, calcinables. Estas resinas están ideadas para ser quemadas y que la cera se disuelva y otros componentes se volatilicen en el proceso de horneado. Las resinas calcinables son de alta resolución, llegando a alcanzar **25µm**. Tienen acabados limpios, sin dejar residuo, como se comentará en próximos apartados. Las dos ramas de la fabricación que más las emplean son la odontología y la joyería.

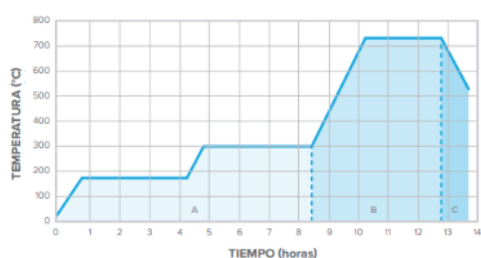
La **Castable Wax 40** (resina de cera 40 moldeable) está diseñada especialmente para piezas de joyería. Es un material con un 40% de cera. Está enfocada a la impresión de **joyas pesadas, con relieves complejos, orificios de engastes** y grabados. Es fácil de trabajar y adaptable a los patrones de fundición.

Las propiedades que se facilitan por el fabricante de la Castable Wax 40 son las siguientes:

Propiedades de tracción	
Máxima resistencia a la tracción	11,6 MPa
Módulo de tracción	220 MPa
Alargamiento en rotura	13%
Propiedades de quemado	
Temperatura con pérdida de masa del 5 %	249 °C
Contenido de cenizas	0,0 - 0,1 %

Tabla 3: Propiedades de quemado de Castable Wax 40 (White Paper: Introduction To Desktop Stereolithography, 2015)

Para la fundición, se recomienda programar el horno según la siguiente rampa:



	FASE	TIEMPO	PROGRAMA °C
	Secado con calentamiento de la caja de moldeo	180 minutos	55 °C
A	Rampa	48 min	2 °C/min
	Mantenimiento	180 min	150 °C
B	Rampa	75 min	2,0 °C/min
	Mantenimiento	180 min	300 °C
C	Rampa	108 min	4,0 °C/min
	Mantenimiento	180 min	732 °C
C	Rampa	44 min	-5 °C/min
	Ventana de fundición	Hasta 2 horas	Temperatura de fundición deseada

Tabla 4: Rampa de fundición de la Castable Wax 40 (Castable Wax And Castable Wax 40: Jewelry Pattern Burnout Process, 2022)

Esta resina, tras la impresión, requiere de un **lavado con alcohol isopropílico** para obtener una pieza limpia y un acabado idóneo. Un exceso de resina no curada puede provocar fundiciones defectuosas. Se aconseja un lavado de 5 minutos con alcohol isopropílico, y otro lavado de 5 minutos en una cuba de alcohol isopropílico limpio.

El curado es una opción a tener en cuenta si se observa que las piezas quedan endebles y tienden a romperse por los soportes o por los bebederos (si los hay). Son piezas

flexibles que posiblemente se agrieten por las capas si la polimerización no se ha completado del todo.

Aunque **no es necesario el curado**, con 30 minutos según el fabricante es suficiente. En el postcurado las piezas pueden experimentar contracciones y rizado. Y si se curan a una temperatura superior a la ambiente, derriten el 40% de cera que contienen.



Imagen 30: Piezas de Castable Wax 40 sacadas inmediatamente tras la impresión y pieza en Castable Wax 40 lavada tras impresión. (Elaboración propia)

La **Castable Wax** (resina de cera moldeable) está enfocada principalmente en joyería, pero con un 20% de cera, este modelo tiene **más dureza y resistencia** que la anterior. Estas características hacen que sea ideal para la elaboración de **filigranas y piezas ligeras**. Imprime piezas lisas y con un alto nivel de detalle. En contra posición con la Castable Wax 40, esta está enfocada en la precisión y el detalle; la otra en acabados más bastos y pesados. Debido a estas características, su precio es superior a la Castable 40.

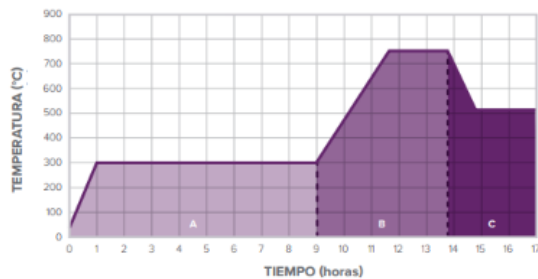
Las propiedades que se facilitan por el fabricante de la Castable Wax son las siguientes:

Propiedades de tracción	
Máxima resistencia a la tracción	12 MPa
Módulo de tracción	220 MPa
Alargamiento en rotura	13%
Propiedades de quemado	
Temperatura con pérdida de masa del 5 %	249 °C
Contenido de cenizas	0,0 - 0,1 %

Tabla 5: Propiedades de quemado de Castable Wax (White Paper: Introduction To Desktop Stereolithography, 2015)

Para la fundición, se recomienda programar el horno según la siguiente rampa:

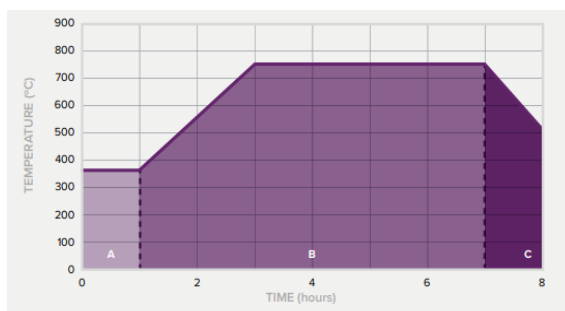
Castable Wax Resin



FASE	TIEMPO	PROGRAMA °C
A	Insertar cajas de moldeo	0 min 21 °C
	Rampa	60 min 4,7 °C/min
	Mantenimiento	480 min 300 °C
B	Rampa	100 min 4,5 °C/min
	Mantenimiento	180 min 750 °C
C	Rampa	60 min -4,0 °C/min
	Ventana de fundición	Hasta 2 horas Temperatura de fundición deseada

Tabla 6: Rampa de fundición de la Castable Wax (Castable Wax And Castable Wax 40: Jewelry Pattern Burnout Process, 2022)

También se sugiere otra rampa de aceleración del proceso, pues este tarda 18 horas como mínimo (sin tener en cuenta el tiempo de espera del horno).



	TIME	SCHEDULE °C
A Thermal Transition	0 min	371 °C
	60 min	371 °C
B Final Burnout	120 min	3.5 °C/min
	240 min	788 °C
C Casting Temperature	60 min	-4.6 °C/min
	Up to 2 hours	512 °C (or casting temperature of alloy)

Tabla 7: Rampa de fundición de la Castable Wax acelerada (Castable Wax And Castable Wax 40: Jewelry Pattern Burnout Process, 2022)

Esta resina, tras la impresión y al igual que la otra, requiere de un lavado con alcohol isopropílico para obtener una pieza limpia y un acabado idóneo. Se aconseja un lavado de 10 minutos con alcohol isopropílico, y otro lavado de 5 minutos en una cuba de alcohol isopropílico limpio.

El curado no es necesario en esta resina.

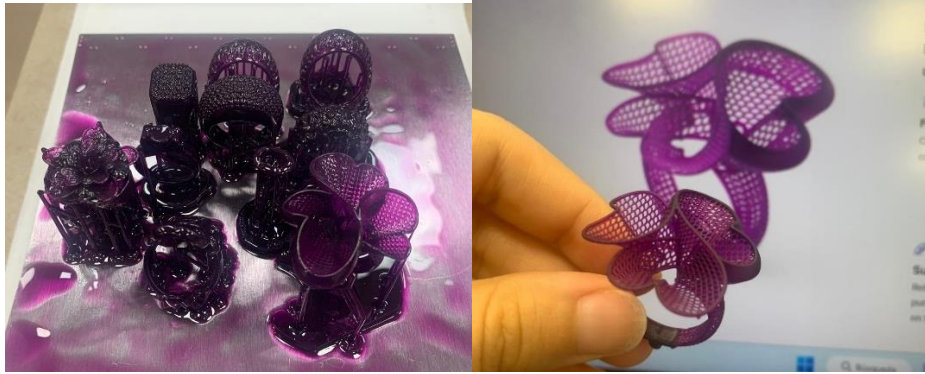


Imagen 31: Piezas de Castable Wax sacadas inmediatamente tras la impresión. (Elaboración propia)

Imagen 32: Pieza en Castable Wax lavada tras impresión y comparada con el modelo original de Formlabs. (Elaboración propia)

3.3 Fundición a la cera perdida

El proyecto se divide en dos partes de fabricación claras, por un lado la fabricación 3D, y por otro lado, la **fundición a la cera perdida**. Como se ha mencionado previamente, este método de fabricación cuenta con una historia extensa que nos ha permitido perfeccionar la técnica hasta nuestros días. (*Cómo la Impresión 3D Está Revolucionando la Industria de la Joyería | Formlabs, s. f.*)

La fundición a la cera perdida es un **método de fabricación de moldeo en molde y modelo desechable** con el que se crean objetos a través de la fundición de modelos. Puede ser un método de fabricación directo si cuando se obtiene la pieza final, los modelos que se funden son piezas de cera originales y únicas, o indirecto, si las piezas son copias de la original. El método de fabricación puede variar según la industria y la aplicación. (Jimenez Calzado et al., s. f.)

Tradicionalmente la **fundición a la cera perdida indirecta** pasa por vulcanizado, que es un proceso en el que un patrón maestro se emplea para hacer un molde de caucho. Este molde se calienta y se vulcaniza con el patrón en su interior. Con una cuchilla, se abre el molde, y se extrae el patrón. De esta forma se pueden conseguir cientos de modelos de cera para fundir. Es un proceso tedioso y largo, pero no es complejo; y se han desarrollado técnicas para separar el caucho y extraer el patrón de forma sencilla. Como en el proyecto no se trata el vulcanizado clásico, se explicará la cera perdida con una perspectiva enfocada a la impresión 3D.



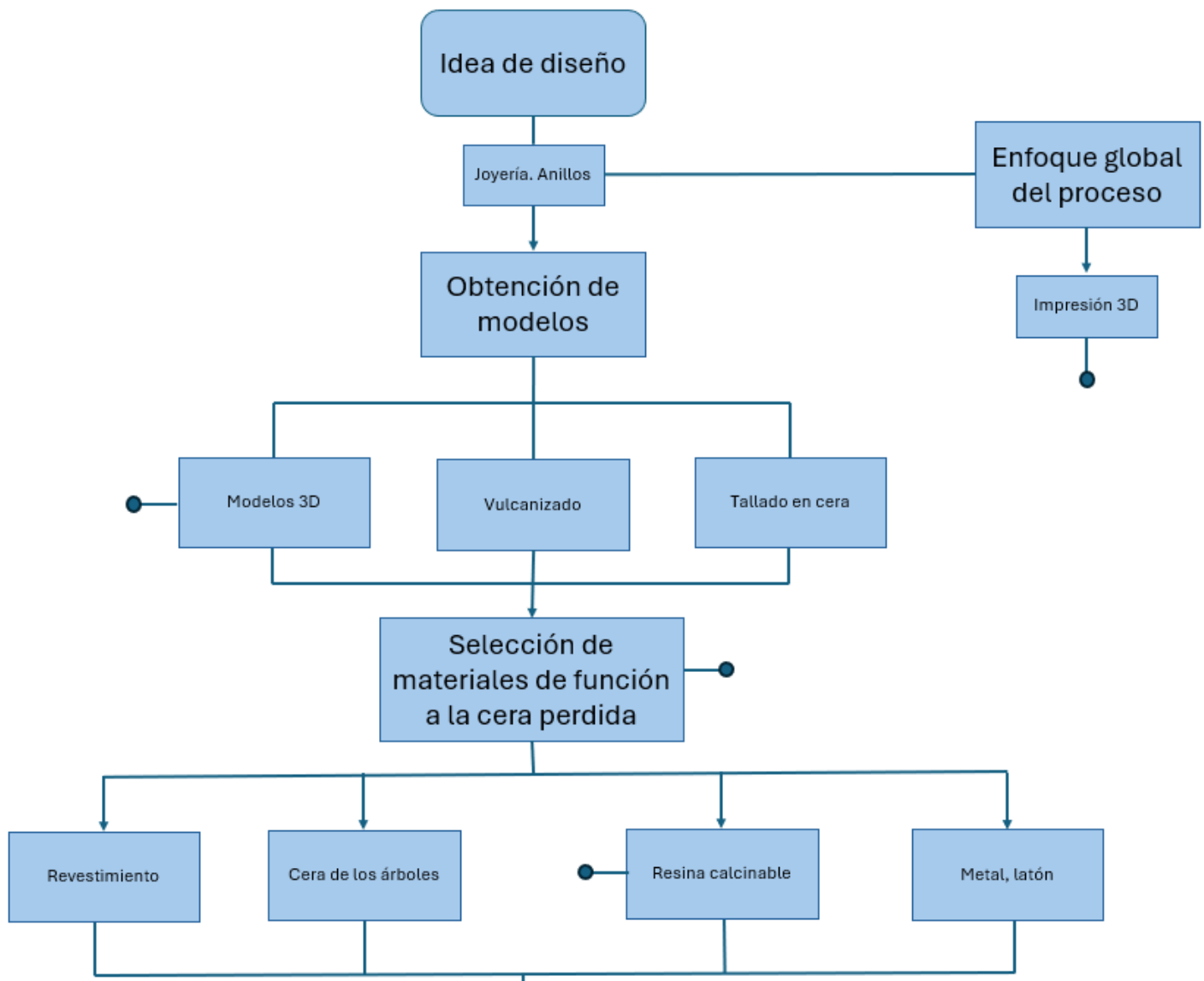
Imagen 33: Vulcanizado de un anillo (Impresión 3D Para Minoristas de Joyería y Fundiciones, s. f.)

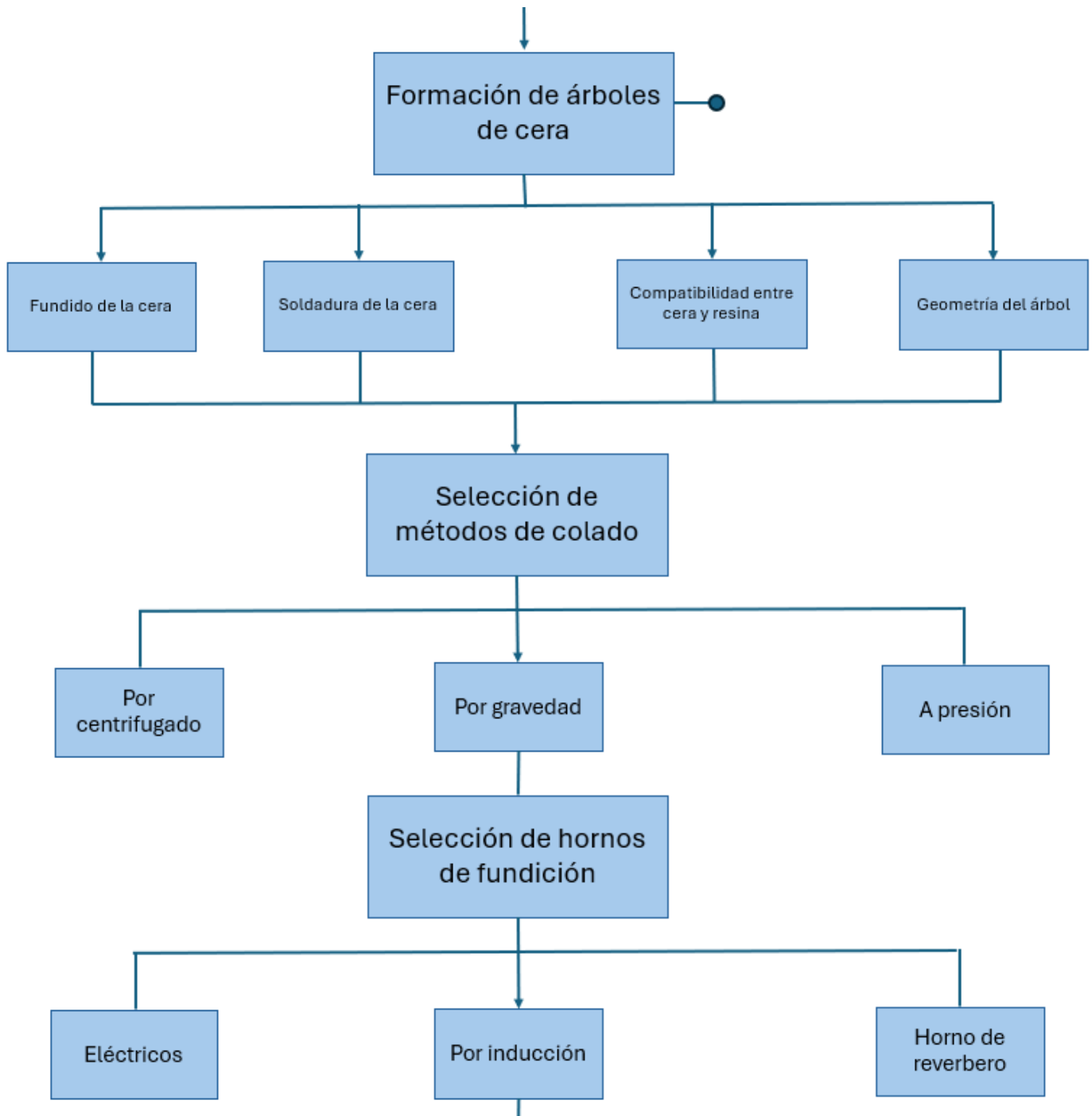
Imagen 34: Moldes comerciales de caucho para joyería (Casting Silicone Rubber Castaldo Blue Super High Strength - 2,27kg, s. f.)

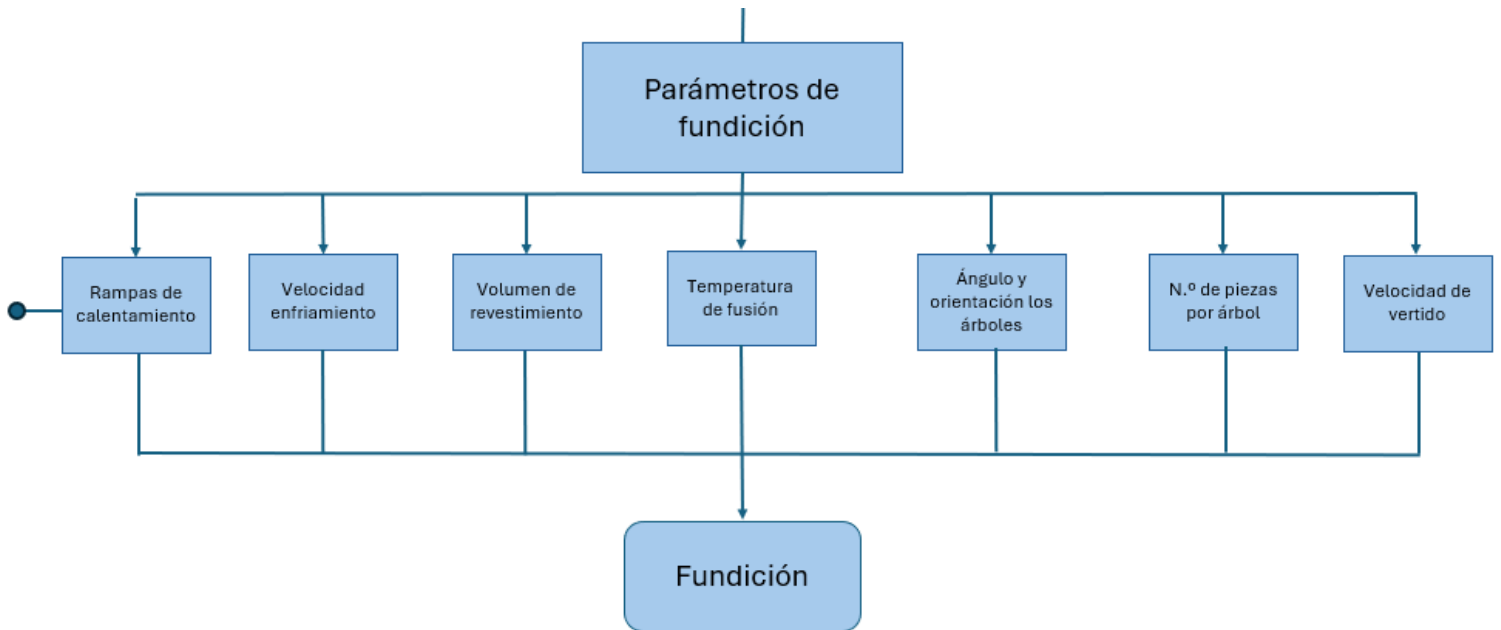
Como el proyecto sigue la línea de trabajo indirecta mediante la **impresión 3D**, será esta la que se desarrollará a continuación. En lugar de fabricarlas por el proceso tradicional, las piezas obtenidas de la impresión 3D son las que se fundirán, dando lugar a un estudio no solo de la complejidad de la fabricación aditiva, si no de **los límites a los que puede llegar la fundición con geometrías complejas**. Evidentemente, las piezas elaboradas en impresión no son recuperables tras la fundición.

3.3.1 Metodología de la fundición a la cera perdida

En el siguiente esquema se detalla la metodología a seguir en el proceso de fundición a la cera perdida ejecutada en este proyecto antes de comenzar el proceso de producción:







Esquema 10: Diagrama de fabricación en fundición a la cera perdida en el proyecto (Elaboración propia)

3.3.2 Paso 1: Preparación de los modelos de cera

Los modelos de cera son tanto de Castable Wax como de Castable Wax 40. Los criterios de diseño y complejidad se desarrollan más adelante. Pasan un limpiado y se eliminan los apoyos de la impresión. Algunos **se imprimen con bebederos** para que la fundición y la elaboración del árbol de cera sea más sencillo. Se eliminan con unos alicates de **corte diagonal** los soportes y demás fragmentos que puedan quedar adheridos al modelo. Además, todos los modelos deben pasar por un **proceso de pulido**, es importante recalcar que un buen pulido es clave en el proceso, ya que moldear cera es más sencillo que cualquier otro metal. Este pulido sirve para eliminar los soportes de la impresión 3D. (P. Nikesh, 2022)

Para este paso se empleó la siguiente maquinaria de MakerX Works, “*MakerX 20V Rotary Engraving Tool and Wood/Metal Soldering Iron Combo Kit. Hobby Crafting Tool Kit with Battery, Control Hub and 43pc Accessories*” que cuenta con una lija eléctrica y diversos cabezales que ir cambiando en función del acabado que se requiera. (Worx, 2024)



Imagen 35: Kit de cabezales de lijado de MakerX Worx (Elaboración propia)

Imagen 36: Detalles de marcas de soportes en la impresión 3D antes de ser lijados (Elaboración propia)

3.3.3 Paso 2: Árbol de cera

Para la creación del **árbol de cera** se suelda con cuidado cera a cada pieza. Las piezas al estar impresas en resina polimérica no se funden, se queman directamente atravesando agresivamente las capas impresas. Esto resulta en piezas quemadas y desechables. Es por ello que el proceso de fundición de la resina al árbol se debe hacer con una **cera de bajo punto de fusión y fácilmente moldeable**. Es por ello que se utilizó la cera ACCU Flakes de Kerrlab (Sybron Dental Specialities). Esta cera es de uso dental, y tiene una temperatura de fusión de 65°C, con propiedades genéricas lo cual la hace perfecta para este uso. Con esta cera se sueldan los bebederos a las piezas.



*Imagen 37: Tipos de bebederos. Incorporado en el modelo 3D y con cera de bajo punto de fusión.
(Elaboración propia)*

Después de unir a cada pieza de joyería con su correspondiente bebedero, estas se sueldan a un tronco de cera, elaborado mediante **inyección de cera**, la misma que la de los bebederos. Mediante un molde previamente diseñado y engrasándolo, se consigue elaborar los troncos. Para soldar las partes, se ha utilizado un soldador de para tallar digital de marca MESTRA con espátula doble.

La inyectora funciona elevando la presión a un abanico entre 1 y 1,5 bar cuando se quiere emplear, y usando un pedal, se libera un chorro de cera caliente; así se hacen tanto el tronco como el bebedero. La temperatura del interior debe ser superior a la de fusión de la cera, con vigilancia para evitar que se queme el interior. En el proyecto se calentó a un rango de entre 80°C y 100°C, dependiendo de la velocidad de fusión que quisiera.

En este paso además se inserta el árbol en una base elástica de caucho. Estas bases actúan como el embudo del bebedero, y facilitan el desmoldado.

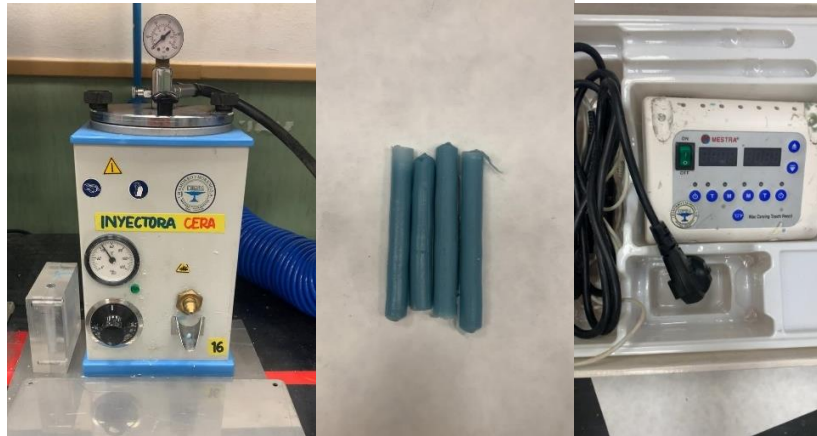


Imagen 38: Inyectora de cera empleada en el laboratorio Chamorro Y Moreno S.A. (Elaboración propia)

Imagen 39: Troncos del árbol de cera recién elaborados (Elaboración propia)

Imagen 40: Soldador MESTRA de para tallar digital con espátula doble (Elaboración propia)

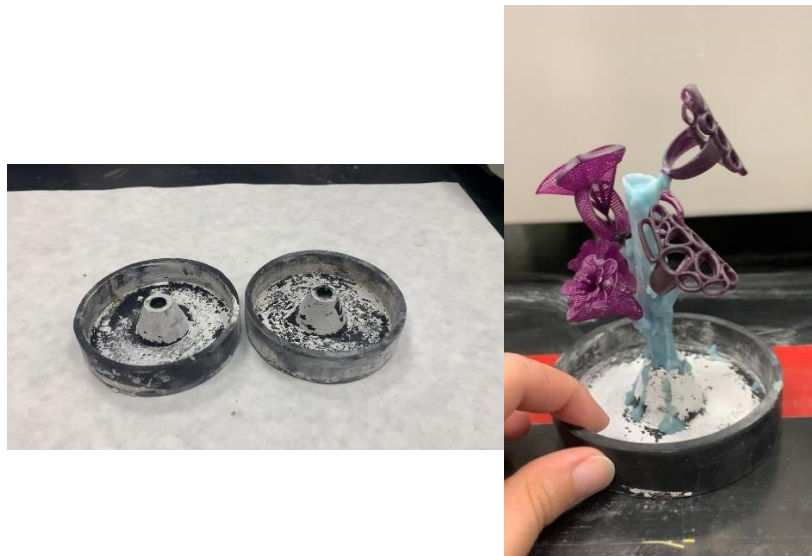


Imagen 41: Bases de caucho para fundición a la cera perdida (Elaboración propia)

Imagen 42: Árbol con piezas impresas en Castable Wax incluidas y terminado (Elaboración propia)

En este paso es habitual pesar las piezas a fundir, ya que servirá para hacer una aproximación de la cantidad de metal que se fundirá en el crisol en la etapa final. A pesar de ser una técnica correcta, debido a las impurezas del metal y su fundición poco homogénea, no es una acción relevante en este proyecto.

3.3.4 Paso 3: Revestimiento cerámico y cilindros de microfusión

El siguiente paso consiste en el **llenado de revestimiento cerámico** de las jaulas, matraces, o **cilindros de microfusión**. Estos cilindros son elementos tubulares que tienen un ajuste perfecto con las bases de caucho y contienen el árbol de cera. Están hechos a partir de planchas de acero refractario de 2mm de espesor. Los empleados tienen unos agujeros a lo largo de la superficie, ya que están pensados para funcionar en **máquinas de aspiración de microfusión**. Son los más empleados en la industria de joyería por su baja deformación. Las jaulas se llenan de un **material refractario**, el revestimiento cerámico, que inunda toda la cavidad. Sirve para tapar la parte superior y rellenar todos los huecos, **obteniendo así un negativo perfecto de la pieza** que queremos conseguir. Es una forma de conseguir geometrías complejas, como la que podría resultar de válvulas, aretes, engranajes...

Hay dos formas habituales de hacer el revestimiento cerámico: uno es la **inundación de un cilindro**, y otra es el **baño cerámico**. El baño cerámico se hace sumergiendo el árbol en una cerámica fina y una vez seca, en cerámica resistente. El baño se suele emplear en piezas de gran envergadura que son capaces de adherir la cerámica como alternativa a la fundición en arena. También se llama fundición en cascarilla o por inversión. Es un proceso complejo de grandes dimensiones que no se estudiará en este proyecto porque la industria de la joyería no lo emplea, está enfocado a bloques de bombas, el cuerpo de una válvula o el bloque motor de un automóvil. (*Una Guía Completa Para el Proceso de Casting de Inversión*, 2021)

La **microfusión** es el método que se ha estudiado en este proyecto y cuenta con muchas ventajas. A parte de ser económico y rápido, es flexible ante una amplia variedad de aleaciones, y reduce el proceso de mecanizado.

En el proyecto se utilizaron dos revestimientos, **Satin Cast 20** de Kerrlab (Sybron Dental Specialities) y el **Ransom & Randolph Argentum Investment**.



Imagen 43: Revestimientos cerámicos de microfusión. Satin Cast 20 y Argentum Investment (Elaboración propia)

Las características del **Satin Cast 20** son las siguientes:

Información de composición

Composición	Proporciones
Cristobalita	35-45%
Cuarzo	25-35%
Sulfato de calcio hemihidrato	25-30%

Tabla 8: Tabla de composición de Satin Cast 20 (Satin Cast 20 / KerrCast 2000 Directions For Use, s. f.)

Este material es estable, parcialmente soluble en agua, inodoro e incompatible con ácido fluorhídrico, ya que el sílice se disolverá y producirá el gas corrosivo, tetrafluoruro de silicio. Según el fabricante, este es el modo de empleo:

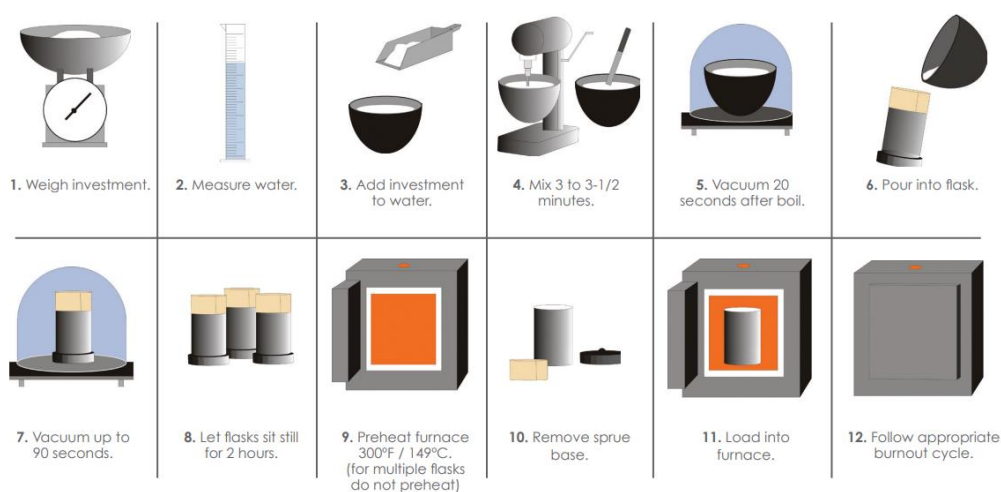
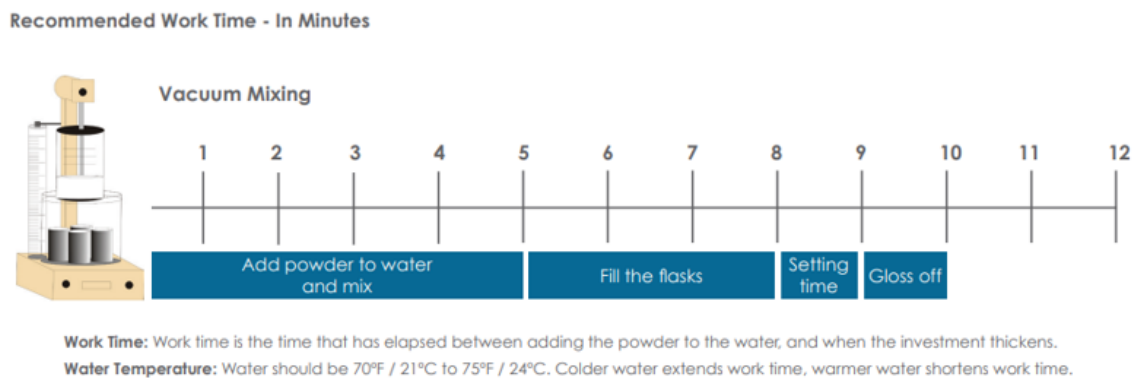


Imagen 44: Método de uso del Satin Cast 20 (Satin Cast 20 / KerrCast 2000 Directions For Use, s. f.)

Dependiendo del diseño que se requiera, se indican unas proporciones diferentes de agua con revestimiento, siendo estas:

- Para fundiciones pesadas, joyería de acabado basto, y grandes **38ml de agua desionizada por 100g de revestimiento.**
- Para fundiciones estándar, joyería de acabado fino, intrincado, filigranas, pendientes **40 ml de agua desionizada por cada 100g de revestimiento.**

Además se indican los tiempos recomendados de mezclado y quemado del revestimiento:



*Esquema 11: Mezclado tiempos de mezclado por aspiración de Satin Cast 20 (Satin Cast 20 / KerrCast
 2000 Directions For Use, s. f.)*

En relación al tiempo de quemado, se recomienda seguir la siguiente escala, cabe mencionar que el fabricante los indica como una propuesta y no es necesario trabajar el quemado de esta forma, pero sí que la rampas de calentamiento se debería asemejar. En este proyecto se han seguido las rampas de quemado de la resina calcinable, porque esta propuesta es para cera estándar, como la Kerrlabs, no para cera fotopolimerizada como es la Formlabs, por lo que los tiempos de quemado han sido diferentes

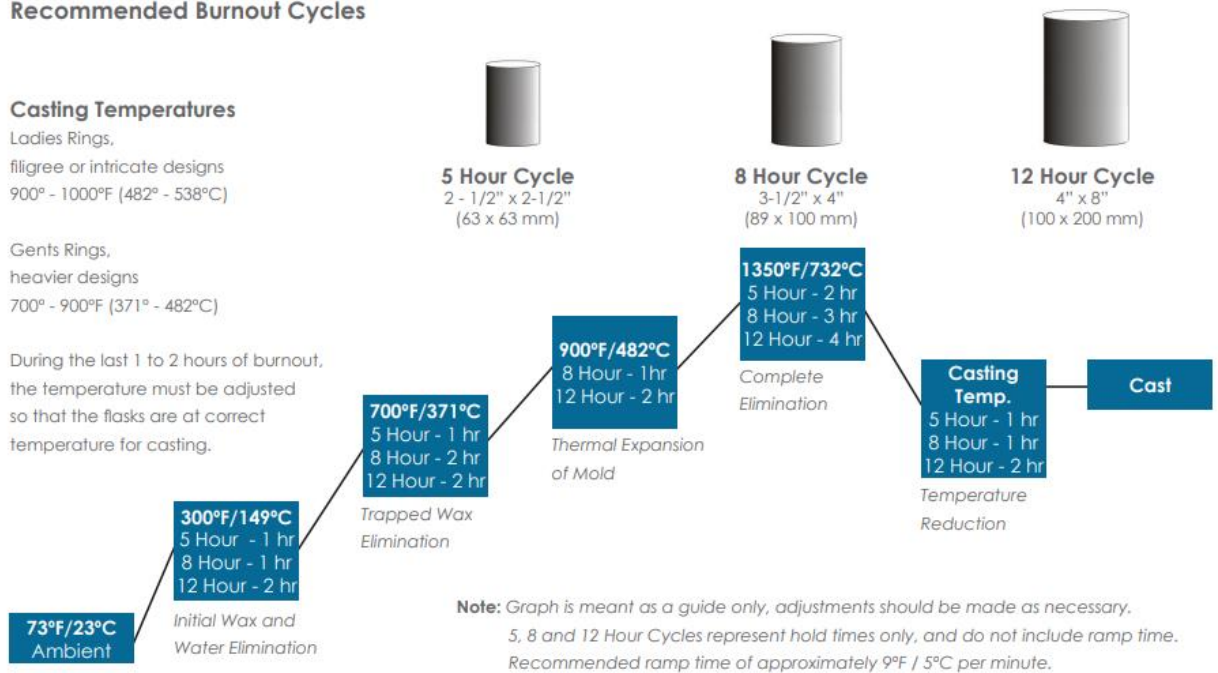
Recommended Burnout Cycles

Casting Temperatures

Ladies Rings,
filigree or intricate designs
900° - 1000°F (482° - 538°C)

Gents Rings,
heavier designs
700° - 900°F (371° - 482°C)

During the last 1 to 2 hours of burnout,
the temperature must be adjusted
so that the flasks are at correct
temperature for casting.



Esquema 12: Propuesta de tiempos de quemado de la Satin Cast 20 (Satin Cast 20 / KerrCast 2000

Directions For Use, s. f.)

Ransom & Randolph Argentum Investment no aporta la composición de su revestimiento. El método de uso es el mismo que en el anterior revestimiento.

Se recomiendan emplear **38 ml por 100g de revestimiento**. Para un mayor aprovechamiento del revestimiento, han desarrollado una formulación en función de las dimensiones del cilindro de microfundición, aunque también aportan una tabla con medidas de agua genéricas para hacer la mezcla.

PIEZAS DE FUNDICIÓN GRANDES = 39/100 WP (anillos para hombres o piezas con partes gruesas)

[Volumen (cm³) x 1,25 gr]/1000 = _____ kgs. de polvo Volumen x 0,488 ml = _____ ml. de agua

PIEZAS DE FUNDICIÓN NORMALES = 40/100 WP (anillos para mujeres)

[Volumen (cm³) x 1,23 gr]/1000 = _____ kgs. de polvo Volumen x 0,494 ml = _____ ml. de agua

PIEZAS DE FUNDICIÓN DELICADAS = 42/100 WP (piezas pequeñas y filigranas)

[Volumen (cm³) x 1,20 gr]/1000 = _____ kgs. de polvo Volumen x 0,506 ml = _____ ml. de agua

Imagen 45: Formulación de revestimiento Ransom & Randolph Argentum según el volumen del cilindro y el tipo de pieza (Ransom & Randolph | ARGENTUM Investments, s. f.)

Respecto a los tiempos de mezclado y de quemado, se aportan unas guías de consulta de rasgos generales. Es análoga a la de Satin Cast 20, y no pretende ser una norma, si no una **propuesta de mezclado**, ya que con las resinas en 3D la rampa de calentamiento se debe adaptar a ellas, y no al revestimiento.

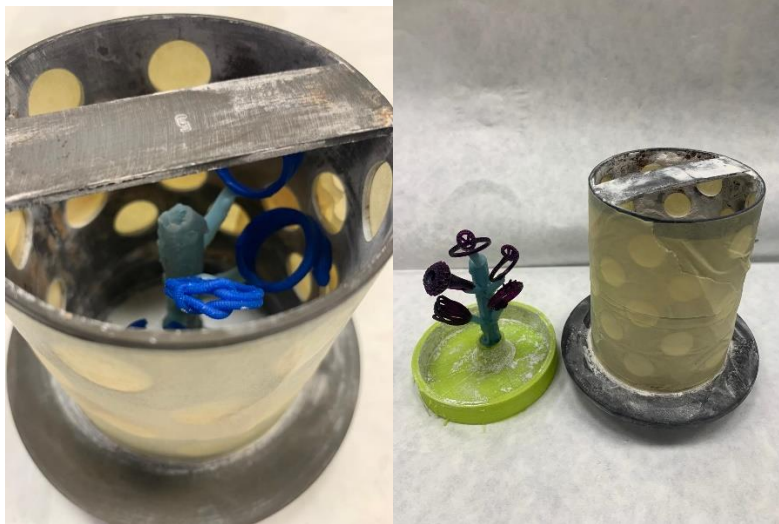


Imagen 46: Cilindro de microfusión con el árbol introducido (Elaboración propia)

Imagen 47: Cilindro de microfusión con un árbol de cera (Elaboración propia)

3.3.5 Paso 4: Batidora de microfusión por aspiración: Bomba de vacío

La **batidora/fundidora de microfusión** cuela el revestimiento en el cilindro. Esta maquinaria cuenta con una bomba de vacío, encargada de hacer la mezcla y colarla; incluye una cámara de vibración electromagnética y un sistema de paletas rotativas. La maquinaria empleada es una fundidora de microfusión, que cuenta con una batidora, con bomba, paletas... y un compartimento de aspiración para el momento de realizar la colada. (*Fundidora Microfusión Vacuum R - ComraShop Herramientas Joyería, s. f.*)

En las siguientes imágenes se esquematizan las partes esenciales de la batidora de la fundidora de microfusión:

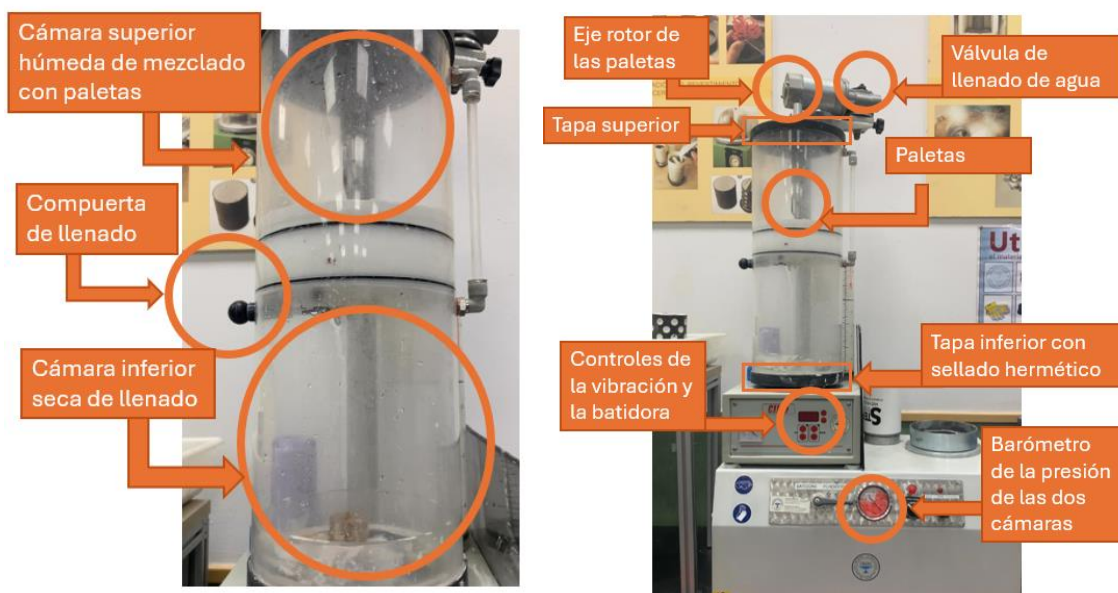


Imagen 48: Cámaras de colado de revestimiento de la batidora (Elaboración propia)

Imagen 49: Elementos de la batidora (Elaboración propia)

Los pasos a seguir para el llenado son:

1. **Llenar la cámara húmeda superior** de la bomba de vacío con 1000g de revestimiento, cerrar la tapa superior, y encender la bomba de presión. La **presión** debe elevarse hasta los **70 cmHg**, que es un poco menos de 1 bar. Se vuelcan los mililitros de agua desionizada correspondientes a la pieza que se va

a fundir. En las primeras pruebas se llenaron 380ml, pero con la progresión de los ensayos, se fue variando esta cantidad. Tras esto se mezcla con las paletas.

2. El **tiempo de mezclado** se programa de acuerdo a las especificaciones del fabricante del revestimiento. El tiempo oscila entre 2 y 3 minutos, y la batidora tiene una plataforma de vibración para garantizar el correcto llenado. Pasado el tiempo se abre la compuerta y se cuela la mezcla en el cilindro, que está debidamente posicionado en la cámara seca inferior. La presión se mantiene.

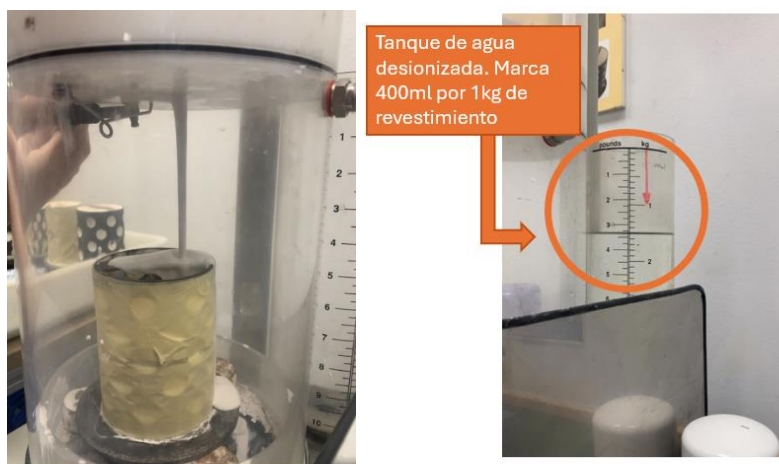


Imagen 50: Colado del revestimiento (Elaboración propia)

Imagen 51: Tanque de agua desionizada de la batidora (Elaboración propia)

3. Se mantiene la mezcla colada en la **cámara seca inferior a presión constante** durante unos minutos, hasta que dejen de salir burbujas en la parte superior del cilindro. Una vez hecho esto, se despresurizan las cámaras y se retira el molde. La cámara superior se debe limpiar inmediatamente porque el revestimiento tarda entre 10 y 15 minutos en fraguar (endurecerse).



Imagen 52: Cilindros en proceso de secado (Elaboración propia)

3.3.6 Paso 5: Horneado y calcinado de la resina

El proceso de **horneado** es posiblemente uno de los más delicados de este método de fabricación, ya que las **rampas de calentamiento** deben seguirse según los criterios impuestos por la resina, el revestimiento, y el propio alcance del horno; además de ser el proceso con el que se obtiene el molde final de las piezas que se quieren fabricar.

Después de esperar **24 horas en el proceso de secado** para asegurar que el revestimiento se ha secado por completo, se quita la tapa de caucho del cilindro; así como la cinta de carrocero que lo recubre. Se consigue un elemento como el siguiente, en el que se puede observar el bebedero y el tronco de cera:



Imagen 53: Imagen del bebedero del molde fraguado (Elaboración propia)

Para hornear, se emplea un **horno de mufla**. Los tradicionales están compuestos por dos cámaras para proteger a los elementos en cocción de la llama directa y los gases, es decir, en una cámara se localizan las piezas, y en otra el combustible. El que se ha utilizado en el proyecto es , así que no requiere de este doble recinto; calienta a través de unas resistencias dispuestas en hilo a lo largo de todo el interior. Este recinto está recubierto de placas de material refractario, con alto contenido en alúmina. Estos hornos se suelen utilizar en alfarería, odontología, joyería y ensayos. El del proyecto es un horno de mufla “Shuttle” de Maproden S.L. Incrementa su temperatura de horneado en 10°C por minuto.

En su interior se colocan los cilindros en **posición invertida**, es decir, con el bebedero hacia la parte inferior de la cámara. Los cilindros no deben tocarse unos con otros para garantizar una correcta cocción.



Imagen 54: Cilindros dentro del horno mufla para ser cocidos (Elaboración propia)



Imagen 55: Horno de mufla "Shuttle" empleado en el proyecto (Elaboración propia)

Para un correcto **calcinado**, se deben programar las **rampas de calcinado** de acuerdo a las características del metal de fundición, el revestimiento y la resina polimérica. Las rampas usadas en los procesos de quemado se aportarán más adelante en el proyecto, ya que sufrieron cambios a lo largo de los ensayos. (Jimenez Calzado et al., s. f.)

Cabe mencionar que un correcto calcinado de la cera es lo que propicia unos moldes adecuados. Tanto la Castable Wax como la Castable Wax 40 no dejan apenas residuo de ceniza en el interior de los moldes, como indica el fabricante, entre un (0,0% y un 0,1%). Se recomienda hacer estos quemados en ciclos nocturnos, ya que pueden durar entre 8 y 16 horas, así que programando adecuadamente la rampa de calentamiento del horno, se puede comenzar el proceso una mañana, calcinar la resina en la madrugada, y recuperar los moldes en la siguiente mañana. El proceso de calcinado reduce a cenizas la resinas, así como elimina las sustancias volátiles que la compone.



Imagen 56: Detalle de cenizas de resina y demás restos en la base del horno de mufla (Elaboración propia)

3.3.7 Paso 6: Fundición del metal: latón

Tras calentar los moldes según las rampas de la resina calcinable, se realiza la **fundición del metal**. El metal seleccionado para este proyecto es latón. El **latón** es un material idóneo para hacer ensayos de fundición a la cera perdida, cuenta con numerosas ventajas:

- Dúctil y maleable, de fácil mecanizado y pulido.
- Acabados lisos, brillantes y suaves.
- Muchos tipos son resistentes a la descincificación (por ejemplo exponer el zinc del latón a cloruros hace que se corroa).
- Buena dureza.
- No ferromagnético.
- Buena conductividad eléctrica y térmica.

El que se ha trabajado en el laboratorio tiene una composición de **82% cobre y 18% de zinc**. Tiene una densidad de 8,34 g/cm³ y temperatura de fusión de 930 °C, en función de su composición. Cuanto más cobre contenga la aleación, más blando es el material, y se aprecia de un color dorado. Una de las mayores ventajas del latón es que es reutilizable y reciclable, actualmente casi el 90% del latón global se reutiliza.

Mezclándolo con aluminio, el latón adquiere resistencia y forma una capa superficial sobre la pieza de latón, óxido de aluminio Al₂O₃, que es imperceptible y autorreparable. Se suele emplear como aditivo contra la corrosión. También reacciona con ciertos ácidos, cloruros, humedad o amoniacos (estos últimos consiguen agrietar, corroer y romper las piezas), formando una capa corroída en su superficie de color marrón, sulfuro de cobre. Este puede reaccionar ante ciertos ácidos del ambiente, contaminación, lluvia... y recubrir la pieza de carbonato de cobre, de color verduzco.

El latón empleado en el proyecto, se clasifica como “**latón alfa**” por tener una composición superior al 65% en cobre. Específicamente, según los porcentajes de composición, este es un latón clasificado en dos categorías: como **imitación**, puesto que con estos porcentajes se utilizaba en el siglo XVIII para imitar oro; o **Tombak**, que es una palabra indonesia que sirve para nombrar los latones de joyería y cera perdida.

En contraposición, no se utiliza en ámbitos salinos, industria naval por ejemplo, ya que el zinc reacciona con el agua del mar, creando poros en la fundición. Tampoco se emplea en usos como maquinaria o herramientas, porque no es lo suficientemente duro para estos trabajos.



Imagen 57: Latón sin utilizar preparado para fundir. (Elaboración propia)

Imagen 58: Planchas de latón reutilizado (Elaboración propia)

Teóricamente el latón funde entre 900 y 940°C, dependiendo de su composición. El cobre funde a 1085°C; y el zinc a 420°C. En el laboratorio se calentó el latón a **1100°C** (82% en cobre), para conseguir fundir todo el metal, ya que el crisol de fundición no calienta homogéneamente el metal. Al calentarlo a esta temperatura las primeras veces se produjo una reacción resultando en un leve humo blanco que salía del crisol e inundaba el laboratorio, como se puede observar en las siguientes imágenes. Este fenómeno se da por el sobrecalentamiento del zinc. Cuando se sobrepasa la temperatura de fusión del zinc, se separa de la estructura de cobre, y se licúa. Cuando se llega a la fusión del cobre, se corre el riesgo de oxidar ese zinc, puesto que se quema y reacciona con el oxígeno del ambiente, y produce **óxido de zinc**. El óxido de zinc es un humo de color blanco o amarillo altamente tóxico, produciendo fiebre, temblores, tos y escalofríos. No tiene permanencia en el organismo. Es por ello que para manipular latón se debe tener un control exhaustivo de la fundición del metal para evitar este fenómeno. (*White/Yellow Smoke And Residue When Melting Brass*, 2023)

El colado se realiza calentando el metal en un crisol hasta que llega a la temperatura deseada, 1100 °C, y se ha licuado todo el contenido. En casi todas las pruebas se utilizó latón no reutilizado, en una de ellas se añadió un poco de aluminio para observar su comportamiento. (*HOJA INFORMATIVA SOBRE SUBSTANCIAS PELIGROSAS*, 2007)

El **crisol** es un recipiente hecho de material refractario, cerámica, porcelana, en algunos casos arcilla, recubierto en su interior con una capa de grafito, que sirve para calentar metales a altas temperaturas superando los 1500°C. Suelen tener una entrada para incorporar un **termopar**.

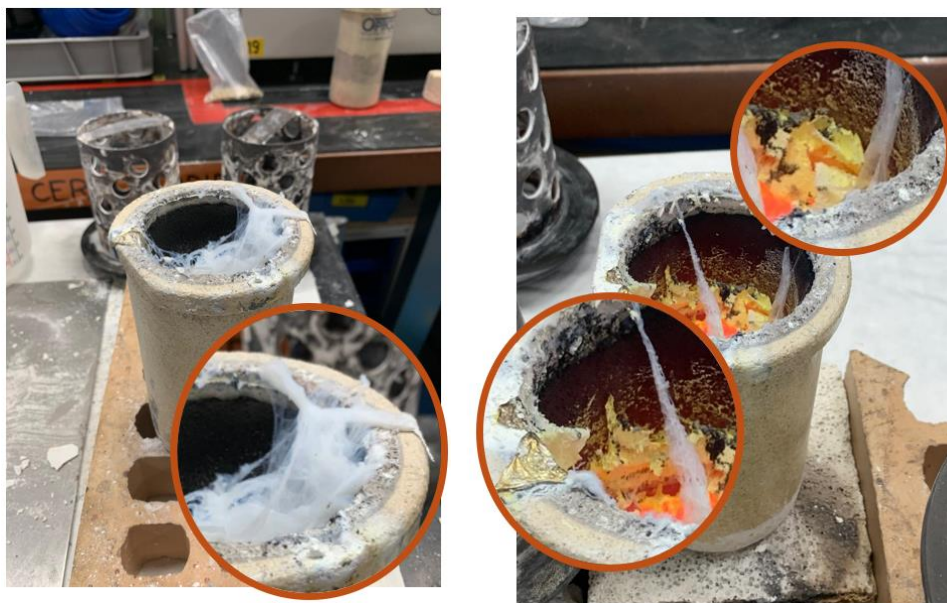


Imagen 59: Detalles de óxido de zinc en un crisol (Elaboración propia)

La fundición se realizó con el siguiente **horno de fusión**: Horno de fusión AFI (*Horno de Fusión - AFI-02,03,05,06,07, s. f.*). La temperatura máxima que alcanza es de 1500°C. Se trata de un horno por inducción, con una capacidad de llegar a altas temperaturas, y capaz de fundir la carga del crisol. Además, reduce la exposición del metal con el contacto del oxígeno, reduciendo su oxidación. Está controlado por un termopar con regulador PID. Cuenta con una pantalla LCD que permite ajustar la potencia y la temperatura. Por último, el crisol se encuentra recogido en un cubículo forrado por una cubierta cerámica, esto no solo protege el calentador del horno, si no que también evita fugas de líquido en caso de rotura del crisol.

La parte superior del crisol está cubierta con material refractario para evitar la disipación de calor.



Imagen 60: Partes del horno de fundición (Elaboración propia)

3.3.8 Paso 7: Colado

Se conoce como **colado**, o vertido, al proceso de vaciar metal licuado en un recipiente y que el metal adopte su forma. El colado es el paso más importante, porque en él convergen muchas variables:

- La velocidad del vertido, que debe ser constante y no muy rápida, para permitir que el metal entre en todas las cavidades.
- Rampa de calentamiento en el horno, que afecta a cómo se ha derretido, y posiblemente pueda dejar residuos de cera, ceniza o fraguados incompletos.
- La temperatura del molde en el momento del colado.
- La temperatura del metal en el momento del colado.
- Condiciones del laboratorio.
- Diseño de las piezas y previsión ante contracciones y deformaciones.
- Desgasificación.

Para realizar el colado se deben tomar una serie de medidas de seguridad, como llevar calzado cerrado adecuado para trabajar con hornos industriales, usar gafas, no llevar pelo suelto, usar una bata o en su defecto algo que cubra el torso y guantes de fundición.

Para el colado se utilizan tres maquinarias que ya se han comentado, el horno de mufla, el horno de fundición de metal, y la fundidora de microfusión (donde se encuentra la batidora).

La fundidora de microfusión tiene incorporado una abertura de aspiración que sirve para colocar el cilindro sacado del horno. Tiene un sistema de succión (aplica los mismos 70mmHg que la batidora) que posiciona el cilindro, evita que se pueda desplazar, y en algunos casos, aumenta la capilaridad de la colada.

En los ensayos se ha realizado el **colado por gravedad**, en el que se introduce el metal y la penetración se hace mediante gravedad. Se diferencia de otros métodos de que emplean otras técnicas utilizan presión u otros factores externos para forzar el metal fundido a entrar en un molde. Un proceso interesante es el **colado mediante centrifugación**, que no se ha podido aplicar y proporciona excelentes resultados. Emplea fuerzas generadas a partir de revolución para dispersar el metal en la cavidad del molde. Ofrece una alta calidad de acabados, las piezas son más duraderas y con

mejores propiedades mecánicas; y las impurezas son más fáciles de detectar, ya que no penetran en la pieza final. Hay dos tipos de máquinas de colada centrífuga, vertical y horizontal. (Rapiddirect, 2022)

Estos son los pasos del colado, el cual debe ser rápido, porque la temperatura es un factor clave, y se debe evitar el enfriamiento del revestimiento a toda costa:

1. **Precolado.** Con unas pinzas para horno, retirar un cilindro de revestimiento y llevarlo al fundidor de microfusión.

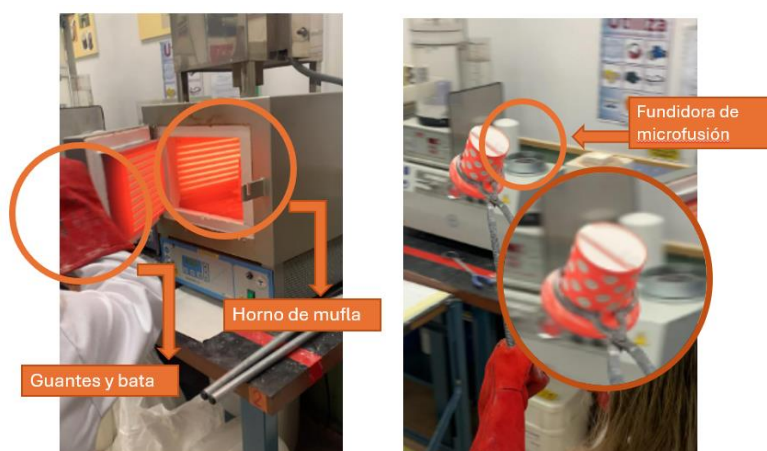


Imagen 61: Primera etapa de la colada: apertura del horno de mufla y colocación en fundidora de microfusión (Elaboración propia)

En este paso, al cilindro se le da la vuelta. Se había introducido invertido en el horno para propiciar la calcinación para que la cera y cenizas caigan en la base del horno.



Imagen 62: Cilindro volteado listo para incorporarlo en la aspiración. (Elaboración propia)

2. **Colado por gravedad.** En este paso se retira el termopar, y se vuelca el metal del crisol. Para que se produzca correctamente, hay que encender la aspiración de la fundidora.

Tanto en este paso como en el calentamiento se debe vigilar la superficie del metal en busca de escoria. La escoria aparece como trozos grandes de material negro, casi carbonizado, o partículas blancas que no se vuelven a fundir en el líquido.

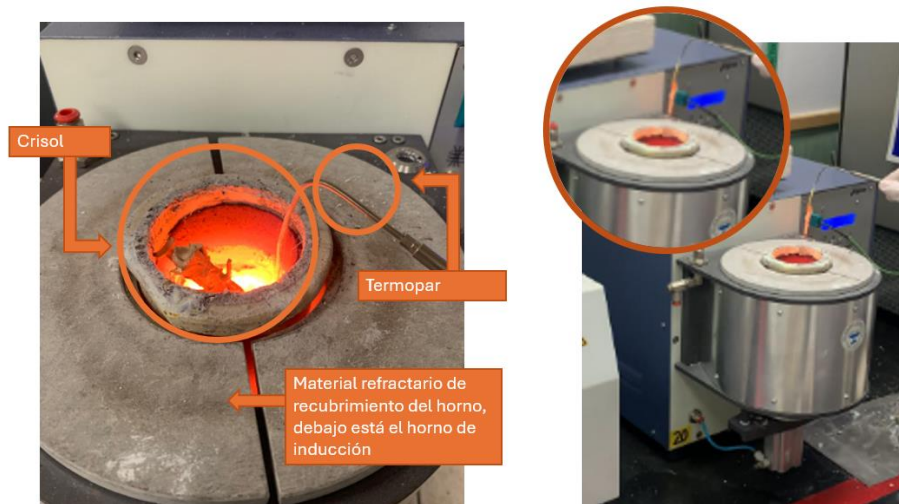


Imagen 63: Crisol calentando a 1100°C y retirada del termopar (Elaboración propia)



Imagen 64: Colado del latón (Elaboración propia)

3. **Reposo.** En este estado se debe dejar el cilindro un tiempo para que el metal tome la forma del molde y se solidifique. El tiempo de enfriamiento depende de la cantidad de metal que se aloje en el cilindro. Para este proyecto esperar 10 minutos era suficiente. Tras esto se pasa al **desvestimiento**, en el que se sumerge el cilindro en agua fría. A causa de la diferencia de temperatura, ya que la temperatura del revestimiento está entre 200 y 300°C, el revestimiento se deshace en el agua, resultando en un choque térmico que produce burbujas, calor y ruido, así como salpicaduras. En este proceso se obtiene la pieza completa.



Imagen 65: Enfriamiento del árbol de metal. (Elaboración propia)

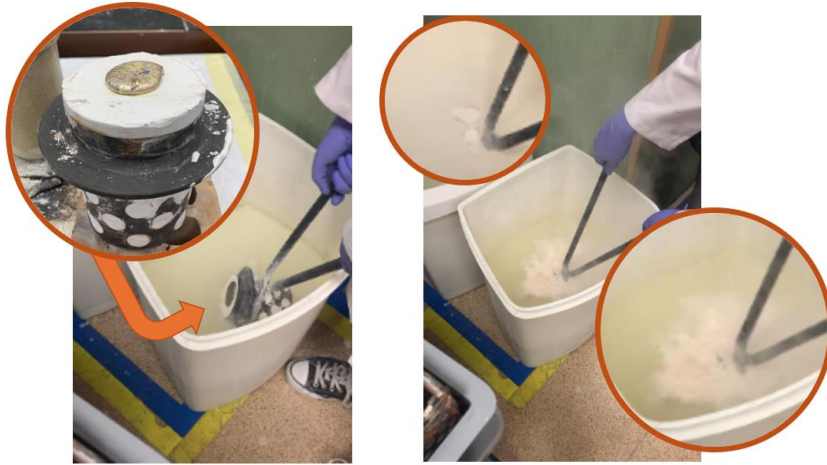


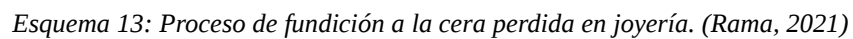
Imagen 66: Desvestimiento, en la primera foto se aprecia cómo la pieza no se ha introducido. En la segunda el revestimiento se deshace nada más tocar el agua debido al gradiente de temperaturas (Elaboración propia)

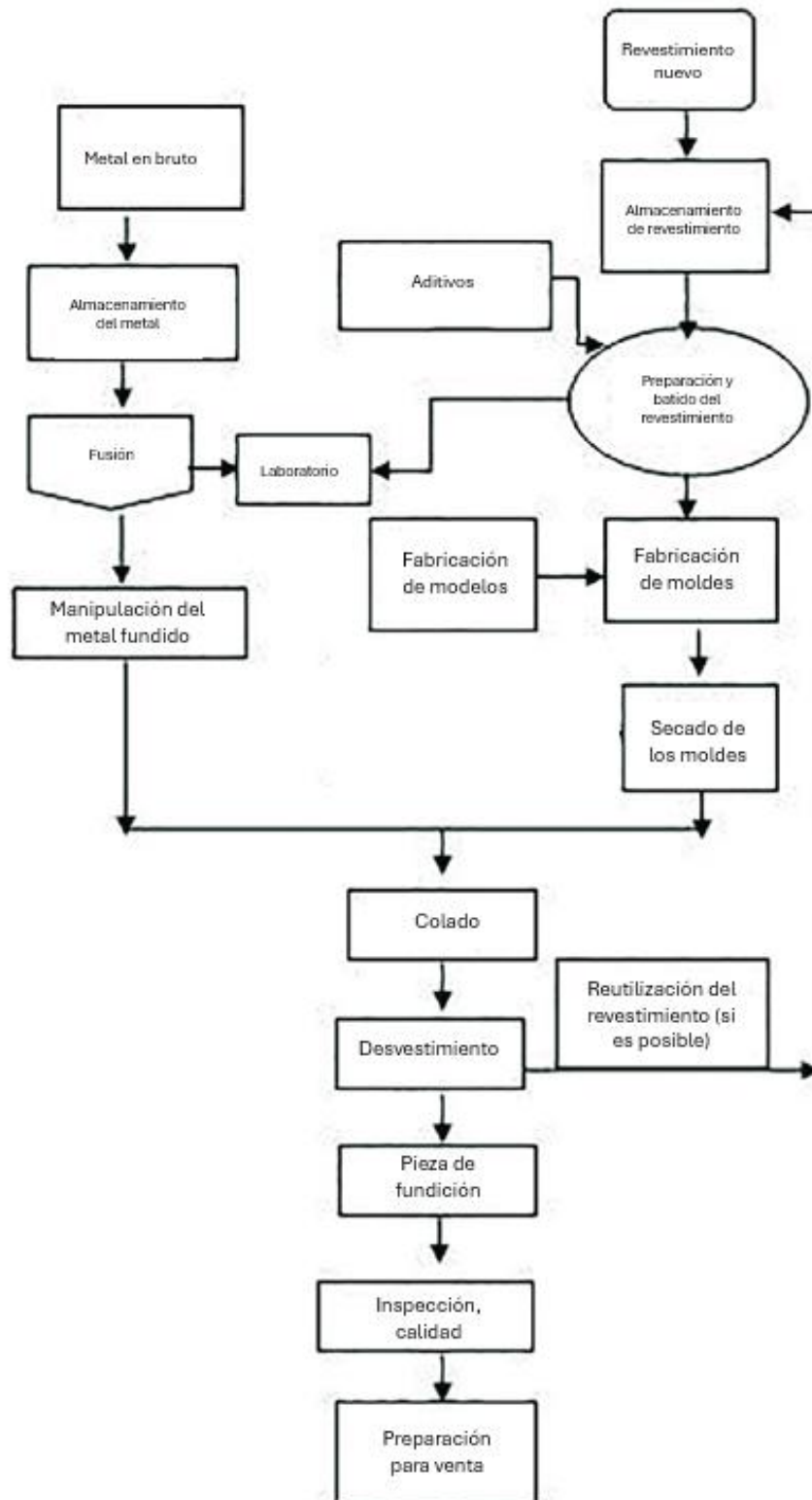


Imagen 67: Obtención del árbol de latón. (Elaboración propia)

Los árboles de metal se muestran en el capítulo 7 Ensayos en fundición.

Los procesos de acabado no son una técnica de fundición a la cera perdida, pero completando este apartado y con desarrollo en el capítulo 9 Técnicas de acabado, los árboles se deben chorrear, los bebederos se cortan con unas pinzas neumáticas o con una sierra de cinta vertical; lijadas con una lijadora de banda industrial, con lijas manuales de acabado basto y el kit de lijado MakerX Works previamente mencionado. Se explican detalladamente en el apartado 9 Técnicas de acabado.





Esquema 14: Adaptación y traducción del esquema del proceso de fundición a la cera perdida (C. Chelladurai et al., 2020)

4. Criterios de diseño

Una vez se han desarrollado los procesos de fabricación del proyecto, se deben idear los **criterios de diseño** de las piezas que se van a imprimir en 3D y posteriormente fundir. En este tipo de estudios existen una serie de **variables y parámetros** que se deben establecer antes de imprimir. Las decisiones tomadas durante la etapa de diseño afectan entre un 70% y 80% al coste del producto final. (Yusheng C. S. & Gupta K., 2000).

Estas decisiones pueden convertirse en una labor compleja, por ejemplo, en joyería influyen los materiales, no solo los metales, como se ha desarrollado, también las resinas, los revestimientos y los propios materiales de los componentes, como el grafito del crisol o el alcohol isopropílico del lavado de las piezas. Elegir entre materiales, tecnologías o geometrías no es solo una labor económica, también hay que considerar la disponibilidad de recursos, criterios de rendimiento, tiempo de producción...

Habitualmente surgen preguntas en los procesos de diseño, como el por qué se han tomado ciertas decisiones, qué flujo de pensamiento lo respalda y cómo afecta al proyecto. En los apartados anteriores se han desarrollado las justificaciones que responden al por qué de las variables del proyecto: ¿por qué se ha escogido el SLA como fabricación aditiva? ¿Por qué impresión en FormLabs? ¿Por qué se ha escogido latón? ¿Por qué se ha utilizado colada por gravedad? Entre otras cuestiones que podrían surgir, los apartados pretenden sentar las bases que construyen los criterios de diseño para las piezas.



Imagen 68: Diseño de piezas de joyería (Máster En Fabricación y Diseño de Joyas | Escuela Artesanía, 2023)

4.1 La pieza seleccionada: anillos.

La última pregunta que podría surgir es qué pieza de joyería se va a elaborar en este proyecto. Las piezas escogidas son **anillos de joyería**.

Los anillos de joyería se diseñan en los siguientes **softwares**: RhinoArtisan, RhinoJewel, MatrixGold, 3DESIGN, TinkerCAD, JCD o Firestorm. Estos softwares tienen módulos especializados en joyería, lo cual hace que diseñar engastes, filigranas y joyas estándar sea accesible. También se puede desarrollar con módulos de SolidEdge o SolidWorks, pero el alcance es menor, resultando en desarrollos de piezas menos eficientes.

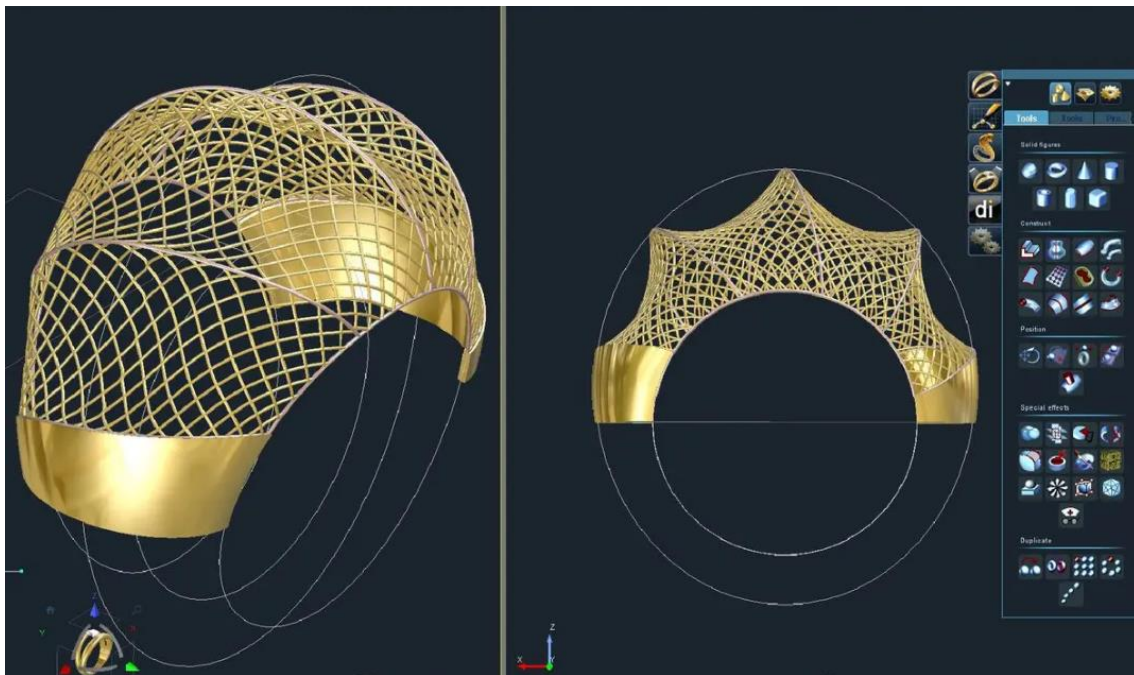


Imagen 69: Diseño de piezas mediante 3DESIGN (How To Choose The Best Jewelry Design CAD Software, s. f.)

4.1.1 Características de los anillos

Los anillos presentan unas complejidades que otras piezas de joyería no tienen, entre ellas:

- **Forma toroidal.** La forma de toroide de los anillos cerrados es compleja de obtener en fundición a la cera perdida porque el metal no fluye de forma laminar en la cavidad. Debe recorrer una curva y rellenar el molde, incluyendo los detalles. Esto además implica mantener una velocidad de vertido constante, adecuada para este procedimiento, que asegure que los bebederos se pueden llenar completamente y las piezas no quedarán a medio formar.

Como se puede observar en la imagen inferior, no solo la entrada del fluido es turbulenta, si no que el **gradiente de temperaturas** podría dar lugar a llenados incompletos, solidificándose la parte azul antes que el resto.

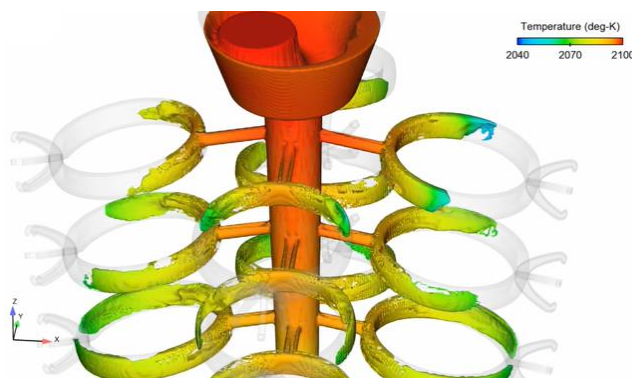
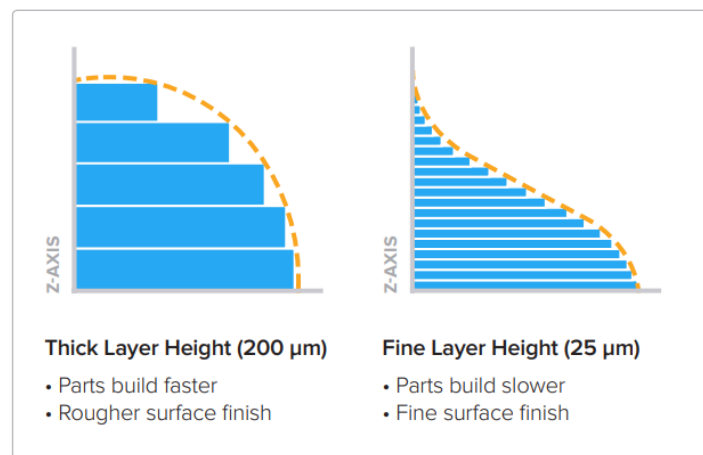


Imagen 70: Simulación de colado en un árbol de anillos por FLOW3D (FLOW-3D, 2016b)

- **Posibilidad de modelos con diseños complejos.** Genéricamente los anillos se prestan a poder hacerse con filigrana, un catálogo de rugosidades amplio, engarces, y otros detalles.
- **Volumen de impresión.** Imprimir un anillo permite explotar bastantes parámetros y geometrías en una sola impresión. Imprimiendo otro tipo de pieza no se tendría este control, y se perdería el foco en los mililitros de resina fotopolimerizable que se consume por pieza.
- **Estudio del alcance de capas de impresión.** Las capas de impresión, así como la altura de capa son una variable que influye notablemente en estos objetos, ya

que esto se puede traducir en posibles rugosidades, que en formas toroidales, engastes y detalles se aprecian a simple vista.

Habitualmente las impresoras más bastas llegan a imprimir hasta 200 μm , que es habitual en FDM, la altura de capa es un factor esencial en el acabado.



Esquema 15: Comparativa de altura de capa: 200 μm y 25 μm (White Paper: Introduction To Desktop Stereolithography, 2015)

- **Puesta a prueba de las resinas.**
- **Diferentes estilos de huecos.** La aparición de huecos en un diseño 3D es un elemento crítico, ya que puede provocar desprendimientos, fallos de impresión, o piezas incompletas. Con formas esféricas y biseladas el análisis en huecos se hace más evidente.
- Los anillos requieren **tolerancias milimétricas**. Aunque a simple vista puedan parecer aros adornados, los anillos tienen tallaje, que depende del diámetro interior que cabe en un dedo del portador. La diferencia entre tallas es de 0,762mm (el estándar es de 0,03 pulgadas entre tallas), pero hay modelos que se hacen con una diferencia inferior. Por ejemplo una talla 7 tiene 17,3mm de diámetro mientras que una 8 de 18,2mm, pero también se diseñan tallas de 7.5 (17,7cm).

En una situación extrema, 762 μm los formarían la adhesión 31 capas de resina. 31 capas es lo que supone que un anillo quede mal impreso y no quepa en un dedo. Por otro lado, 0,7mm es una distancia muy superior al grosor de las filigranas, de detalles o de las partes de un engarce.

- **Estudio de los soportes.** Son piezas que habitualmente no tienen una distribución de peso uniforme, por lo que la distribución de soportes no es uniforme en la impresión. Un estudio interesante es el posicionamiento e inclinación de las figuras en 3D.
- **Estudio de defectología.** Así como los soportes pueden influir desde el principio, los defectos de fundición no se observan hasta el último estado del proyecto, y pueden llevar a resultados inesperados, así como modificaciones constantes del planteamiento y formulación de hipótesis.

Un apunte interesante es el camino que puede tomar el metal cuando hay una cavidad o hueco en una pieza, puesto que para los engarces se prediseñan agujeros en la superficie del anillo. A la par, pueden surgir rechupes no deseados en esa misma superficie; así como grietas o porosidades. Incluso el hecho de añadir agujeros de 0,05mm de diámetro puede dar lugar a sopladuras y que se queden burbujas de aire en el anillo. Se puede observar en la siguiente figura.

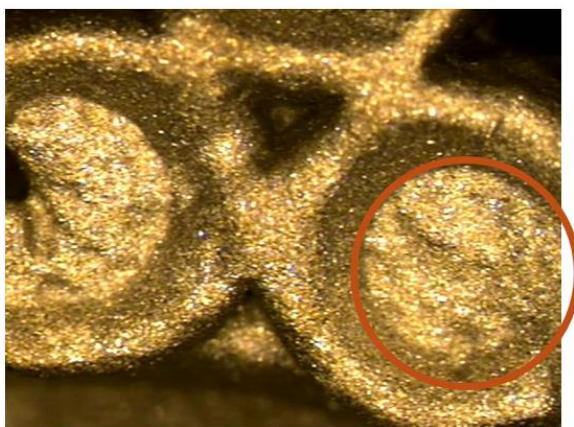
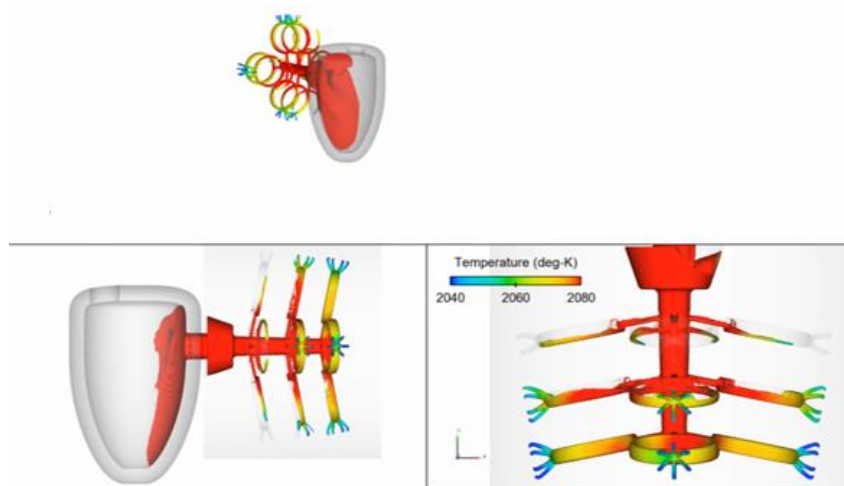


Imagen 71: Ejemplo de oclusiones de aire en una pieza. Dentro del círculo naranja no debería haber material. (Elaboración propia)

- **Ensayos con el revestimiento.** Como se ha comprobado en apartados anteriores, ambos revestimientos están diseñados para anillos de alto nivel de joyería. En añadidura a los ensayos, las proporciones de agua pueden ser un factor determinante en los resultados finales.
- **Estudio económico de las piezas.** Es posible que salga más rentable pedir los modelos a una empresa de impresión que hacerlo de forma particular.

- **Postprocesado de las piezas.** El lijado de piezas de joyería simples, como chapas, no tiene gran complicación. Las piezas escogidas tienen los suficientes detalles como para una maquinaria acorde a las exigencias.



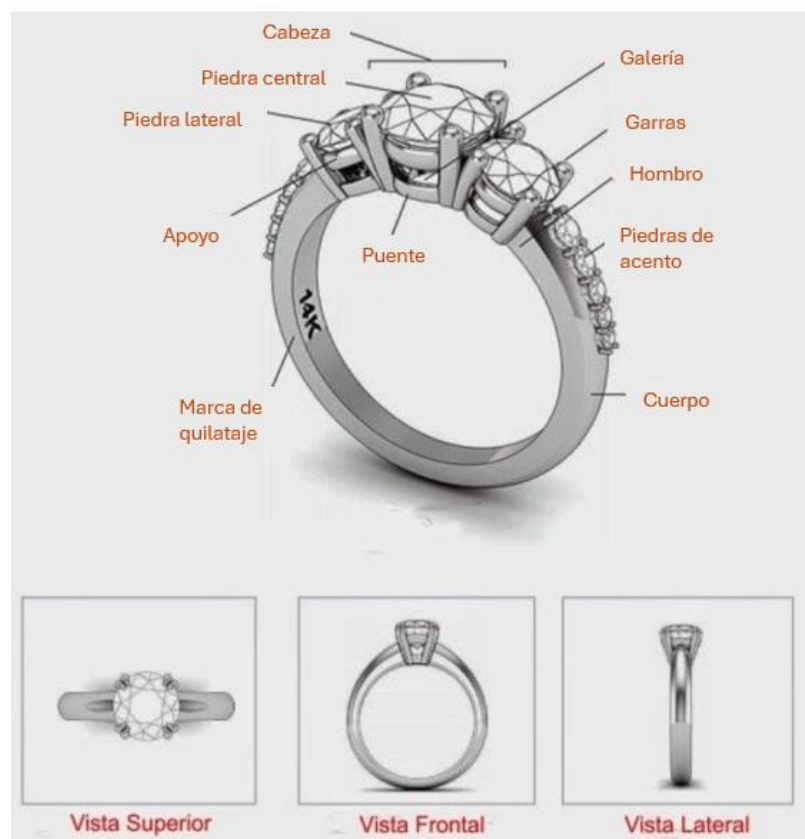
*Imagen 72: Simulación de colado centrífugo de fabricación de piezas de joyería por FLOW3D
(FLOW-3D, 2016a)*

4.1.2 Requisitos de las piezas acabadas

Los requisitos de las piezas terminadas son:

- Durabilidad.
- Funcionalidad.
- Estética.
- Resistencia.
- Buen acabado superficial.
- Precisión y exactitud.

Previo a desarrollar los parámetros que se han decidido utilizar para este proyecto, comentar las partes de un anillo. Esta **terminología** será utilizada en adelante.



Esquema 16: Partes de un anillo. (Kaia, 2014)

4.2 Parámetros

Los parámetros por los que se han elegido las piezas y en base a los cuales se van a catalogar son los que se van a exponer a continuación. Es posible que alguna pieza tenga un parámetro que no se expone en este punto.

4.2.1 Parámetros geométricos

- **Tamaño de los orificios.** El tamaño de los huecos que se puede conseguir en una pieza fundida. Cada proceso tiene sus propias restricciones, y las piezas tienen diferentes entramados. En piezas grandes, no supone un problema y se emplean núcleos para forzar estos huecos y ranuras. Estos deben ser lo más cortos posible en relación a su diámetro o anchura. En la medida de lo posible, se deben evitar los **agujeros ciegos**, ya que pueden causar problemas de fundido, como se ha adelantado en el anterior apartado.
- **Acabado superficial.** El acabado superficial determina su apariencia, su ensamblaje con otros elementos, su **rugosidad** además de su resistencia a la **corrosión**. Generalmente la rugosidad de piezas que van a ser sometidas a esfuerzos se debe controlar mediante ensayos en rugosímetro por su desempeño a fatiga, elongación, desgaste... En el caso de piezas de joyería, se debe controlar por la fricción y pequeñas porosidades, rebabas, apariencia estética y posible corrosión. Sería interesante someter las piezas a ensayos de rotura para observar por dónde parte y si influye el acabado superficial en las piezas, pero no aplica a el alcance de este proyecto.
- **Precisión y exactitud.** Se trata de parámetros de medida en **tolerancias**. Como las tolerancias se van a valorar de forma **cualitativa**, se ha decidido referirse a este concepto como “precisión y exactitud”. La tolerancia es la variación de la medida de una dimensión respecto de su medida nominal. Tolerancias más estrictas aumentan costes y tiempo de impresión, así como son más susceptibles a no obtener una pieza fundida igual al modelo. Las garras, los engarces o los huecos para las piedras de acento son el ejemplo perfecto de estas tolerancias; porque aunque un anillo no requiera unas tolerancias dimensionales extenuantes, como las de una turbina, esas partes deben ser idénticas a las proyectadas en 3D.

Habitualmente se definen las tolerancias más bastas de fundición como “as cast” (tolerancias de fundición) y requieren un mecanizado posterior.

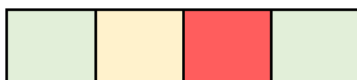
- **Complejidad.** La complejidad es el parámetro más difícil de definir. Está referido a su **tamaño, forma, y cantidad de características** que contiene. A medida que la pieza aumenta en complejidad, añadiéndole nuevos detalles, grabados, garras, acabados superficiales finos, filigranas, agujeros ciegos... la pieza debe ser estudiada, y escoger correctamente los procesos de fundición. La cera perdida es una técnica que puede producir un alto detalle, pero depende de muchos factores. Uno podría ser el colado, un colado por gravedad es adecuado para piezas menos complejas en cadena; o el gradiente de temperaturas en el interior del molde.

Estos parámetros se estudiarán en cada pieza con una **matriz de sensibilidad** bastante básica. El planteamiento es el siguiente:

<i>Dificultad</i>	<i>Parámetros de la pieza</i>			
	<i>Tamaño de los orificios</i>	<i>Acabado superficial</i>	<i>Precisión y exactitud</i>	<i>Complejidad</i>
<i>Baja</i>				
<i>Media</i>				
<i>Alta</i>				

Tabla 9: Tabla de parámetros de pieza y sensibilidad (Elaboración propia)

Con cada anillo, esta tabla pasará a estar simplificada, y como una pequeña leyenda se incluirá de la siguiente forma:



Con este pequeño diagrama se puede ver a simple vista cómo es la pieza y qué nivel de complejidad tiene. Con esto se puede estimar su comportamiento en fundición en cera perdida y a lo largo del proyecto. En caso de que una pieza no se obtenga adecuadamente según lo esperado, con esta tabla se puede atribuir a la complejidad del diseño o a errores humanos ejecutados a lo largo de los ensayos, como el comentado sobre la aparición de zinc en el paso de fundición.

En caso de influir algún parámetro complejo, como filigranas, garras complejas, o cantidad elevada de voladizos o necesidad de emplear mucho material se comentará en la propia figura.

Ilustrándolo con un ejemplo de un diseño ya expuesto en capítulos anteriores, esta pieza tiene alta complejidad en sus orificios, y la precisión debe ser vigilada. Aparentemente no es compleja, hasta que se ven el número de orificios por los que tiene que pasar el metal. Superficialmente, al ser lisa, es sencilla.

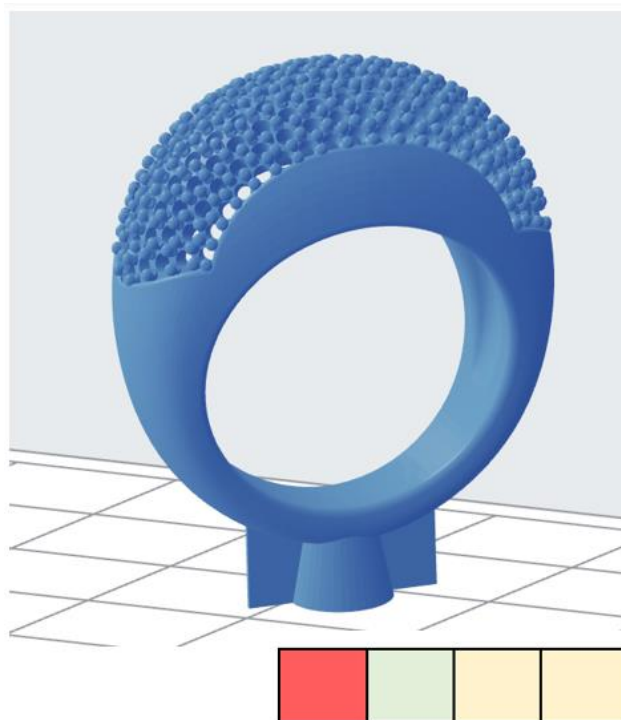


Imagen 73: Ejemplo de parámetros en un anillo (Elaboración propia)

4.2.2 Parámetros mecánicos

La fundición en cera perdida por gravedad afecta a las **propiedades mecánicas** del material, por ejemplo, sin un posterior recocido, las piezas que requieren un desempeño exigente no lo aguantarían las cargas.

Algunas propiedades a resaltar de las resinas que son destacables son el módulo de Young, el coeficiente de alargamiento, módulo de flexión, resistencia al impacto, dureza por penetración, deformación por compresión, expansión térmica o temperatura de reblandecimiento. La empresa Formlabs no proporciona esta información para las resinas calcinables, por lo que no es una línea de investigación para comparar con los datos nominales.

En este caso, se estudiará la defectología de fundición. Los defectos pueden ser internos y dar lugar a accidentes fatales. Algunas aleaciones son más propensas a sufrir defectos, en el caso del latón, este no suele resultar con un acabado superficial perfecto y brillante, y tiende a las porosidades. Otro defecto es que al cuerpo principal de latón se le depositan partes de escoria o metal no fundido correctamente, por lo que termina siendo una pieza anisotrópica. Habitualmente las piezas de latón requieren mecanizado final para solucionar e inspeccionar estos defectos.



Imagen 74: Pequeñas porosidades y deposiciones de metal mal fundido en piezas finales (Elaboración propia)

4.2.3 Variables de impresión 3D y constantes

Estas **variables de impresión** vienen dadas por la impresora Formlabs 3, la resina, la geometría de la pieza, y su orientación. Son relevantes a la hora de calcular el coste de impresión y para catalogar cada ensayo y prueba.

- **Material:** Castable Wax 40 Resin o Castable Wax Resin
- **Volumen de resina** fotopolimerizado (ml).
- **Tiempo** de impresión (h).
- **Número de capas** (uds).
- **Altura de capa** (μm).
- **Espacio en la bandeja de impresión** (cm^2).

Por otro lado, hay **constantes** que también se deben tener en cuenta ya que una pequeña variación en las mismas, puede provocar un objeto mal fotopolimerizado. Entre ellas se encuentran:

- Temperatura del tanque de resina: 35°C .
- Temperatura ambiente o del laboratorio: 21°C .
- Presión de trabajo: 1atm.
- Tecnología del láser de fotopolimerización: rayo único de luz ultravioleta, SLA, mediante tecnología LPU.
- Longitud de onda de luz UV de fotopolimerización: 405 nm.

4.2.4 Parámetros generales

En este último apartado, se enumeran **parámetros generales** que no influyen realmente en el proyecto porque son el caso de estudio e implícitos en el proyecto son:

- Formas.
- Horas de trabajo.
- Tipo de materiales.
- Nivel de destreza en el área.
- Disponibilidad de materiales y maquinaria.
- Volúmenes requeridos. Tanto en revestimiento, como en materiales de fabricación.

5. Modelos seleccionados

Los modelos seleccionados para la realización del proyecto son los presentados a continuación.

La autoría de muchos de estos modelos es desconocida. Los modelos son gratuitos y se han obtenido de webs como sketchfab, Thingiverse, GrabCAD, 3DExport, free3d y CGTrader. Al ser modelos que se comparten constantemente de forma gratuita, no se tiene registro del autor original. Otros, cuyas fotografías se ven con fondo azul, han sido cedidos generosamente por Formlabs.

Las características indicadas son para una altura de capa de 50 μm y en la posición indicada. Si la sección circular fuera paralela al plano de impresión serían menos capas.

Las imágenes siguientes son de elaboración propia.

Parámetros de la pieza

Tamaño de los orificios	Acabado superficial	Precisión y exactitud	Complejidad
-------------------------	---------------------	-----------------------	-------------

Modelo 1: Alambre

Características: cuenta con 8 alambres que se entrecruzan formando un patrón sencillo. Cuenta con orificios en todas sus secciones, y todos sus cantos son redondeados.

Tiempo: 3 horas de impresión

Capas: 370

Volumen de resina: 0,76 ml



--	--	--	--

Parámetros de la pieza

Tamaño de los orificios	Acabado superficial	Precisión y exactitud	Complejidad
-------------------------	---------------------	-----------------------	-------------

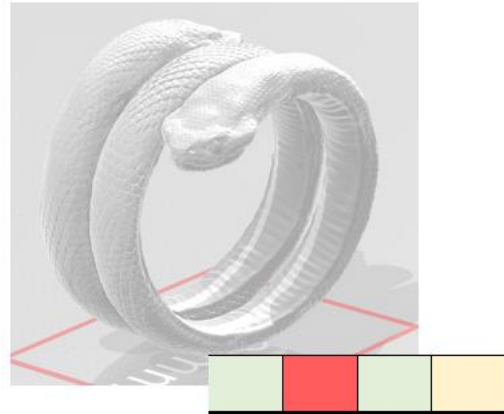
Modelo 2: Serpiente

Características: Geometría helicoidal cuyas secciones no son circulares. Superficie con alto nivel de detalle y complejidad.

Tiempo: 3horas 30minde impresión

Capas: 454

Volumen de resina: 1,47 ml



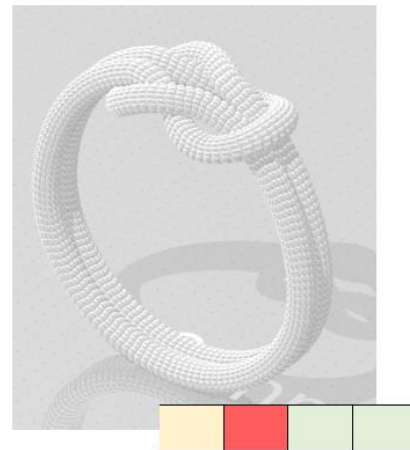
Modelo 3: Nudo de cordón

Características: Superficie con alto nivel de detalle. Diseño sencillo. Pequeñas aperturas en la geometría del nudo.

Tiempo: 3horas 15min de impresión

Capas: 430

Volumen de resina: 0,33 ml



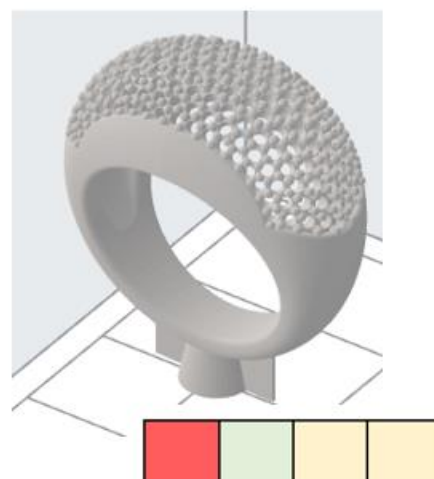
Modelo 4: Anillo pave

Características: Anillo de geometría y superficie sencilla. Nivel detallado y exigente de orificios. Baja tolerancia por la cantidad y dimensiones de las garras.

Tiempo: 3horas 17min de impresión

Capas: 624

Volumen de resina: 1,35 ml



Parámetros de la pieza

Tamaño de los orificios	Acabado superficial	Precisión y exactitud	Complejidad
-------------------------	---------------------	-----------------------	-------------

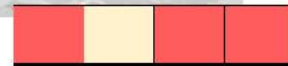
Modelo 5: Anillo filigrana flor

Características: Anillo de geometría y dificultad compleja. Cuenta con un nivel de detalle alto por la filigrana. Alta exigencia técnica.

Tiempo: 3horas 2min de impresión

Capas: 614

Volumen de resina: 0,42 ml



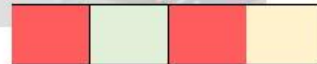
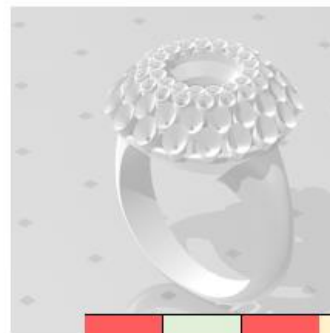
Modelo 6: Anillo trypa

Características: Anillo con una alta cantidad de aperturas en forma ovalada, no son para engarces. Tamaño de los orificios variado

Tiempo: 4horas 15min de impresión

Capas: 529

Volumen de resina: 1,34 ml



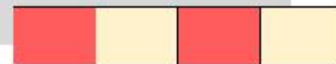
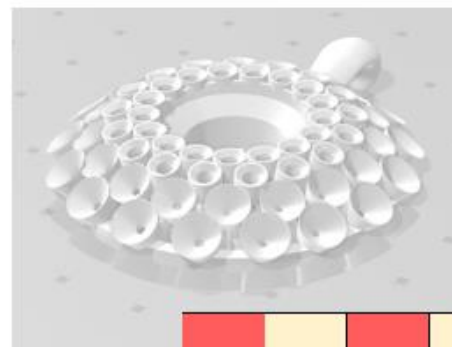
Modelo 7: Colgante trypa

Características: El proyecto está enfocado en anillos, pero se consideró interesante ver las diferencias de un mismo diseño en dimensiones diferentes.

Tiempo: 3horas de impresión

Capas: 291

Volumen de resina: 9,46 ml



Parámetros de la pieza

Tamaño de los orificios	Acabado superficial	Precisión y exactitud	Complejidad
-------------------------	---------------------	-----------------------	-------------

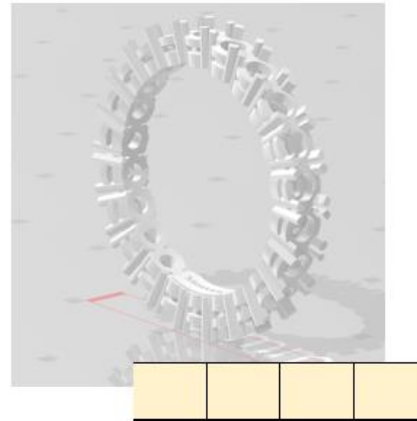
Modelo 8: Anillo eternidad

Características: Anillo de fino grosor, número elevado de galerías, dobles apoyos y garras. Cuenta con grabados

Tiempo: 3horas 30min de impresión

Capas: 451

Volumen de resina: 0,22 ml



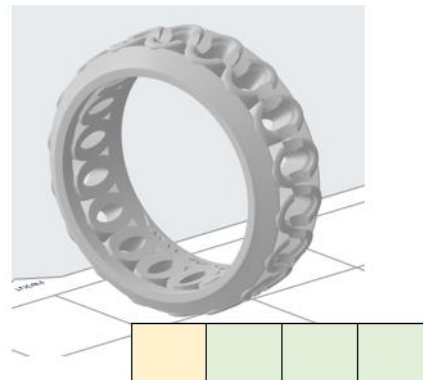
Modelo 9: Banda con óvalos

Características: Anillo de acabado basto, número elevado de huecos y garras. Acabado superficial liso y patrón simple.

Tiempo: 3horas 15min de impresión

Capas: 413

Volumen de resina: 0,57 ml



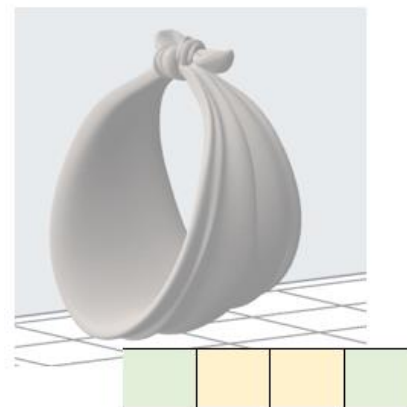
Modelo 10: Bandana

Características: Diseño simple y tolerancia superficial media. Detalles de impresión y fundido exigentes en el nudo.

Tiempo: 2horas 45min de impresión

Capas: 480

Volumen de resina: 1,07 ml



Parámetros de la pieza

Tamaño de los orificios	Acabado superficial	Precisión y exactitud	Complejidad
-------------------------	---------------------	-----------------------	-------------

Modelo 11: Vértebra

Características: Diseño basto de un anillo con forma de vértebra. Acabado liso, sin detalles. Es el de mayor tallaje.

Tiempo: 4horas 27min de impresión

Capas: 859

Volumen de resina: 4,45 ml



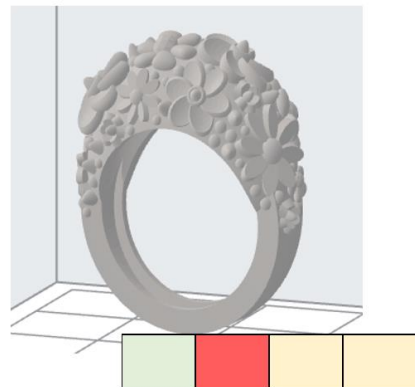
Modelo 12: Flores

Características: Diseño sencillo. Sin agujeros ni acabados especiales. La complejidad de este diseño recae en los detalles de las flores.

Tiempo: 2horas 51min de impresión

Capas: 521

Volumen de resina: 1,27 ml



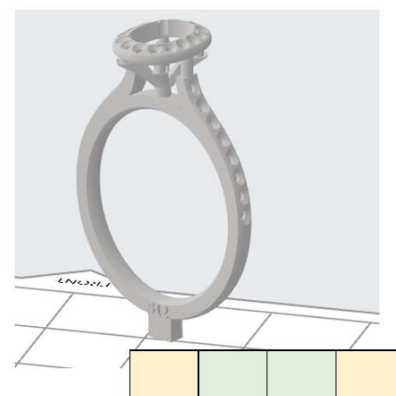
Modelo 13: Anillo de compromiso

Características: Anillo sencillo. Pequeños detalles en la corona de la pieza. Huecos para engarces y piedras de acento.

Tiempo: 2horas 49min de impresión

Capas: 561

Volumen de resina: 0,31 ml



Parámetros de la pieza

Tamaño de los orificios	Acabado superficial	Precisión y exactitud	Complejidad
-------------------------	---------------------	-----------------------	-------------

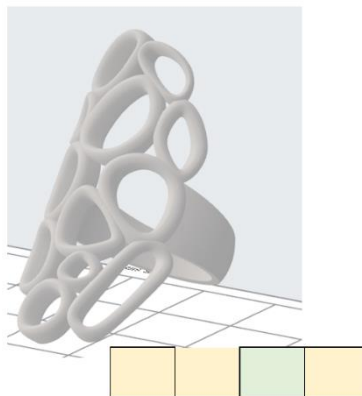
Modelo 14: Diseño de óvalos

Características: Con un diseño basado en un mallado de óvalos, este anillo supone un reto de diseño ejecución.

Tiempo: 3horas 13min de impresión

Capas: 611

Volumen de resina: 1,22 ml



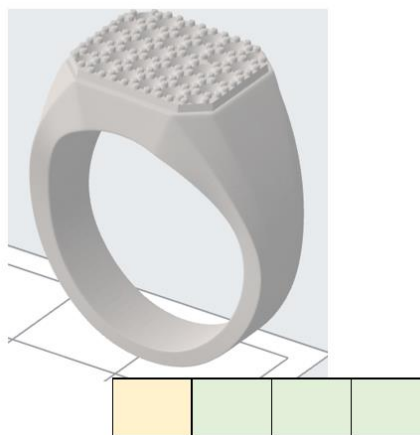
Modelo 15: Anillo universitario

Características: Anillo de acabado basto, con pave para colocar gemas. Acabados superficiales sencillos. Baja exigencia de precisión.

Tiempo: 2horas 42min de impresión

Capas: 488

Volumen de resina: 1,19 ml



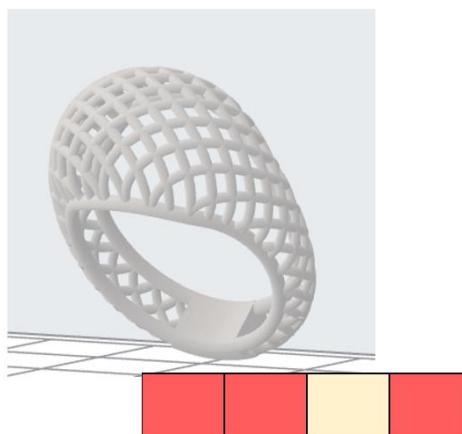
Modelo 16: Anillo mallado

Características: Anillo con un diseño mallado y grosor medio. Las uniones entre la malla y el contorno suponen un reto por no tener cantos redondeados.

Tiempo: 2horas 33min de impresión

Capas: 466

Volumen de resina: 0,45 ml



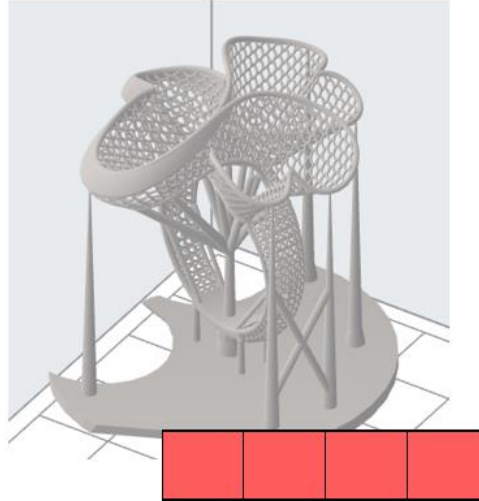
Modelo 17: Anillo Formlabs

Características: Anillo complejo tanto en huecos, acabado superficial, complejidad y precisión. Es para Formlabs un anillo de referencia en su calidad de impresión.

Tiempo: 3horas 36min de impresión

Capas: 732

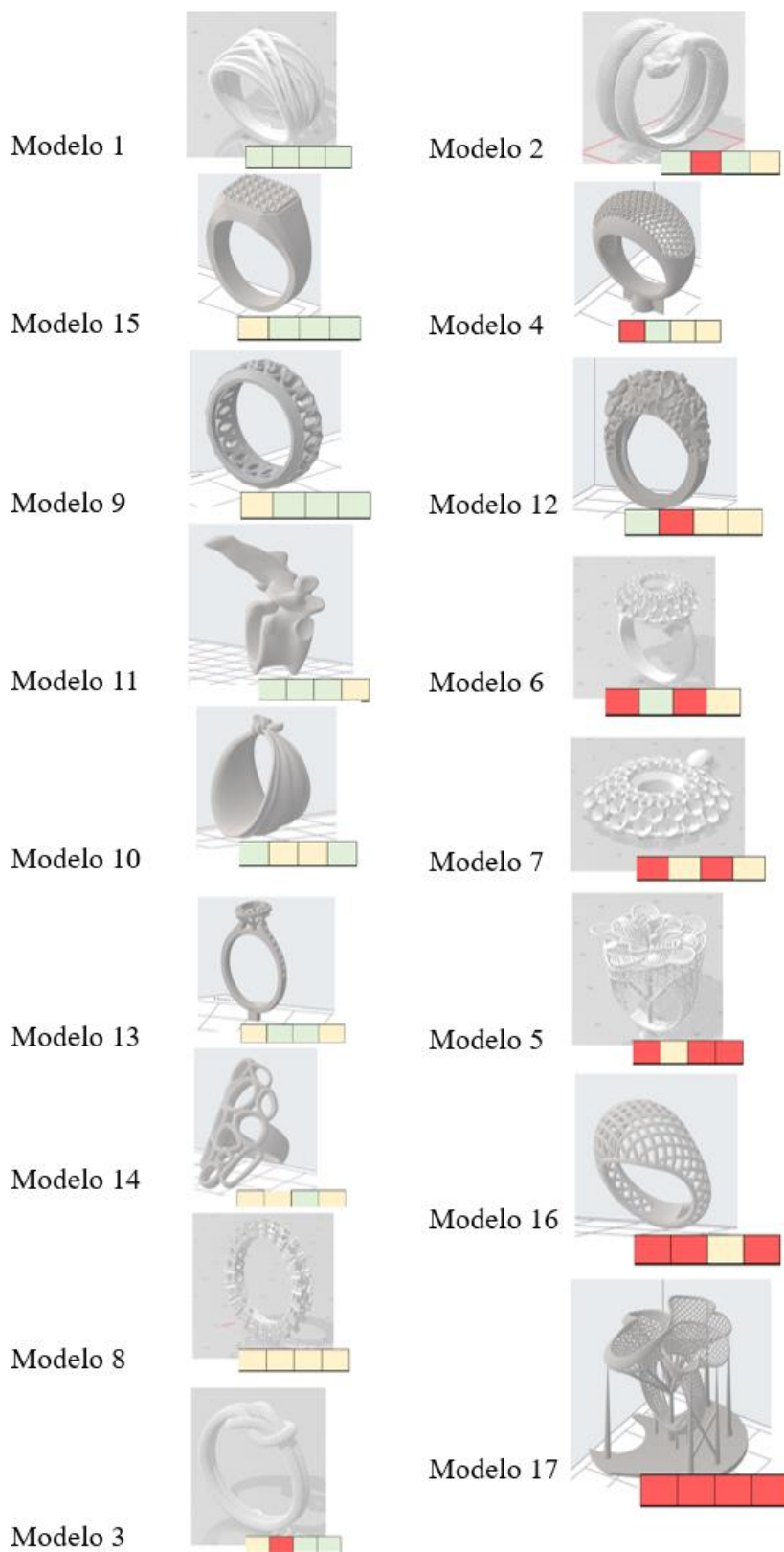
Volumen de resina: 2,29 ml



Parámetros de la pieza			
Tamaño de los orificios	Acabado superficial	Precisión y exactitud	Complejidad

Con este esquema se puede observar qué elementos son los más complejos en términos generales. Cabe añadir que en los próximos reportajes fotográficos posiblemente se vean anillos que no se han fundido ni se han empleado en pasos posteriores por no ser relevantes ni diferenciarse notablemente del resto de modelos.

A continuación se van a presentar los modelos en forma de esquema resumen:



Esquema 17: Esquema resumen de los parámetros de cada anillo (Elaboración propia)

6. Ensayos en impresión 3D

6.1 Primera impresión

La **primera impresión** se realizó con **piezas de prueba** sencillas como entrenamiento en la tecnología SLA y la colocación de soportes en impresión 3D. El software empleado para el lanzamiento de las piezas en la Form3 es PreForm, el software de tratamiento de impresiones de FormLabs. Debido a esto los **soportes** están colocados en posiciones **poco eficientes**, y el tiempo de impresión es superior al que debería darse.

Se imprimieron las siguientes unidades:

- 2 unidades del modelo 1.
- 1 unidad del modelo 2.
- 3 unidades del modelo 3.
- 2 unidades del modelo 4.

Características de impresión

<i>Material</i>	Castable Wax 40
<i>Altura de capa</i>	50 μm
<i>Volumen de resina empleado con soportes</i>	32,5 ml
<i>Volumen de resina empleado sin soportes</i>	5,99 ml
<i>Capas</i>	707
<i>Tiempo de impresión total con soportes</i>	7h 34min
<i>Tiempo de impresión hipotético sin soportes</i>	5h 7 min

Tabla 10: Características de la primera impresión (Elaboración propia)



Imagen 75: Piezas en PreForm de la primera impresión (Elaboración propia)

6.2 Conclusiones de la primera impresión

En esta impresión los resultados fueron positivos. Las piezas se imprimieron **correctamente**, con unos niveles de precisión por encima de los esperados.



Imagen 76: Resultado de la primera impresión (Elaboración propia)

Tras el lavado y acondicionado de las piezas según el fabricante (3.2.3.2 Las resinas) se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Las **piezas** deben estar lo más **pegadas entre ellas para optimizar el tiempo de impresión** y evitar errores, como por ejemplo, que el láser indirectamente polimerice otras partes de la tirada. Cuanto más se aproveche el espacio en la bandeja, menor consumo y mejores resultados.
- Los **soportes deben estar planteados en función de unos criterios de peso y geometría**. En piezas en las que el peso no está uniformemente distribuido, se deben inclinar un ángulo entre 30° y 40°. En piezas planas, con inclinarlas entre 10° y 20°, el éxito está asegurado en la impresión. Además los apoyos deben plantearse para minimizar la resina utilizada garantizando un buen acabado.



Imagen 77: Correcto posicionamiento de los soportes en la primera impresión (Elaboración propia)

Respecto a los soportes, además hay otra medida a emplear para optimizar la impresión, que es reducir la base de los apoyos. PreForm permite un tratamiento de los apoyos en el que las bases son: completas (como en la primera impresión) en las que la figura está elevada sobre la bandeja de impresión, permite un agarre mejor y garantiza mejores acabados a pesar del consumo de resina; minibases, en las que la pieza no tiene una elevación sobre la bandeja, si no que cada pilar es su propio soporte (como en la última impresión); y sin usar base, que permite autogestionar los apoyos (como en el modelo 17).

- En esta tirada, aun habiendo **sobredimensionado** los apoyos, por el mal posicionamiento y la eliminación en el software de apoyos en zonas críticas, un anillo tuvo una rotura; y a otro se le desprendieron los apoyos, como se adelantaba en el apartado 3.2.2.3 Características del SLA.

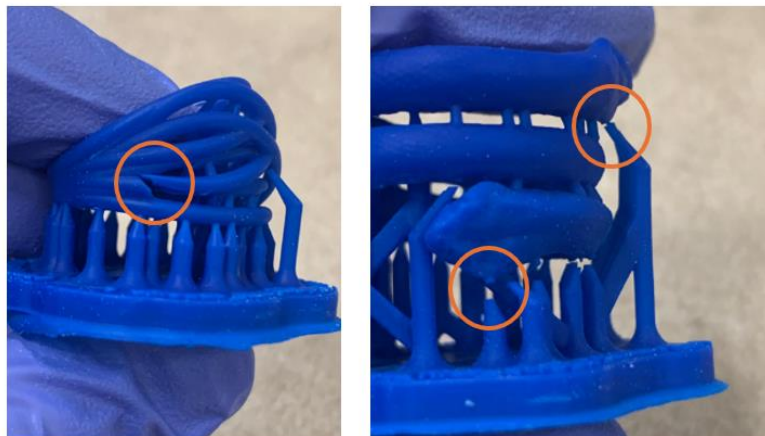


Imagen 78: Izda. Rotura de la pieza Dcha. Desprendimiento de los apoyos (Elaboración propia)



Imagen 79: Piezas con una correcta impresión de la primera tirada (Elaboración propia)

6.3 Segunda impresión

Una vez estudiadas las conclusiones de la primera impresión, se **mejoraron los soportes, eliminando volumen y elementos innecesarios**. También se probaron nuevos grados de inclinación de las piezas. Este ensayo tenía como objetivo contemplar si las hipótesis planteadas eran correctas y obtener más piezas en Castable Wax 40.

Se imprimieron las mismas unidades para poder compararlo:

- 2 unidades del modelo 1.
- 1 unidad del modelo 2.
- 3 unidades del modelo 3.
- 2 unidades del modelo 4.

Características de impresión

Material	Castable Wax 40
Altura de capa	25 μ m
Volumen de resina empleado con soportes	18,11 ml
Volumen de resina empleado sin soportes	6,11 ml
Capas	1354
Tiempo de impresión total con soportes	19h 5min
Tiempo de impresión hipotético sin soportes	14h 25 min

Tabla 11: Características de la segunda impresión (Elaboración propia)

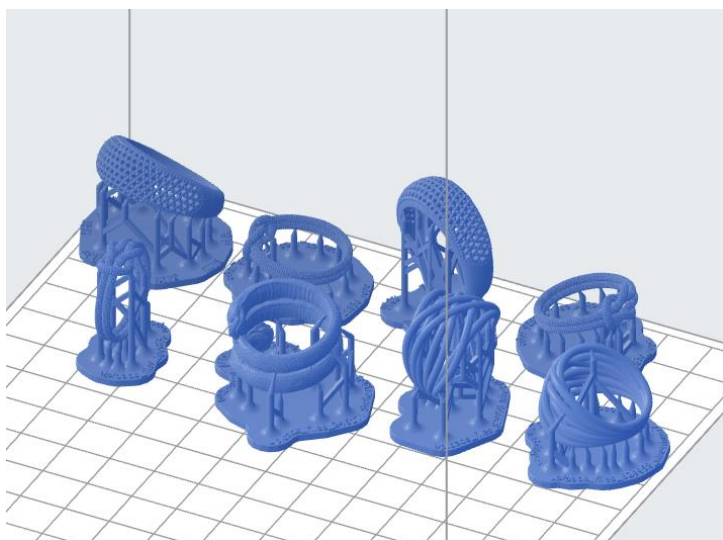


Imagen 80: Piezas en PreForm de la segunda impresión (Elaboración propia)

6.4 Conclusiones de la segunda impresión

En esta impresión hubo un **incidente** con la impresora, en un momento se desestabilizó y comenzó a vibrar. Por lo que de esta tirada salieron muchas piezas defectuosas. Se tuvo que repetir el ensayo al día siguiente, en el cual, las piezas entraron dentro de lo esperado. Como no se esperaba esta defectología, ha sido una buena oportunidad para estudiar los defectos que se pueden producir en una impresión en SLA. (*FormLabs Customer Support*, s. f.)

- **Cortes.** Zonas en las que la pieza sufre una deformación y adquiere la forma de una cizalladura.
- **Delaminación.** Se produce por falta de adherencia entre capas, lo cual hace que las capas ya curadas se suelten entre ellas.
- **Pelado “ragging”.** Es un fenómeno en el que se curan zonas de resina que no afectan a la integridad de la pieza final. Sobresalen horizontalmente de la pieza.
- **Impresión incompleta.** Se da cuando por fallos del sistema de impresión, la pieza no se imprime. Se observan capas sueltas, y trozos desprendidos en el tanque de resina.

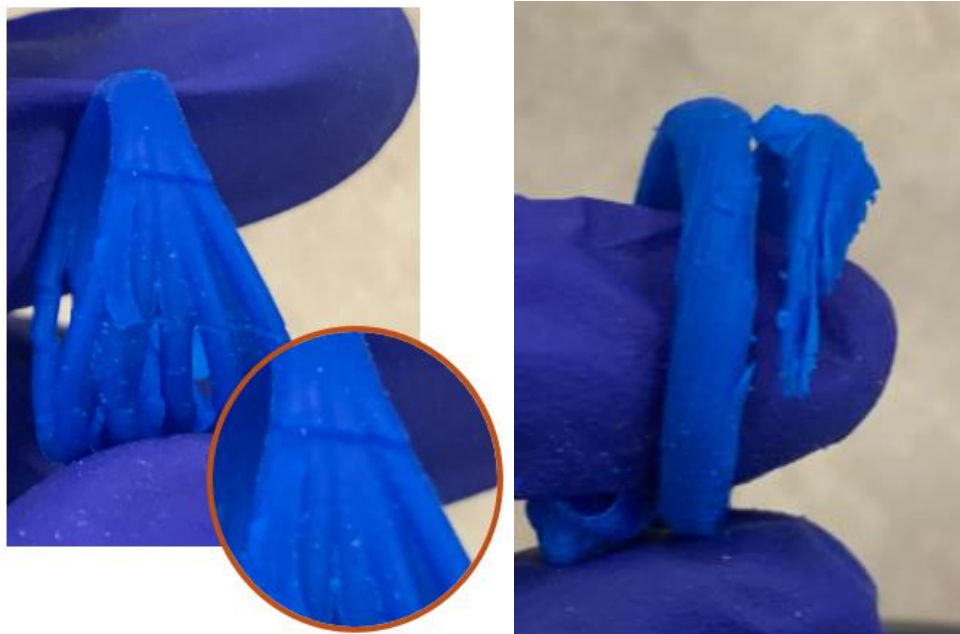


Imagen 81: Cortes en la pieza (Elaboración propia)

Imagen 82: Delaminación tras el lavado de la pieza (Elaboración propia)



Imagen 83: Pelado observado en la segunda impresión (Elaboración propia)

Imagen 84: Impresión incompleta en la segunda impresión (Elaboración propia)

Tras la **repetición** de la segunda impresión, los resultados fueron los esperados. Impresiones de alta calidad, entrando en rango, y reflejando todos los detalles esperados de esta impresión: huecos, texturas, geometrías complejas...

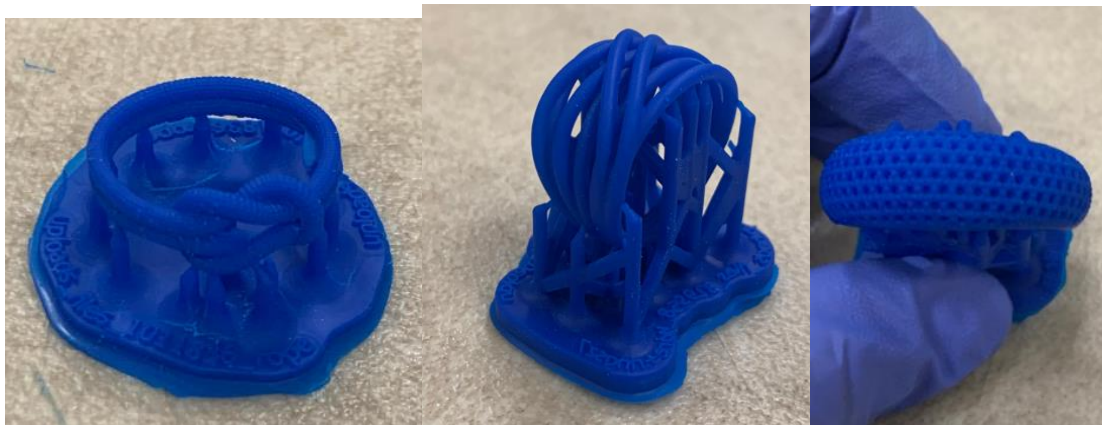


Imagen 85: Piezas repetidas de la segunda impresión (Elaboración propia)

6.5 Tercera impresión

El objetivo de esta tirada es **probar nuevos modelos**, los cuales siendo de geometría sencilla, ya presentan un reto para la resina fotopolimerizable empleada.

Se imprimieron siguientes unidades de prueba:

- 1 unidad del modelo 10.
- 1 unidad del modelo 11.
- 1 unidad del modelo 12.
- 1 unidad de un modelo que terminó siendo descartado.

Características de impresión

<i>Material</i>	Castable Wax 40
<i>Altura de capa</i>	25 μm
<i>Volumen de resina empleado con soportes</i>	18,10 ml
<i>Volumen de resina empleado sin soportes</i>	8,17 ml
<i>Capas</i>	1976
<i>Tiempo de impresión total con soportes</i>	22h 8min
<i>Tiempo de impresión hipotético sin soportes</i>	17h 18min

Tabla 12: Características de la tercera impresión (Elaboración propia)

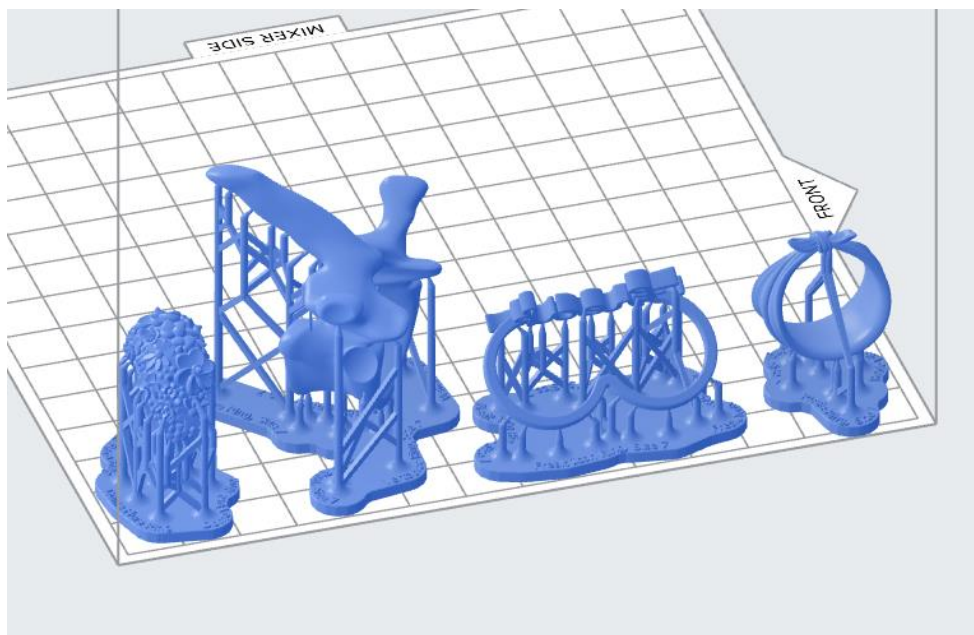


Imagen 86: Piezas en PreForm de la tercera impresión (Elaboración propia)

6.6 Conclusiones de la tercera impresión

Es el último ensayo en Castable Wax 40, ya que la Castable Wax da no solo mejores acabados, si no que con estos cuatro modelos se han estudiado los siguientes parámetros: tamaño de orificios, acabado superficial, tolerancias y complejidad. En base al diagrama de sensibilidades, no se podrían imprimir piezas como el modelo 6 o 17 en esta resina porque, tal y como se ha desarrollado en el apartado 3.2.3.2 Las resinas, sirve para piezas de grandes dimensiones y bajas exigencias.

En este ensayo se resalta la **influencia de los soportes**, ya que modificando el tamaño de **punto de contacto**, se pueden soltar los soportes con mayor facilidad, sin dejar marcas (muescas) en las columnas del apoyo. Un tamaño de punto bajo puede generar desprendimientos de piezas, por lo que es necesario valorar un equilibrio entre el tamaño de punto y la densidad de la pieza.

El programa además genera por defecto soportes internos, que es necesario eliminar en la mayor parte de los casos, ya que en el proceso de limpieza y lijado de las resinas, se puede dañar la pieza, y en el fundido quedan perfectamente plasmados.



Imagen 87: Punto de contacto en una pieza de la tercera impresión (Elaboración propia)



Imagen 88: Soportes internos en una pieza de la tercera impresión (Elaboración propia)

6.7 Cuarta impresión

El propósito de esta impresión es **profundizar en las complejidades** de piezas con características como filigranas y oquedades. Para piezas complejas se utiliza la Castable Wax, por su alta calidad en sus resultados.

Se imprimieron las mismas unidades para poder compararlo:

- 2 unidades del modelo 5.
- 3 unidades del modelo 6.
- 2 unidades del modelo 7.
- 2 unidades del modelo 8.
- 2 unidades del modelo 9.

Características de impresión

Material	Castable Wax
Altura de capa	50 μ m
Volumen de resina empleado con soportes	44,29 ml
Volumen de resina empleado sin soportes	15,45 ml
Capas	949
Tiempo de impresión total con soportes	9h 34min
Tiempo de impresión hipotético sin soportes	5h 54 min

Tabla 13: Características de la cuarta impresión (Elaboración propia)

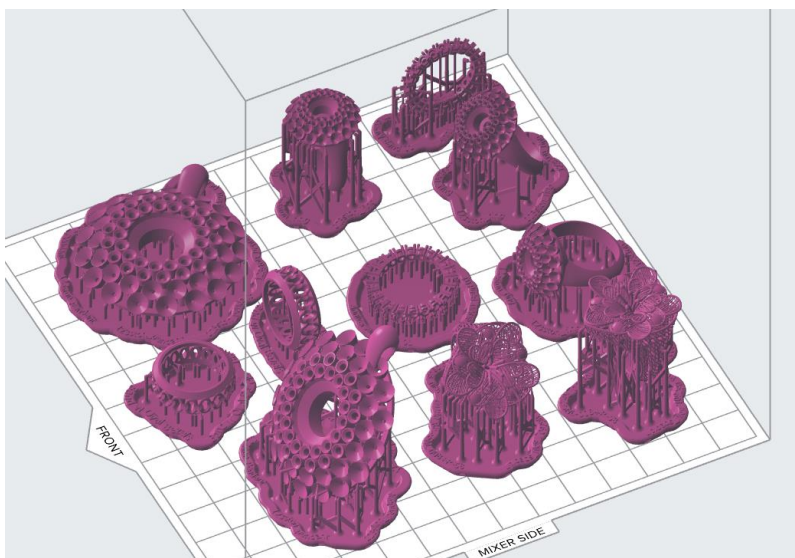


Imagen 89: Piezas en PreForm de la cuarta impresión (Elaboración propia)

6.8 Conclusiones de la cuarta impresión

La cuarta impresión se desarrolló con éxito.

Se puede comprobar la diferencia de comportamiento de esta resina con respecto a la Castable Wax 40, ya que esta es mucho más rígida y frágil. Los detalles los obtiene con alta precisión. Tal y como se puede ver en las siguientes fotografías, la Castable Wax da unos resultados excelentes.



Imagen 90: Bandeja con las piezas de la cuarta impresión (Elaboración propia)

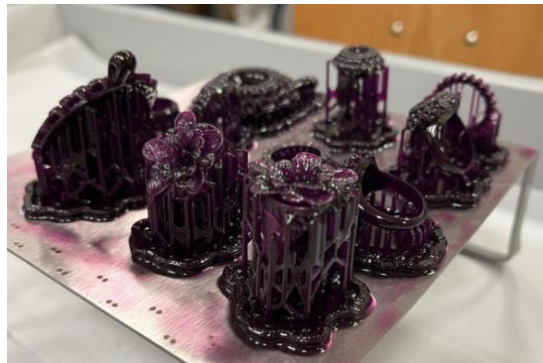


Imagen 91: Bandeja con las piezas de la cuarta impresión (Elaboración propia)



Imagen 92: Piezas lavadas de la cuarta impresión (Elaboración propia)

6.9 Quinta impresión

De la impresión anterior, se obtuvo una pieza defectuosa, concretamente el modelo 5 por lo que se incluyó en esta tirada. Esta tirada está **enfocada a obtener piezas de complejas** para observar y comparar el alcance de la impresora. Se imprimieron las siguientes unidades:

- 1 unidad del modelo 4.
- 1 unidad del modelo 12.
- 1 unidad del modelo 13.
- 1 unidad del modelo 14.
- 1 unidad del modelo 15.
- 2 unidades del modelo 16.
- 1 unidad del modelo 17.
- 1 unidad de un modelo que terminó siendo descartado.

Características de impresión

<i>Material</i>	Castable Wax
<i>Altura de capa</i>	50 μm
<i>Volumen de resina empleado con soportes</i>	17,89 ml
<i>Volumen de resina empleado sin soportes</i>	9,43 ml
<i>Capas</i>	748
<i>Tiempo de impresión total con soportes</i>	5h 28min
<i>Tiempo de impresión hipotético sin soportes</i>	4h 50 min

Tabla 14: Características de la quinta impresión (Elaboración propia)

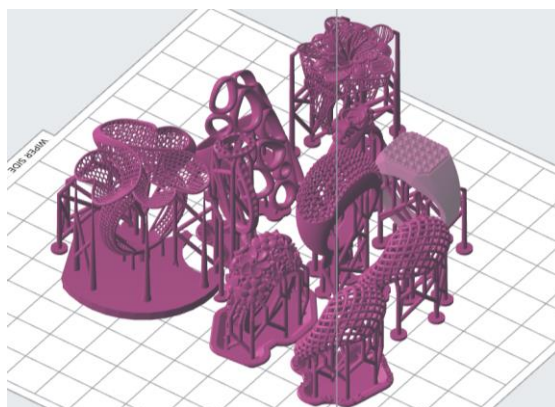


Imagen 93: Piezas en PreForm de la quinta impresión (Elaboración propia)

6.10 Conclusiones de la quinta impresión

Esta impresión, al igual que la anterior **se desarrolló con éxito**. No existe diferencia entre las piezas elaboradas en esta tanda y la anterior, puesto que no se modificó la altura de capa, ni el material.

En esta tirada se pone en práctica lo ya mencionado de la **distribución de las piezas en la bandeja**, para agilizar el proceso de impresión y mejorar los resultados.



Imagen 94: Bandeja con las piezas de la quinta impresión (Elaboración propia)

En esta impresión se detectó un defecto en uno de los anillos, una delaminación en el cuerpo del modelo 14. En la siguiente fotografía además se da una imagen del efecto de imprimir con puntos de contacto de pequeño diámetro.

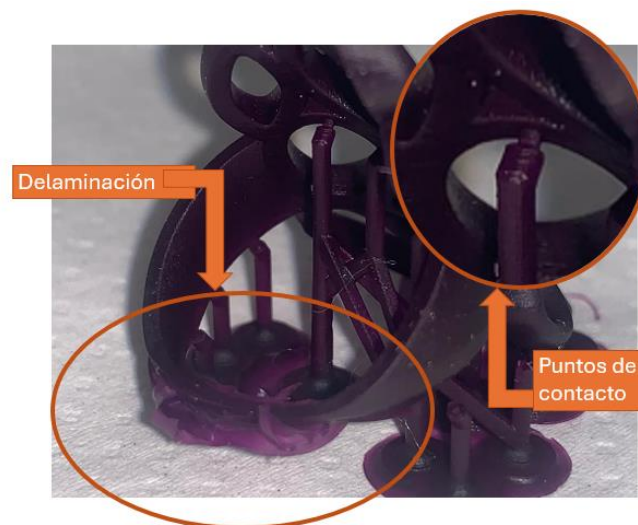


Imagen 95: Puntos de contacto y delaminación la quinta impresión (Elaboración propia)

6.11 Sexta impresión

A partir de las conclusiones del apartado anterior, se decidió imprimir una tirada enfocada a la fabricación a la cera perdida. Se trata de una **tirada producida en masa** con varios objetivos: comparar la mayor parte de las piezas en Castable Wax con las obtenidas en Castable Wax 40; obtener una tirada numerosa (19 piezas) y optimizar los soportes, así como el espacio de la bandeja.

Se imprimieron las siguientes unidades:

- 2 unidades del modelo 1.
- 2 unidades del modelo 2.
- 2 unidades del modelo 3.
- 2 unidades del modelo 4.
- 2 unidades del modelo 5.
- 1 unidad del modelo 10.
- 1 unidad del modelo 11.
- 1 unidad del modelo 12.
- 2 unidades del modelo 13.
- 2 unidades del modelo 14.
- 2 unidades del modelo 17.

Características de impresión

<i>Material</i>	Castable Wax
<i>Altura de capa</i>	50 μm
<i>Volumen de resina empleado con soportes</i>	38,93 ml
<i>Volumen de resina empleado sin soportes</i>	22,81 ml
<i>Capas</i>	988
<i>Tiempo de impresión total con soportes</i>	8h 7min
<i>Tiempo de impresión hipotético sin soportes</i>	6h 3min

Tabla 15: Características de la sexta impresión (Elaboración propia)

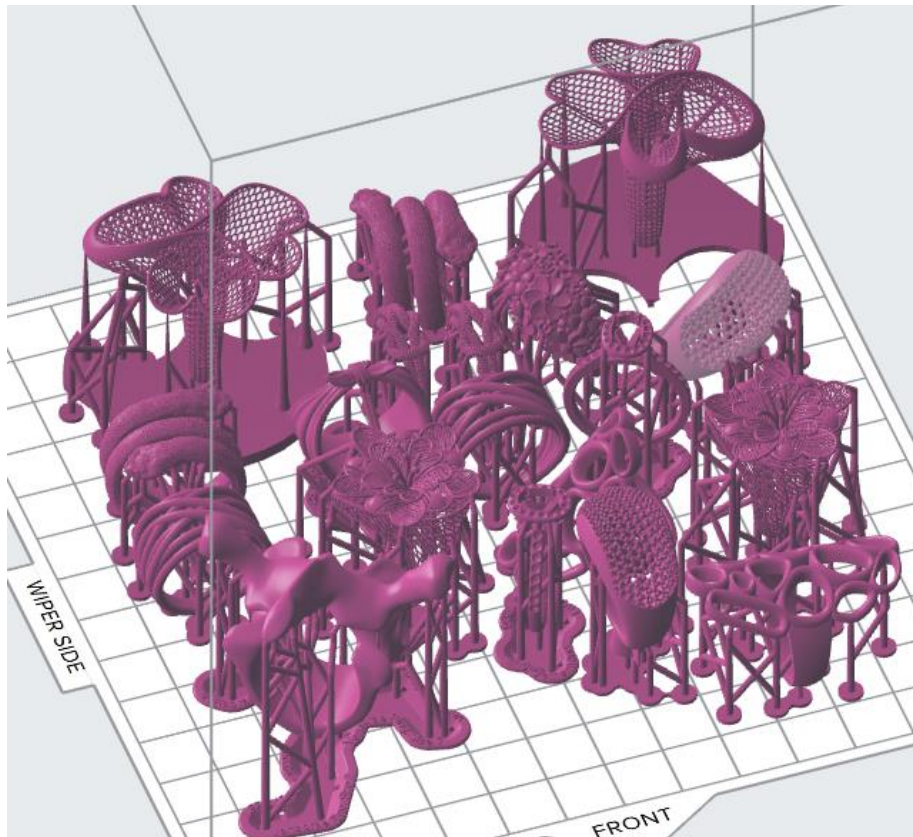


Imagen 96: Piezas en PreForm de la sexta impresión (Elaboración propia)

6.12 Conclusiones de la sexta impresión

En esta impresión se **mantiene el criterio de imprimir a 50 μm** . Es la primera impresión que se hace con una tirada con un objetivo de producción en masa, en lugar de estar orientada a investigación y observación de resultados. Además no coincide la fotografía superior con la bandeja de impresión porque se **optimizó la colocación y ocupación del espacio de la bandeja** al lanzar el modelo a PreForm. Las bases se optimizaron casi en su totalidad para ser **minibases** y reducir el consumo de resina, tal y como se había empezado a hacer en la quinta impresión.

De esta tirada se repiten modelos de los elaborados con Castable Wax 40, para poder compararlos y apreciar si hay diferencias significativas geométricas entre modelos; para decantarse entre una resina u otra. Como ya se ha especificado, la resina 40 no funciona adecuadamente para piezas con filigranas, mallas y muchos agujeros, así que la comparación se hace al mismo nivel.

Como se puede apreciar en las imágenes que siguen a continuación, esta resina trabaja no solo bien los detalles finos, también piezas con texturas complejas.



Imagen 97: Bandeja con piezas de la sexta impresión (Elaboración propia)



Imagen 98: Piezas lavadas de la sexta impresión (Elaboración propia)



Imagen 99: Piezas lavadas de la sexta impresión (Elaboración propia)

6.13 Séptima y última impresión

Esta fue la última impresión, de la cual se obtuvieron suficientes modelos para satisfacer la demanda real que había en el proceso de fundición en ese momento. Para evitar tener que recurrir a la impresora una vez se pasó a la siguiente etapa, se realizó una última tirada con la mayor parte de modelos, en este caso con mayor enfoque en los modelos complejos, que son los que se previeron como problemáticos en impresión 3D.

Además, se aprovechó para reducir la **altura de capa a 25 µm**, y observar su desempeño en una tirada tan densa. Se imprimieron las siguientes unidades, sumando un total de 29:

- 2 unidades del modelo 1.
- 2 unidades del modelo 2.
- 2 unidades del modelo 3.
- 3 unidades del modelo 4.
- 4 unidades del modelo 6
- 3 unidades del modelo 8.
- 2 unidades del modelo 10.
- 1 unidad del modelo 11.
- 3 unidades del modelo 12.
- 2 unidades del modelo 13.
- 2 unidades del modelo 14.
- 2 unidades del modelo 17.
- 2 unidades de un modelo de muestra de FormLabs.

Características de impresión

<i>Material</i>	Castable Wax
<i>Altura de capa</i>	25 µm
<i>Volumen de resina empleado con soportes</i>	61,69 ml
<i>Volumen de resina empleado sin soportes</i>	38,87 ml
<i>Capas</i>	1496
<i>Tiempo de impresión total con soportes</i>	20h 55min
<i>Tiempo de impresión hipotético sin soportes</i>	16h 39min

Tabla 16: Características de la séptima impresión (Elaboración propia)



Imagen 100: Piezas en PreForm de la séptima impresión (Elaboración propia)

6.14 Conclusiones de la séptima impresión

En la última impresión se siguió el planteamiento de las tiradas anteriores, e imprimir con un criterio de volumen, para evitar que en el proceso de fundición faltasen piezas. Con esta idea en mente, se decidió pasar a imprimir a 25 μm , que como se puede ver en la tabla anterior, es notablemente más lento.

En este proceso, además se decidió emplear en la medida de lo posible minibases, optimizar el espacio de la bandeja, para meter cuantas más piezas, y disminuir en lo posible los puntos de contacto.

Esta última impresión no solo permite ver los alcances de esta tecnología, si no el alcance de poder imprimir 29 objetos, muchos de ellos realmente complejos, como el modelo 17, 14, 12 o 6 en grandes volúmenes.

Para esta última impresión se decidió prescindir del modelo 5 en lo que queda de proyecto, porque la filigrana era tan frágil que cortar los apoyos hacía que el modelo se rompiera.

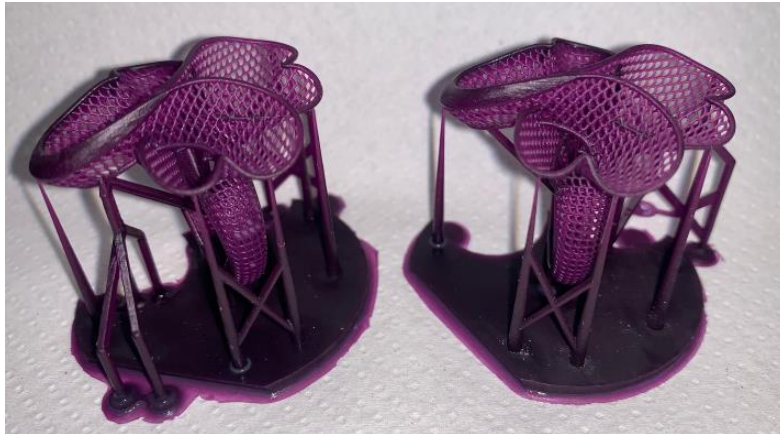


Imagen 101: Modelo 17 de la séptima impresión en detalle (Elaboración propia)



Imagen 102: Modelo 4 de la séptima impresión en detalle (Elaboración propia)



Imagen 103: Modelo 6 de la séptima impresión en detalle (Elaboración propia)

6.15 Conclusiones y análisis finales de SLA

La impresión en SLA entra dentro de los resultados esperados. A pesar de algún defecto encontrado, la tasa éxito en las impresiones es relativamente alta. El 3,4% de las piezas tuvieron algún defecto (si se obvia la segunda impresión que salió defectuosa por causas ajenas a la fabricación en SLA).

Por otro lado, se puede comparar la Castable Wax con la Castable Wax 40. Donde la Castable reluce y aporta unos resultados excelentes, la Castable 40 no llega por sus propiedades. No implica que una sea mejor que otra, ya que los objetivos de estas resinas, como se indica en el apartado 3.2.3.2 Las resinas, es completamente diferente. En las mismas piezas, ambas resinas captan a la perfección los **detalles de hasta 25 μm** , aunque para las tolerancias superficiales, la Castable Wax 40 tiene más problemas para relucir estos detalles.



Imagen 104: Comparación del alcance de la Castable Wax 40 y Castable Wax (Elaboración propia)



Imagen 105: Comparación del alcance de la Castable Wax 40 y Castable Wax (Elaboración propia)

Las piezas más complejas se pudieron obtener de acuerdo a lo esperado, cumpliendo todos los criterios de diseño, aunque el modelo 5 pasa a estar descartado del estudio, porque con un grosor cercano a 50 μm se rompe al manipularlo y no será adecuado para la fundición. Piezas como el modelo 17 o el 2 se han podido conseguir sin problema, siendo una la más compleja, y otra la que tiene menor tolerancia superficial del lote de diseño; en este último parámetro el modelo 3 también es sobresaliente. Piezas como los modelos 4 y 15 han reflejado los engarces tal y como se presentan en el modelo 3D original. Piezas bastas como el modelo 11 se han logrado obtener sin caídas en el tanque de resina ni vacíos de impresión resultando en huecos. Tanto las oquedades del modelo 6 y 7 se han obtenido con alta resolución, nótese que el reborde de cada agujero es extremadamente fino. Tanto el modelo 2 como el 10 han sido sobresalientes en cuanto a textura y esculpido de las formas que coronan los anillos. Al obtener unos buenos resultados superficiales y piezas bien impresas, se ha prescindido de realizar un estudio de capas en microscopio. En conclusión, las impresiones han sido satisfactorias.

Respecto al tiempo de impresión (min) y el volumen (ml) empleado en cada tirada, se han llegado a las siguientes conclusiones:

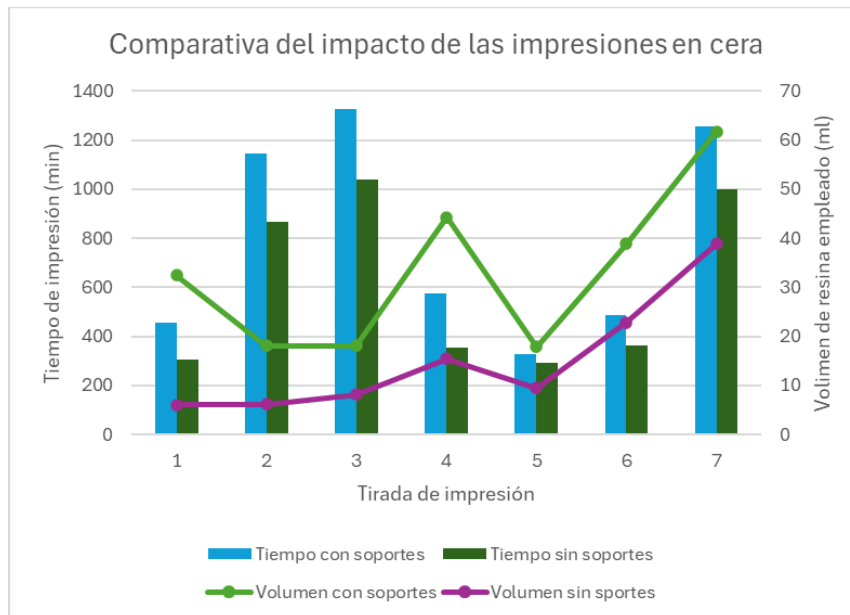
Esperablemente el tiempo de impresión de las resinas impresas en 25 μm es un **62,9% mayor de media** que el de las impresas en resina en 50 μm . Por otro lado, la diferencia en volumen entre imprimir en una resina u otra es casi mínima, siendo la diferencia del un 2,2% más de consumo por parte de las impresiones en 50 μm . Esto se atribuye al ligero aumento de precisión en las tiradas a 25 μm , aunque puede estar influenciado por otros factores, como la diferencia de geometrías entre tiradas.

	<i>Altura de capa (μm)</i>	<i>Resina</i>	<i>Capas</i>	<i>Volumen con soportes</i>	<i>Volumen sin soportes</i>	<i>Tiempo con soportes</i>	<i>Tiempo sin soportes</i>	<i>Diferencia en volúmenes</i>	<i>Diferencia en tiempos</i>
<i>I3D - 1</i>	50	Castable 40	707	32,5	5,99	454	307	26,51	147
<i>I3D - 2</i>	25	Castable 40	1354	18,11	6,11	1145	865	12	280
<i>I3D - 3</i>	25	Castable 40	1976	18,1	8,17	1328	1038	9,93	290
<i>I3D - 4</i>	50	Castable	949	44,29	15,45	574	354	28,84	220
<i>I3D - 5</i>	50	Castable	748	17,889	9,43	328	290	8,459	38
<i>I3D - 6</i>	50	Castable	988	38,81	22,81	487	363	16	124
<i>I3D - 7</i>	25	Castable	1496	61,69	38,87	1255	999	22,82	256

Tabla 17: Tabla comparativa de las impresiones en cera (Elaboración propia)

Respecto al impacto de los soportes en el tiempo de impresión, se arrojan los siguientes datos, que suponen un impacto en eficiencia del proyecto. La diferencia en volumen de una impresión con soportes a imprimir esos mismos elementos sin soportes es del 53,8%. El tiempo de impresión se reduce en un 24% si se pudiesen imprimir las piezas sin soportes.

La reducción del tiempo de impresión es un valor esperable que además no supone una ventaja notable, pues es intrínseco al proceso de retirada de material. La reducción de volumen en soportes sí es llamativa. Más de la mitad de la resina utilizada termina siendo desechada y no es reutilizable, por lo que 124,56ml de resina pasaron a tratamiento de residuos. Teniendo en cuenta que la diferencia entre los volúmenes con y sin soportes es entre 26ml y 9ml; debería poder optimizarse más, no solo con los métodos que plantea FormLabs, de tipo de base, grosor de base, densidad de apoyos, reducción del punto de apoyo y soportes internos. **Un buen tratamiento y colocación de los soportes, así como una orientación óptima es clave para reducir el gasto de resina.**



Gráfica 1: Comparativa de las impresiones en cera (Elaboración propia)

Como se puede observar en la gráfica, el ensayo 4 muestra una mala ejecución del proceso de impresión, en los que el volumen de resina empleado excede notablemente al volumen útil final. Ensayos como el 3 o el 5 son ejemplo de una clara optimización de apoyos.

El volumen total de resina empleado es de 231,389ml, los cuales se reparten en 162,679ml en Castable Wax y 68,71ml en Castable Wax 40. En términos económicos son 58,86€ invertidos en Castable Wax y 20,70€ en Castable Wax 40.

Por dar una imagen económica del gasto y desperdicio que suponen los soportes, el valor económico desechado en apoyos de impresión asciende a 27,54€ de Castable Wax, y 14,59 € de Castable Wax 40.

Continuando la comparativa, una optimización de los soportes supone una reducción considerable del consumo de resina. En la siguiente imagen, en la primera tirada esta pieza consumía 5,72ml; mientras que en la segunda tirada 2,66ml.

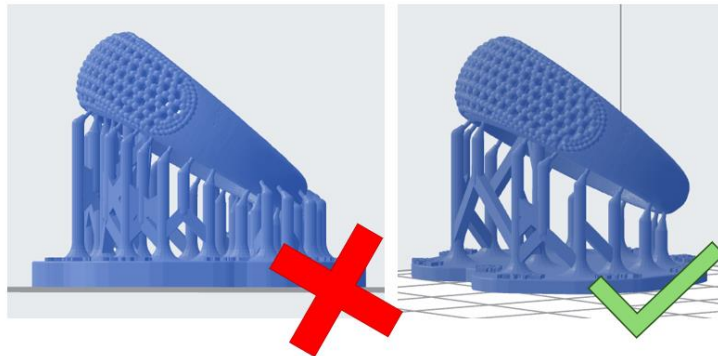


Imagen 106: Comparación de soportes, modelo 4 en la 1ª impresión y en la 2ª (Elaboración propia)

El tipo de cera es también un factor reseñable, por ejemplo una misma pieza con altura de capa 50 μm en resinas diferentes arroja estos resultados:

La primera pieza, en Castable Wax 40 consume 2,36ml; mientras que la segunda 2,40ml. Se puede apreciar que los acabados de los apoyos y los puntos de apoyo en Castable Wax son de mayor precisión. Por otro lado, ambos se imprimen en 414 capas, pero el realizado en Castable Wax 40 tarda 3h 6min; y el segundo 2h 4min.

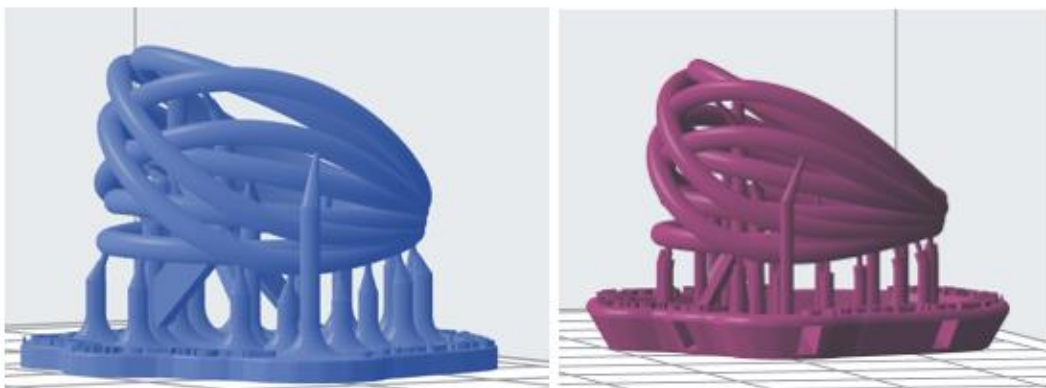


Imagen 107: Comparativa del modelo 1 en ambas resinas (Elaboración propia)

En la siguiente imagen, con el modelo 16, es decir uno complejo, también se aprecia esta diferencia. (3D Systems (Authorized Resellers Only), 2015)

En Castable Wax 40, el modelo 16 consume 1,85ml de resina, y su tiempo de impresión es de 2h y 44min. En Castable Wax, la cantidad de resina aumenta a 2,01ml y el tiempo se reduce a 2h 37min.

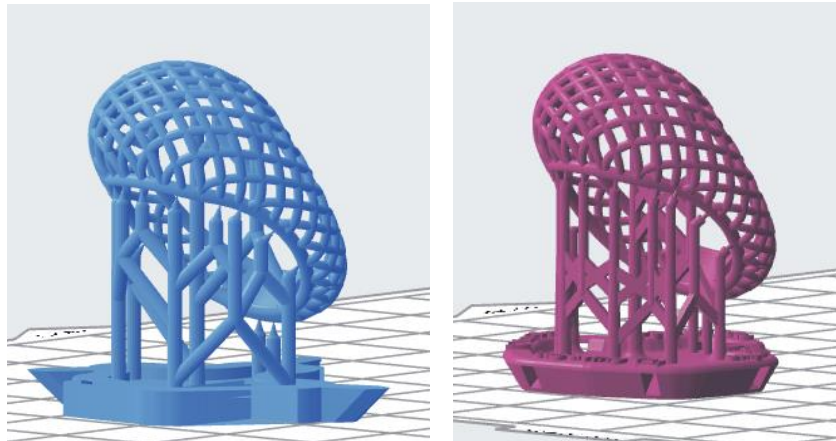


Imagen 108: Comparativa del modelo 16 en ambas resinas (Elaboración propia)

La inexperiencia en el área supone un factor clave en el rendimiento de los primeros ensayos, ya que las operaciones podrían haber sido más rápidas y contar con un ahorro de resina del 20% por emplear minibases y colocar adecuadamente los apoyos.

Los buenos resultados en la elaboración en **SLA muestran que es un método de fabricación aditiva idóneo para piezas de geometría compleja**. La especialización de las resinas y los constantes avances en el área hacen de la impresión 3D por estereolitografía un camino a seguir en la producción de piezas de joyería.

7. Ensayos en fundición

Las etapas de **fundición** que se van a comentar en los siguientes apartados están elaboradas en base a los materiales empleados y las rampas de calentamiento. Como ya se ha introducido en apartados anteriores (3.3 Fundición a la cera perdida) las **rampas de calentamiento** en los revestimientos son esenciales y determinan el correcto resultado de la fundición. Los pasos a seguir se detallan en el mencionado apartado, y para una correcta elaboración, se deben seguir en orden. Se elaboraron **un total de 9 árboles**, ordenados según material, complejidades y defectos. Dos de estos nueve fueron experimentales. Se fabricaron en base a cinco rampas de calentamiento en una serie de nueve coladas.

Previo a fundir, se hizo una **clasificación** de los anillos impresos para tener un correcto seguimiento del número de piezas totales y hacer más sencilla su manipulación en la construcción de árboles de cera. En las siguientes imágenes se pueden observar los elementos, así como anillos que no llegaron a imprimirse porque fueron descartados.



Imagen 109: Clasificación de anillos en Castable Wax previa a la fundición (Elaboración propia)

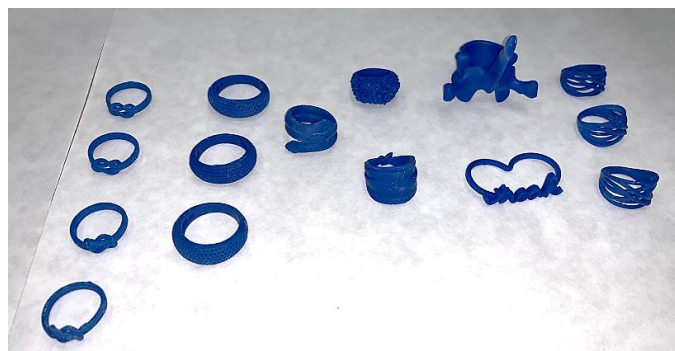


Imagen 110: Clasificación de anillos en Castable Wax 40 previa a la fundición (Elaboración propia)

7.1 Primera serie fundición

En el primer ensayo de fundición se tomaron las **piezas defectuosas**, pero válidas para imprimir. Este ensayo se hizo con fines académicos, para aprender el uso de la batidora, el horno de mufla, el calentamiento del latón y la correcta consecución de pasos.



Imagen 111: Árbol 0 de cera de piezas defectuosas (Elaboración propia)

Características de la primera serie de fundición

Material de fundición	Latón (82% Cu – 18% Zn)
Estado del material de fundición	Sin emplear, en granos.
Material de revestimiento	Satin Cast 20
Resina calcinable	Castable Wax 40
Relación de agua: revestimiento	400ml agua :1kg Satin Cast 20
Tiempo total en horno	17h 21 min
Aparición de ceniza en la bandeja del horno	Sí
Aparición de vapor de Zinc	Sí, 1:1 coladas
Número de árboles en la serie	1

Tabla 18: Características de la primera serie de fundición (Elaboración propia)

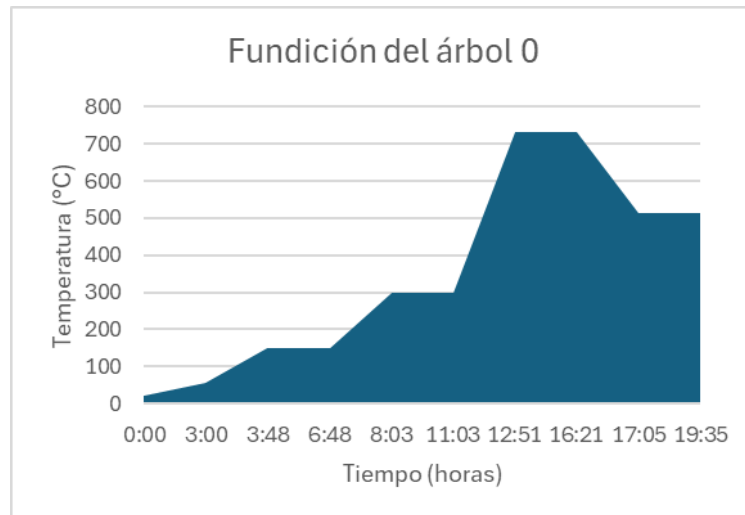
Se llama a este árbol 0, ya que en ningún momento se preveía que los resultados fueran buenos, con acabados aceptables y sin rechupes. Esta prueba permite además observar cómo salen a relucir los defectos de la impresión 3D en fundición a la cera perdida.

En esta serie el árbol 0 está compuesto por dos piezas defectuosas del modelo 3, una del modelo 1, y otra del modelo 2.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

- Se consiguieron fundir 4 piezas del total de 4 que se presentaban en el árbol.
- El árbol cuenta con una masa de 165,8g.

La rampa de calentamiento se adaptó a las exigencias del fabricante, siendo la siguiente:



Gráfica 2: Rampa de fundición empleada en el árbol 0 (Elaboración propia)

Las piezas que se muestran a continuación corresponden a esta primera serie de colado, siendo ya chorreadas y extraídas del árbol.



Imagen 112: Piezas obtenidas en la primera serie del árbol 0. (Elaboración propia)

De esta primera serie se extraen las siguientes conclusiones:

Conclusiones de la primera serie de fundición

<i>Velocidad de colado</i>	Correcta
<i>Desempeño de rampa de calentamiento</i>	Correcta
<i>Fusión completa del latón</i>	Correcta
<i>Desvestimiento del revestimiento</i>	Correcto
<i>Resultados del árbol 0</i>	Excelentes

Tabla 19: Conclusiones de la segunda serie de fundición (Elaboración propia)

7.2 Segunda serie de fundición

Tras el primer ensayo de prueba, se fundieron el resto de piezas impresas en Castable Wax 40.

Características de la segunda serie de fundición

Material de fundición	Latón (82% Cu – 18% Zn)
Estado del material de fundición	Sin emplear, en granos.
Material de revestimiento	Satin Cast 20
Resina calcinable	Castable Wax 40
Relación de agua: revestimiento	400ml agua :1kg Satin Cast 20
Tiempo total en horno	16h 20 min
Aparición de ceniza en la bandeja del horno	Sí
Aparición de vapor de Zinc	Sí, 2:2 coladas
Número de árboles en la serie	2

Tabla 20: Características de la segunda serie de fundición (Elaboración propia)

En esta serie se colaron 2 árboles, cada uno con características diferentes: el árbol 1 estaba pensado para piezas modelo 1 y 4, es decir con un número elevado de oquedades pero sencillas; el árbol 2 a piezas bastas, como el modelo 10 y 11. La rampa de calentamiento se adaptó a las exigencias del fabricante, siendo la siguiente:



Gráfica 3: Rampa de fundición empleada en los árboles 1 y 2 (Elaboración propia)

El descenso en la última rampa es debido a la ventana de fundición de la resina, la cual modifica la temperatura final de los moldes. No implica fundir a 512°C, implica seleccionar libremente la temperatura de colado. La rampa calienta hasta 732°C.

Tras aplicar el procedimiento comentado en el apartado 3.3 Fundición a la cera perdida, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Se consiguieron fundir 10 piezas del total de 12 que había en los árboles (no se dispone fotografía de los árboles de esta serie). Las piezas que no se consiguieron fundir dejaron bebederos a medio llenar. De este paso se comienzan a elaborar las posibles hipótesis del mal llenado de los bebederos.
- Los árboles con el tronco fundidos cuentan con las siguientes masas: árbol 1, 170,9g y árbol 2, 173,8g.
- La velocidad de colado fue adecuada, permitiendo un buen llenado.

Las piezas que se muestran a continuación corresponden a esta segunda serie de colado, y han sido ya chorreadas y extraídas del árbol. Algunas de estas piezas cuentan con marcas negras, sulfuro de cobre, su aparición se desarrolla en el punto 3.3.7 Paso 6: Fundición del metal: latón.



Imagen 113: Piezas obtenidas en la segunda serie de los árboles 1 y 2. En orden de izquierda a derecha empezando por la esquina superior izquierda: modelo 4, modelo 1, modelo 10, modelo 1, modelo 11 y modelo 4 (Elaboración propia)

De esta segunda serie se extraen las siguientes conclusiones:

Conclusiones de la segunda serie de fundición

<i>Velocidad de colado</i>	Correcta
<i>Desempeño de rampa de calentamiento</i>	Correcta
<i>Fusión completa del latón</i>	Correcta
<i>Desvestimiento del revestimiento</i>	Correcto
<i>Resultados del árbol 1</i>	Excelentes
<i>Resultados del árbol 2</i>	Medios
<i>Comentarios</i>	Última fundición con Satin Cast 20

Tabla 21: Conclusiones de la segunda serie de fundición (Elaboración propia)

7.3 Tercera serie de fundición

En esta serie de fundición, se pasó a la Castable Wax y al revestimiento Ransom & Randolph Argentum Investment. Este revestimiento es para acabado fino en latón, es decir, es especial para ensayos como esta serie de fundición. En adelante se seguirá empleando este revestimiento

Características de la segunda serie de fundición

<i>Material de fundición</i>	Latón (82% Cu – 18% Zn) El árbol 5 contiene 10g de aluminio
<i>Estado del material de fundición</i>	Sin emplear, en granos.
<i>Material de revestimiento</i>	Ransom & Randolph Argentum
<i>Resina calcinable</i>	Castable Wax
<i>Relación de agua: revestimiento</i>	380ml agua :1kg Argentum
<i>Tiempo total en horno</i>	Árbol 3: 13h 40 min Arboles 4 y 5: 16h 40min
<i>Aparición de ceniza en la bandeja del horno</i>	Sí
<i>Aparición de vapor de Zinc</i>	Sí, 1:3 coladas
<i>Número de árboles en la serie</i>	3

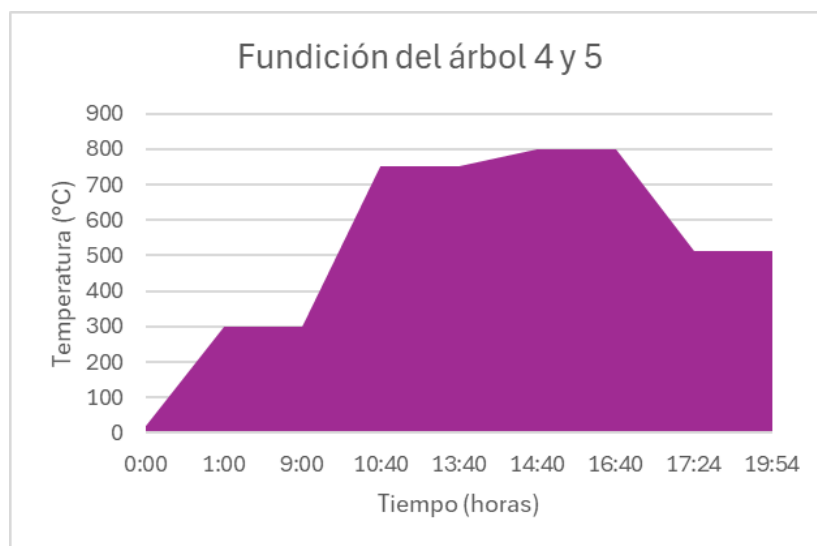
Tabla 22: Características de la tercera serie de fundición (Elaboración propia)

En esta serie se colaron 3 árboles, cada uno con las siguientes características, ya que cada árbol se diseña en base a este criterio: el árbol 3 estaba pensado para piezas modelo 6 y 4, piezas de alto nivel y alta precisión; el árbol 4 a piezas finas, como los modelos 3 y 13; el árbol 5 a piezas con bastante masa con acabados exigentes.

La rampa de calentamiento se adaptó a las exigencias del fabricante y aunque todas se metieron en el horno de mufla a la vez, el árbol 3 siguió una rampa ligeramente diferente a los árboles 4 y 5. La rampa del árbol 3 se calentó hasta los 732°C de temperatura máxima. En vista de los resultados obtenidos, la siguiente rampa llega hasta los 800°C; como se puede observar en las siguientes imágenes:



Gráfica 4: Rampa de fundición empleada en el árbol 3 (Elaboración propia)



Gráfica 5: Rampa de fundición empleada en los árboles 4 y 5 (Elaboración propia)

Al igual que en el apartado anterior, el descenso a 512°C teóricos se debe a la ventana de fundición.

Los resultados y conclusiones obtenidas fueron las siguientes:

- Se consiguieron fundir 7 piezas de 10 del árbol 3; 7 piezas de 8 del árbol 4; 5 piezas de 7 del árbol 5.
- Los árboles con el tronco fundidos cuentan con las siguientes masas: árbol 1, 169,8g; árbol 4, 171,4g y árbol 5, 172,1g.

- El motivo por el que se realizaron dos rampas en esta serie de coladas fue porque en un principio, los tres cilindros inicialmente se calentaron a 750°C y tras realizar el colado del árbol 3, comprobando sus resultados deficientes, se decidió que la hipótesis sobre por qué los bebederos no se llenaban completamente podría ser correcta. Será desarrollada en las conclusiones de este capítulo, pero enlaza el gradiente de temperaturas del metal al penetrar en el revestimiento, creándose una diferencia de 350°C; los cuales son capaces de endurecer el metal antes de ingresar en el molde.
- En las siguientes coladas, la temperatura se aumentó a 800 °C, dando lugar a piezas de buen acabado superficial y llenados completos. Por otro lado, hay piezas que no se consiguieron materializar en esta etapa.
- En el árbol 4 se fundió un modelo que había sido previamente descartado por ser similar al modelo 13.
- En el árbol 5 se añadieron 10g de aluminio, ya que como se indica en el apartado 3.3.7 Paso 6: Fundición del metal: latón, mejora su colabilidad, dando resultados más suaves mejores llenados. Las piezas situadas en la parte superior de este árbol tuvieron mejores acabados.



Imagen 114: Tercera serie de colado. De izquierda a derecha: árbol 3, árbol 4, árbol 5 (Elaboración propia)



Imagen 115: Piezas obtenidas en la tercera serie del árbol 3. En orden de izquierda a derecha: modelo de muestra de FormLabs , modelo 6, modelo 6, modelo 4 y modelo 4 (Elaboración propia)



Imagen 116: Piezas obtenidas en la tercera serie del árbol 4. En orden de izquierda a derecha: modelo 2, modelo 2, modelo 12 y modelo descartado en la 6ª impresión. (Elaboración propia)



Imagen 117: Piezas obtenidas en la tercera serie del árbol 5. En orden de izquierda a derecha: modelo 6, modelo 15, modelo 9 y modelo 7. (Elaboración propia)

De esta serie se extraen las siguientes conclusiones:

Conclusiones de la segunda serie de fundición

<i>Velocidad de colado</i>	Correcta
<i>Desempeño de rampa de calentamiento</i>	Mala en el 3º árbol Buena en la 4º árbol Inconsistente en el 5º árbol
<i>Fusión completa del latón</i>	Correcta
<i>Desvestimiento del revestimiento</i>	Correcto
<i>Resultados del árbol 3</i>	Malos
<i>Resultados del árbol 4</i>	Excelentes
<i>Resultados del árbol 5</i>	Mejorables, inconsistentes
<i>Comentarios</i>	Fundición con Argentum. El aluminio aumenta la colabilidad. Ratio elevado de fracaso.

Tabla 23: Conclusiones de la tercera serie de fundición (Elaboración propia)

7.4 Cuarta serie de fundición

Una vez estudiados los resultados arrojados por la tercera serie, se procede a elaborar los 6º y 7º árboles del proyecto. Estos árboles son especialmente peculiares por su patrón de fundición. En vista de los resultados obtenidos, se modificaron las proporciones de agua en la mezcla del revestimiento refractario.

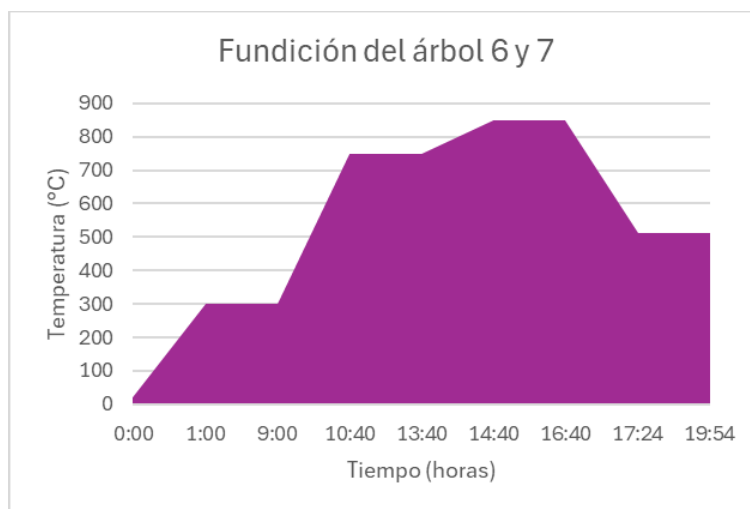
Características de la segunda serie de fundición

<i>Material de fundición</i>	Latón (82% Cu – 18% Zn)
<i>Estado del material de fundición</i>	Reutilizado de árboles de este ensayo
<i>Material de revestimiento</i>	Ransom & Randolph Argentum
<i>Resina calcinable</i>	Castable Wax
<i>Relación de agua: revestimiento</i>	410ml agua :1kg Argentum
<i>Tiempo total en horno</i>	Árboles 6 y 7: 16h 40 min
<i>Aparición de ceniza en la bandeja del horno</i>	Sí
<i>Aparición de vapor de Zinc</i>	No
<i>Número de árboles en la serie</i>	2

Tabla 24: Características de la cuarta serie de fundición (Elaboración propia)

En esta serie se colaron 2 árboles, cada uno con las siguientes características: el árbol 6 estaba pensado para piezas de mucha masa, concretamente contaba con los modelos 7, 8 y 11, siendo la 8 añadida por espacio en el propio tronco; el árbol 7 estaba orientado a piezas finas, con filigrana y huecos, concretamente los modelos 14 y 17.

Esta es la rampa de calentamiento a seguir en esta serie:



Gráfica 6: Rampa de fundición empleada en los árboles 6 y 7 (Elaboración propia)

En esta colada destaca la modificación de las cantidades de revestimiento, esto se realizó en vistas a mejorar el llenado y evitar sopladuras. Al tratarse de piezas con pequeños detalles, la acumulación de burbujas de aire es posible, aun teniendo en cuenta que se trata de un proceso que se da a 70 cmHg (casi 1bar).

La temperatura también se aumentó, pasando de 800°C a 850°C. Esto se hizo en base a investigaciones en las que se indica que el gradiente de temperaturas entre el metal y el interior del cilindro no debe de ser muy elevado; para evitar solidificaciones tempranas. Tampoco es recomendable calentar más de esta temperatura el revestimiento, ya que podría desintegrarse y adquirir la textura de una cascarilla. (*What Is Favourable Temperature Gradient In Casting?*, s. f.)

Los resultados de esta colada fueron los siguientes, y como se puede observar en las fotografías, existe un amplio rango de mejora:

- Se consiguieron fundir 2 piezas de 3 del árbol 6; 2 piezas de 6 del árbol 7.
- Los árboles con el tronco fundidos cuentan con las siguientes masas: árbol 6, 173,8g y árbol 7, 178,1g.



Imagen 118: Cuarta serie de colado. De izquierda a derecha: árbol 6 y árbol 7 (Elaboración propia)

Observando los malos resultados, en el siguiente ensayo se procede a una última iteración, para poder detectar el fallo en esta colada, si se trata de exceso de líquido en el revestimiento, horno demasiado caliente, o mala fundición del latón.

De esta serie se extraen las siguientes conclusiones:

Conclusiones de la segunda serie de fundición

<i>Velocidad de colado</i>	Correcta
<i>Desempeño de rampa de calentamiento</i>	Inconsistente en los árboles 6 y 7
<i>Fusión completa del latón</i>	Correcta
<i>Desvestimiento del revestimiento</i>	Correcto
<i>Resultados del árbol 6</i>	Malos
<i>Resultados del árbol 7</i>	Malos
<i>Comentarios</i>	Los resultados se tratan como malos porque aunque las piezas fundidas tengan buena precisión y buenos resultados, el ratio de fallo es muy elevado.

Tabla 25: Conclusiones de la cuarta serie de fundición (Elaboración propia)

7.5 Quinta serie de fundición

Tras los malos resultados genéricos en las anteriores coladas, en esta se intentó elevar la temperatura a 810°C, y mantener 1kg de revestimiento por cada 400ml de agua. Habiendo probado muchas opciones, estas son las últimas pruebas ya que el siguiente paso sería realizar cambios sustanciales en la técnica.

Características de la segunda serie de fundición

<i>Material de fundición</i>	Latón (82% Cu – 18% Zn)
<i>Estado del material de fundición</i>	Reutilizado de árboles de este ensayo y de granos sin emplear.
<i>Material de revestimiento</i>	Ransom & Randolph Argentum
<i>Resina calcinable</i>	Castable Wax
<i>Relación de agua: revestimiento</i>	400ml agua :1kg Argentum
<i>Tiempo total en horno</i>	Árboles 8 y 9: 17h 20 min
<i>Aparición de ceniza en la bandeja del horno</i>	Sí
<i>Aparición de vapor de Zinc</i>	No
<i>Número de árboles en la serie</i>	2

Tabla 26: Características de la quinta serie de fundición (Elaboración propia)

En esta serie se colaron 2 árboles, cada uno con las siguientes características: el árbol 8 estaba pensado para piezas con rugosidades a lo largo de su superficie, concretamente contaba con los modelos 6 y 12; el árbol 9 estaba orientado a piezas finas, de diseño sencillo.

Esta es la rampa de calentamiento a seguir en esta serie:



Gráfica 7: Rampa de fundición empleada en los árboles 8 y 9 (Elaboración propia)

- El revestimiento se reposó en la cámara de vacío durante un periodo de tiempo largo, para comprobar si la posible existencia de oclusiones en forma de burbuja salían de la mezcla.
- El periodo de calcinación de la resina se alargó a 3 horas y 40 minutos.
- Se retiró toda la escoria del latón, proceso que ya se realizaba en pasos anteriores, pero esta vez se hizo con mayor cautela en no dejar rastro.

Los resultados de esta colada fueron los siguientes:

- Se consiguieron fundir 3 piezas de 3 del árbol 8; y 5 piezas de 5 del árbol 9.
- Los árboles con el tronco fundidos cuentan con las siguientes masas: árbol 8, 175,1g y árbol 7, 171,6g.



Imagen 119: Quinta serie de colado. De izquierda a derecha: árbol 8 y árbol 9 (Elaboración propia)

De esta serie se extraen las siguientes conclusiones:

Conclusiones de la segunda serie de fundición

<i>Velocidad de colado</i>	Correcta
<i>Desempeño de rampa de calentamiento</i>	Correcto
<i>Fusión completa del latón</i>	Correcta
<i>Desvestimiento del revestimiento</i>	Correcto
<i>Resultados del árbol 6</i>	Aceptables
<i>Resultados del árbol 7</i>	Mejorables
<i>Comentarios</i>	Los resultados en esta colada fueron mucho mejores que en las anteriores en cuanto a penetración, pero no en acabados. Con una superficie rugosa y rechupes, el proyecto se encuentra ante una línea de investigación sobre qué puede haber pasado en estos ensayos.

Tabla 27: Conclusiones de la quinta serie de fundición (Elaboración propia)

7.6 Serie extra de fundición

En un intento de conseguir una de las piezas más complicadas geométricamente hablando, se propuso un fundido del modelo 17 con las mismas características que la quinta serie de fundición.

Los resultados fueron malos, pero sacan a la luz un dato importante, el metal sí penetra en huecos tan finos.



Imagen 120: Serie extra de colado. Dos árboles de fundición. (Elaboración propia)

7.7 Conclusiones finales de fundición a la cera perdida

La fundición a la cera perdida es un proceso de fabricación **delicado**, en el que **intervienen un gran número de variables** y estas pueden afectar al producto final. En este ensayo de fabricación los resultados diferían de los esperados, ya que el alcance esperado era reflejar con exactitud la precisión elaborada mediante SLA.

7.7.1 Discusión de errores y elaboración de la hipótesis

Las piezas que se imprimieron correctamente, como las mostradas en los árboles 1, 5 y 7 cumplen los requisitos y estándares para ser tomadas en cuenta como piezas finales, anillos, y darles el uso para el que fueron elaborados.

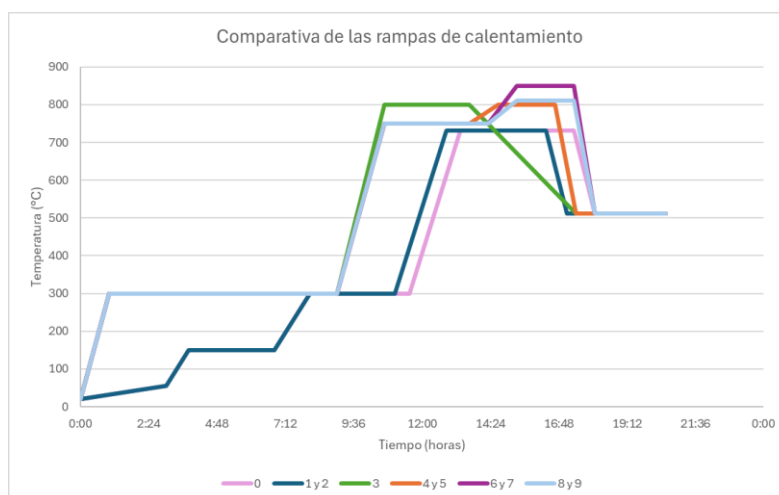
Las piezas que se imprimieron incorrectamente o no se imprimieron son objeto de estudio, lo cual sugiere la siguiente pregunta: ¿por qué no se fundieron bien los modelos? A lo largo de las coladas, se fueron modificando parámetros para conseguir anillos enteros con acabado liso, de precisión y que cumplieran con la geometría diseñada en el modelo 3D. Esta es la influencia de las variables de fundición y cómo podrían haber intervenido en este mal acabado:

1. **Temperatura del revestimiento.** La temperatura del revestimiento para el proceso de colada es de base 732°C para casi todos los fabricantes. En las hojas de instrucciones se sugiere aumentar la temperatura si el **gradiente entre el cilindro** y el metal líquido es muy elevado, lo que podría originar un golpe térmico y **acelerar el proceso de enfriado**, ya que el latón funde a 1100°C aproximadamente (remito al apartado 3.3.7 Paso 6: Fundición del metal: latón donde se explica el por qué de esta temperatura tan elevada). En las piezas fundidas, se puede ver cómo hay un gran número de **llenados incompletos**; lo cual parcialmente sustenta esta hipótesis. Calentando más el revestimiento se reduciría la diferencia entre el latón y el revestimiento. Por otro lado, el revestimiento tiene una **temperatura de desintegración**, habitualmente en torno a 850°C, en la cual el revestimiento empieza a agrietarse y se queda como una cascarilla. En este proyecto esto último se plantea como improbable, debido a que estos revestimientos son para altas temperaturas y trabajar con latón.
2. **Material del revestimiento.** Una de las causas que provocan una defectología alta, llenados incompletos y porosidades es que el material de revestimiento esté

húmedo. En estos ensayos el revestimiento se licuó mínimamente para poder **asegurar una buena resolución de los detalles**, sin embargo, un licuado excesivo provoca que este no se seque y queden superficies rugosas y no cumplan los estándares. Es decir, el material de revestimiento es correcto, y no es posible que esta la razón de los fallos.

3. **El metal.** El **latón** podría dar problemas en caso de tener un grado alto de impurezas, pero al haber utilizado latón “nuevo” desde la primera colada no es una posibilidad. Los **residuos de zinc** podrían haber afectado a la composición del latón, ya que en el proceso de fusión, estos son los que primero se licuan. De todas formas, en cada colada la **escoria** se retiraba concienzudamente para evitar inclusiones de escoria en la pieza acabada.
4. **Método de colado.** Una de las razones por las que muchas de las piezas no se llenaron completamente es por el método de colado. En un **colado por gravedad** falta presión en las paredes del molde para conseguir llenar todos los huecos. El **colado por centrifugado**, que es el empleado en la industria de la joyería, garantiza una distribución homogénea y controlada a velocidad constante. Es un método eficaz en piezas con perfiles circulares. El segundo método más empleado en la industria es el **colado por presión**, que es similar al centrífugo solo que en lugar de utilizar fuerzas de rotación, se emplea presión inyectada a través de una bomba. Para obtener las piezas clasificadas como complejas el método de colado por gravedad no es el más acertado. Aunque la máquina del laboratorio hace cierta succión, se trata de fundición por gravedad asistida por aspiración. En definitiva, **este método de colado no era el indicado para las piezas más complejas**. Por ejemplo, los modelos 5, 16, 17 se podrían obtener mediante centrifugado.
5. **Desvestimiento.** El proceso de enfriado de los árboles de metal es uno de los factores que suele propiciar el mal resultado superficial de las piezas en fundición a la cera perdida, terminando en rechupes y grietas. Un desvestimiento rápido, que no templado, como se suele mal llamar, genera **contracciones, tensiones** en la pieza, puede **reblandecer** el material y terminar en **rotura**. Es improbable que esto haya sido una de las razones porque en todas las coladas se respetaron los tiempos de enfriamiento.

6. **Esfuerzos.** Las **contracciones** en la pieza se suelen dar cuando hay **variaciones de temperatura** lo suficientemente notables como para producir la rotura de los metales. Habitualmente en todos los procesos de fundición hay contracciones, lo que lleva a que las piezas reduzcan sus dimensiones. Por otro lado, el **esfuerzo de expansión** en el molde da lugar a la rotura del revestimiento, lo cual genera porosidades, superficies rugosas, grietas, encapsulado de revestimiento y no refleja los detalles del objeto. Es posible que esto se haya dado, ya que hay muchos ejemplos que coinciden con el comportamiento de los esfuerzos de expansión en las imágenes mostradas en el apartado 8 Defectología.
7. **Presencia de escoria.** La presencia de escoria en el metal podría haber obturado los canales de los bebederos. Como se ha comentado, una limpieza exhaustiva del crisol se realizaba en cada colada, pero no se tenía acceso a la parte del fondo del mismo.
8. **Rampas de calentamiento.** Las rampas de calentamiento son un factor esencial para la correcta preparación de la colada. A través de cada colada mediante iteraciones se intentó mejorar las rampas, pero como se puede observar en la siguiente gráfica, no son mayormente optimizables, no más que lo que propone FormLabs para sus resinas calcinables. Es posible que en el abanico entre 750°C y 800°C haya una temperatura que dé mejores resultados.



Gráfica 8: Tabla comparativa entre todas las rampas de calentamiento (Elaboración propia)

El proceso consta de tres etapas principales, el calentamiento a 300 °C; el que se produce entre 732°C y 750°C y el pico de 800°C.

Teniendo en cuenta que las coladas con mejores resultados fueron las de los árboles 0, 1, 5 y 8 se obtienen las siguientes conclusiones:

En la segunda etapa no se debería calentar por encima de los 750°C; y en la tercera etapa no se deberían sobrepasar los 800°C.

En base a estas premisas se llega a la siguiente conclusión para arrojar un poco de luz al por qué de estas tandas de fundición defectuosas:

El **gradiente de temperaturas** en la penetración del metal en el molde es lo suficientemente elevado como para influir en el proceso de solidificación del metal, dando lugar a llenados incompletos, como se puede ver en las fotografías de los árboles de metal. Esto afecta de tal manera que el metal antes de llenar la cavidad, se ha solidificado. Los **esfuerzos de expansión**, así como posiblemente la temperatura a la que se calentó el cilindro de microfusión dieron lugar a defectos superficiales, como los que se pueden observar en los modelos 6 y 11 respectivamente del siguiente capítulo. Por último, **el método de colada no es el adecuado** para piezas de alta complejidad. La colada por gravedad produce correctamente piezas de geometría sencilla, relieves poco complejos y requisitos de precisión bajos, como una moneda, o una chapa engravada. Para geometrías complejas y patrones de sección circular la colada por centrifugación hubiera dado mejores resultados.

7.7.2 Propuestas para abordar el proyecto con éxito

Para conseguir evitar estos errores en ensayos próximos estas son las propuestas para abordar el proyecto exitosamente:

- En primer lugar, realizar **simulaciones** de cómo es el gradiente de temperaturas y estudiar los puntos críticos de menor temperatura. Primero en árboles compuestos de anillos de geometría sencilla, tras esto, se evolucionaría a filigranas y paves. Un software interesante es FLOW-3D, el cual se utiliza específicamente para este tipo de situaciones y tiene un desarrollo extenso en este ámbito. Estas simulaciones se tendrían que desarrollar para modelos concretos, estudiando cada anillo de forma particular.
- Idealmente utilizar un horno de **colada centrífuga**, para asegurar la correcta penetración si se quieren elaborar piezas de alta complejidad.

- **Probar con otros metales** con menor punto de fusión, como el aluminio, o latones con menor contenido en cobre (ya que se trata de un proceso de investigación, no de producción real), así como bronce; controlando no rebasar las temperaturas de calentamiento del revestimiento cerámico.

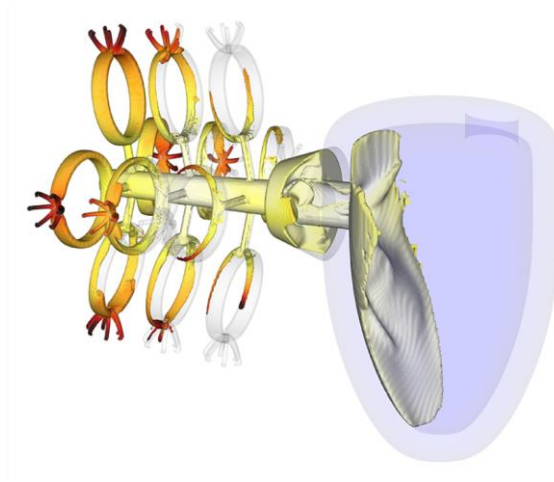


Imagen 121: Ejemplo de simulación por centrifugación (FLOW-3D 离心铸造 | Flow Science China, s. f.)

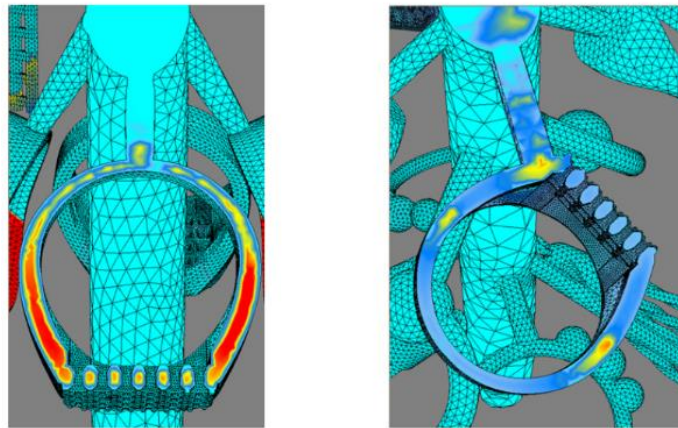


Imagen 122: Ejemplo de predicción de porosidades con FLOW3D en diferentes bebederos. Las zonas en rojo y Amarillo indican niveles altos de porosidad. (Tiberto & Klotz, 2012)

7.7.3 Últimas consideraciones: metales, éxito y reutilización

A pesar de que las conclusiones sobre los posibles errores en el proceso de fundición, se debe considerar que este proyecto no es un trabajo puramente teórico basado en fórmulas y modelos matemáticos. Cuenta con una proporción alta basada en ensayos experimentales fundamentados en observación en un laboratorio con la tecnología disponible. Se considera un éxito haber conseguido un nivel de detalle alto en modelos como el 4 o el 2. El alcance deseable sería haber llegado a modelos como el 8 o el 17.

En base a los pesos obtenidos de la báscula, **el peso total final de los árboles de latón es de 1967,4 gramos**. Se debe tener en consideración que **el latón se fue reutilizando** con el avance de las series de coladas, por lo que no se han utilizado casi 2kg de metal nuevo expresamente para el proyecto. El precio en mercado actualmente de 1kg de latón ronda los 4€/kg, ya que se suele vender el MS58, es decir con un 58% de cobre. Comprando a particulares y atendiendo a que el utilizado en el laboratorio es Latón 82/18 puede ascender a 23€/kg. (*OTT.82/18 MICROP - - Alloys And Solders - Products, s. f.*)

Estos son los precios de los metales que se suelen emplear en fabricación de anillos en cera perdida:

<i>Metal</i>	<i>Precio/kg (€/kg)</i>	<i>Punto de fusión (°C)</i>	<i>Módulo de Young (GPa)</i>	<i>Porcentaje de alargamiento</i>
<i>Latón 82/18</i>	23	940	97 – 110	20-30%
<i>Bronce 94/6</i>	34	1010	96 – 120	10-20%
<i>Cobre 99</i>	55	1084	110 – 130	40-50%
<i>Plata 99</i>	843,64	961	72 – 83	30-40%
<i>Oro 99</i>	72.601,53	1064	78 – 82	40-50%
<i>Acero inoxidable 316L</i>	6,50	1370 - 1530	193	40%-50%

Tabla 28: Tabla con características de los materiales típicamente utilizados en joyería (Elaboración propia)

En la tabla superior se indican los rasgos generales de los materiales típicamente empleados en joyería. Los datos son genéricos y varían entre proveedores, impurezas y

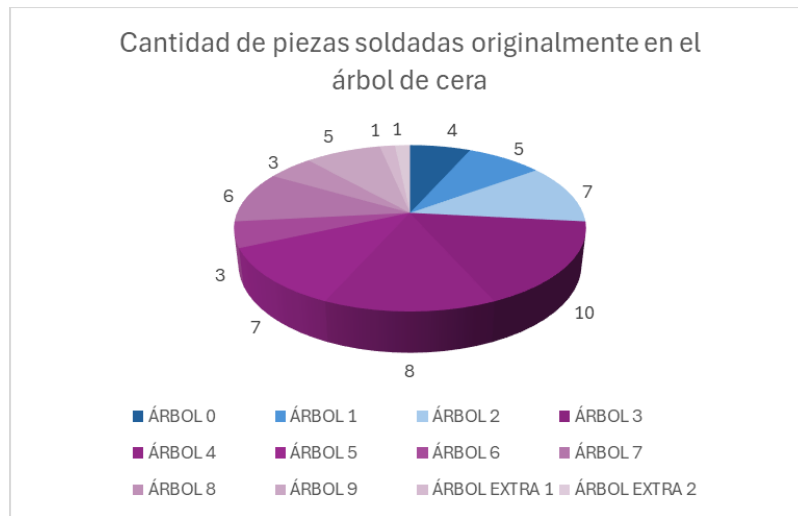
concentraciones. Cabe añadir que tanto con el oro como con la plata, ambos metales se galvanizan sobre piezas de cobre o acero; o se alean en proporciones muy bajas con otros materiales, no se fabrican a día de hoy piezas de oro macizas. Observando esta tabla es sencillo ver por qué el latón está tan extendido en la industria de la joyería.

Volviendo al precio, si se quisieran producir íntegramente los árboles de cera con latón **no** reutilizado/refundido, el precio de cada serie sería el mostrado en la tabla inferior. Es por ello que la componente de reutilización del latón es clave para abaratar costes y tener una metodología más eficiente.

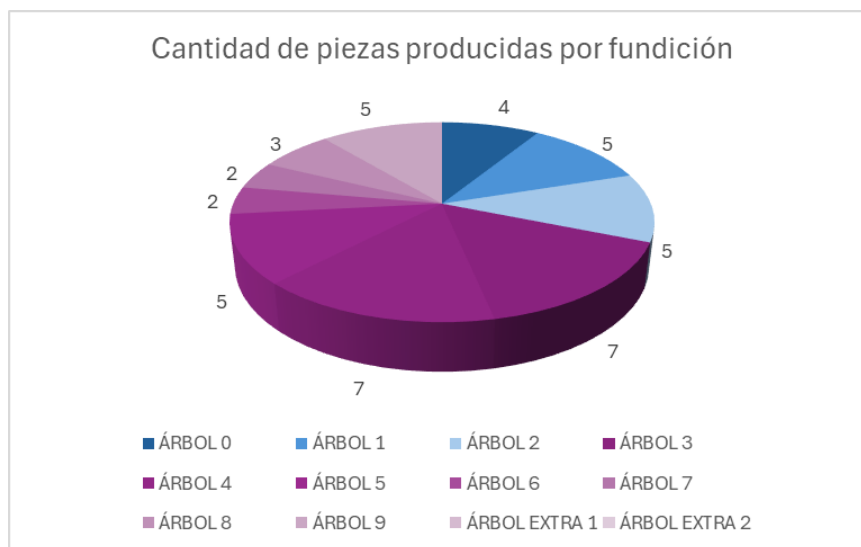
ÁRBOL	Masa (g)	Coste (€)
ÁRBOL 0	165,8	3,81
ÁRBOL 1	170,9	3,93
ÁRBOL 2	173,8	4,00
ÁRBOL 3	169,8	3,91
ÁRBOL 4	171,4	3,94
ÁRBOL 5	172,1	3,96
ÁRBOL 6	173,8	4,00
ÁRBOL 7	178,1	4,10
ÁRBOL 8	175,1	4,03
ÁRBOL 9	171,6	3,95
ÁRBOL EXTRA 1	101,2	2,33
ÁRBOL EXTRA 2	143,8	3,31
Total	1967,4	45,25

Tabla 29: Tabla de precios por árbol (Elaboración propia)

Además un asunto a discutir es el porcentaje de éxito en las fundiciones, ya que los defectos y las proporciones de piezas en resina calcinadas y piezas obtenidas es relativamente bajo. Estos son los resultados:



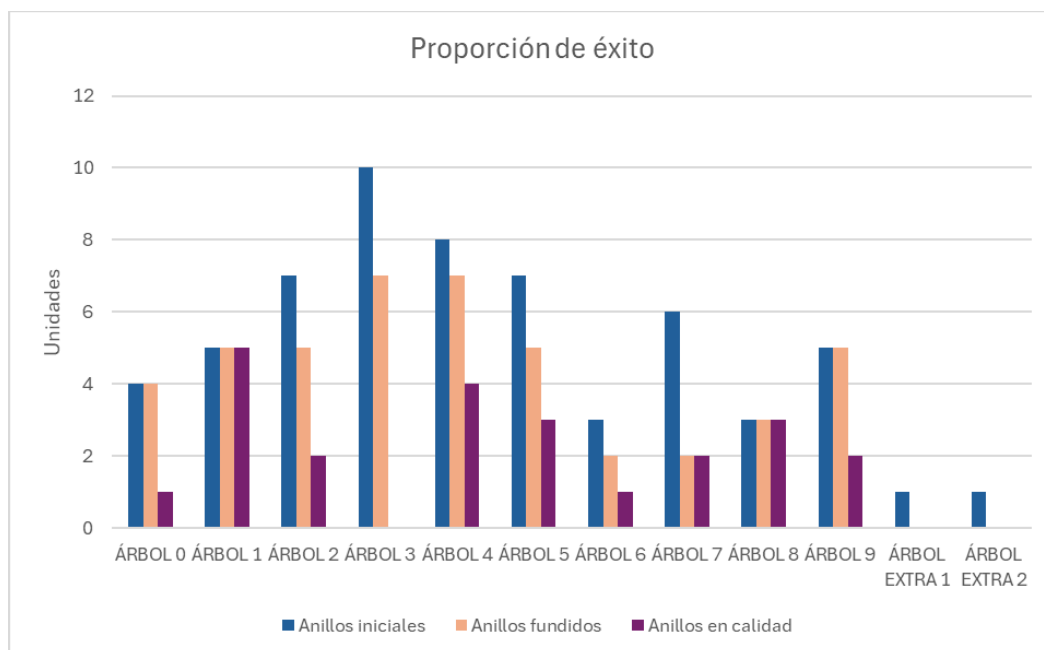
Gráfica 9: Cantidad de piezas soldadas originalmente en el árbol de cera (Elaboración propia)



Gráfica 10: Cantidad de piezas producidas por fundición (Elaboración propia)

En estos ensayos un **75% de las piezas se llegaron a producir**, lo cual no es mala proporción . El problema recae en la calidad del producto final, **un 38% cumple los requisitos finales** de acabado superficial, dificultad, tamaño de orificios y precisión.

En la siguiente gráfica se puede ver cómo los anillos que entran en rango de calidad son relativamente pocos a los utilizados originalmente impresos en SLA.



Gráfica 11: Proporción de éxito en los ensayos de fundición (Elaboración propia)

Cabe añadir que en este proyecto se han respetado los ODS y propósitos medioambientales, volviendo a fundir en un último paso todo el latón empleado para futuros usos, y reutilizando la viruta desprendida para añadirla al bloque reutilizado. Materiales como el revestimiento Argentum no son reutilizables, por lo que serán debidamente transportados a un depósito de reciclaje. (Recircular, 2023)

Finalmente, la fundición a la cera perdida es un proceso largo que emplea muchos materiales y maquinaria, por lo que su costo es relativamente alto. Investigar la optimización de este proceso para poder disminuir el coste final y el impacto ambiental; así como mejorar las técnicas es una tarea crucial para garantizar la sostenibilidad y competitividad de la fundición a la cera perdida en la industria moderna.

8. Defectología

La **defectología** es el estudio de los fallos producidos por un proceso de fundición. Ante los resultados de la fundición, se decidió hacer un estudio de defectología en el que clasificar los fallos encontrados e intentar detectar los errores cometidos en el procedimiento. Estas imperfecciones dificultan el estudio del producto final y de su relación con la fabricación aditiva. (Rapiddirect, 2024)

8.1 Tipos de defectología encontrados en el proyecto

Entre los defectos detectados en este proyecto se encuentran:

- **Rechupes:** son cavidades producidas por la **contracción del metal** durante la solidificación. Derivan en roturas y tensiones en la pieza. Los rechupes no son evitables, pero se pueden prever con mazarotas, aisladores de secciones y enfriadores. En el caso de la joyería es de alta complejidad incluir mazarotas o enfriadores debido a la geometría y tamaño de las piezas.
- **Porosidad:** la porosidad es un defecto que se presenta en la fundición cuando pequeñas **bolsas de aire** quedan atrapadas en el metal. Este problema puede reducir la resistencia estructural de la pieza final. Estas bolsas pueden ser gases liberados por el latón, gases de desmoldeo o humedad en el revestimiento. (Ultraseal International, 2017)
- **Llenado incompleto:** el llenado incompleto se produce cuando **el metal de entrada en el molde se enfría antes de llenar la cavidad**. Implica utilizar herramientas de simulación para detectar la temperatura de calentamiento del cilindro y del metal, así como las condiciones de llenado.
- **Grietas:** se producen por **enfriamientos bruscos** o enfriamientos no uniformes en partes de las piezas. Las piezas de gran tamaño y tiempo prolongado de solidificación corren el riesgo de sufrir grietas por la coexistencia de fases líquida y sólida del metal.
- **Escoria en la pieza:** se produce por una mala limpieza del metal en el crisol. Se observan como costras depositadas en la pieza, a veces de micras o milímetros de grosor. Afectan a las propiedades mecánicas del metal provocando roturas.
- **Rough skin / superficie en bruto:** Es un tipo de porosidad superficial que se diferencia por dejar un acabado superficial rugoso, asperezas y depresiones

cuando debería ser liso y brillante, en ocasiones se llena de escoria e impurezas de la resina calcinada. Se diferencia de las porosidades porque no atacan el interior de la pieza, y de las sopladuras porque no se produce por gases residuales. (*Common Defects In Lost Jewelry Wax Casting / Rough Skin (Rough Casting Surface)*, s. f.)

- **Sopladuras.** Surgen cuando un gas queda atrapado durante la solidificación y alcanzan la superficie dejando un rastro de sección circular. Las sopladuras, al contrario que los rechupes, tienen forma circular/ovalada.

Además se han observado **oleaje** (líneas de flujo), **lágrimas calientes**, desgastes de lijado y detalles de impresión 3D (I3D).

8.2 Maquinaria empleada

El análisis de defectología se ha hecho con una máquina de medición manual por visión, Mitutoyo Quickscope. Emplea el software QSPAK de captura de imagen. Es una maquinaria empleada para medición de alto nivel de objetos de alta precisión, con una resolución de $0,1\ \mu\text{m}$ y un desplazamiento vertical de 150mm. (*Quick Scope QS-L - Máquina de Medición Visión By MITUTOYO | DirectIndustry*, s. f.) Además lleva incorporada una lámpara de alta intensidad para captura de fotos adaptada para maquinaria de laboratorio de alta resolución, SCHOTT Mega Light100.



Imagen 123: Máquina de medición manual por visión y lámpara (Elaboración propia)

Las siguientes imágenes son de elaboración propia:

8.3 Defectos y detalles en el árbol 0

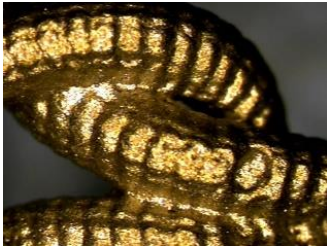


Imagen 124: Detalle del nudo en el modelo 3



Imagen 125: Detalle de la cuerda en el modelo 3

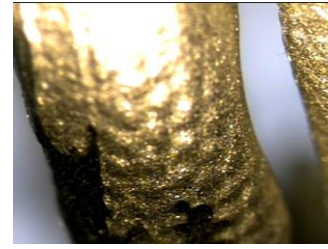


Imagen 126: Detalle superficial en el modelo 2

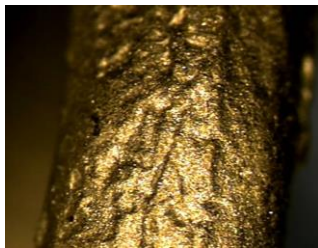


Imagen 127: Superficie en bruto del modelo 2

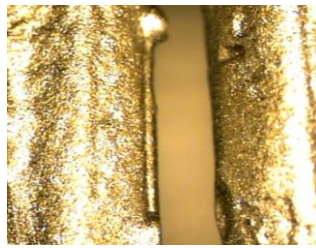


Imagen 128: Delaminación en el modelo 2



Imagen 129: Cortes por fallos en I3D en el modelo 1



Imagen 130: Cortes por fallos en impresión 3D en el modelo 1

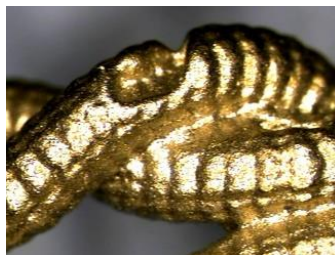


Imagen 131: Rechupe en el modelo 3



Imagen 132: Cortes por fallos en I3D y soportes internos en el modelo 1

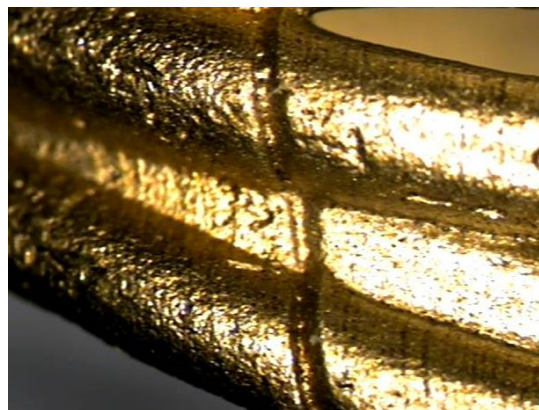


Imagen 133: Alcance de la fundición, detalles de las capas de I3D

8.4 Defectos y detalles en el árbol 1

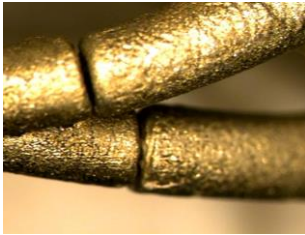


Imagen 134: Grietas en el modelo 1

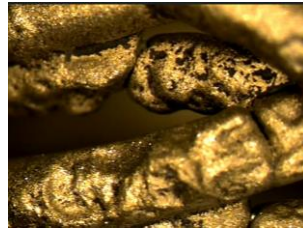


Imagen 135: Rechupes y restos de escoria en el modelo 1

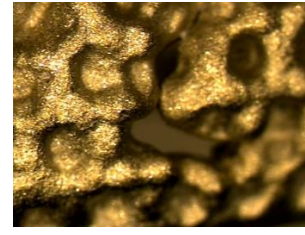


Imagen 136: Llenado incompleto y oclusiones de aire en el modelo 4



Imagen 137: Detalle de cuerda y rechupes en el modelo 3

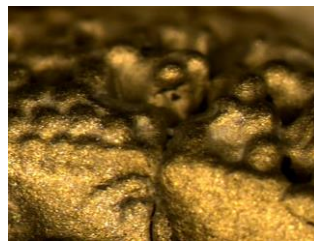


Imagen 138: Grieta en el modelo 4

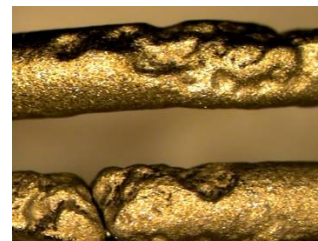


Imagen 139: Rechupe en el modelo 1



Imagen 140: Detalle de lijado en el modelo 2



Imagen 141: Rechupe y sopladura en el modelo 1



Imagen 142: Marcas de soportes de I3D en modelo 4

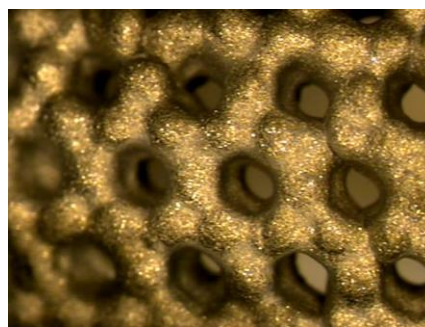


Imagen 143: Detalle de buen llenado en el modelo 4

8.5 Defectos y detalles en el árbol 2



Imagen 144: Sopladuras en el modelo 10



Imagen 145: Sopladuras en el modelo 10



Imagen 146: Sopladuras en el modelo 10



Imagen 147: Detalle de soportes internos del modelo 3



Imagen 148: Restos de escoria en el modelo 11



Imagen 149: Grietas en modelo 4

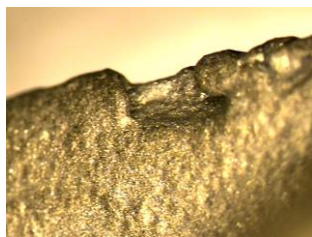


Imagen 150: Superficie en bruto y rechupe del modelo 11



Imagen 151: Porosidades del modelo 3

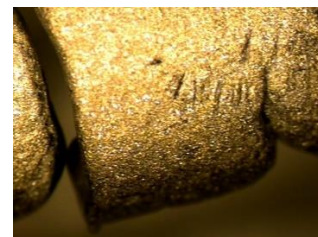


Imagen 152: Lágrimas calientes en modelo 4

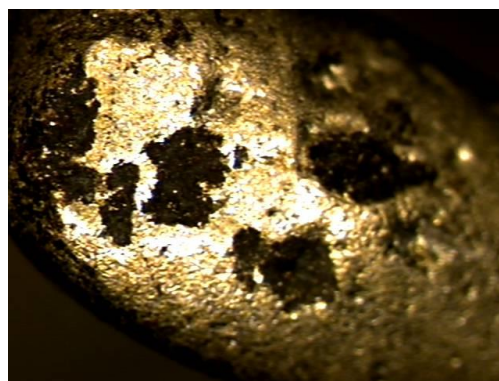


Imagen 153: Porosidades en el modelo 11. Debido al color, cantidad y al tamaño, se puede intuir que se han provocado por gases internos

8.6 Defectos y detalles en el árbol 3

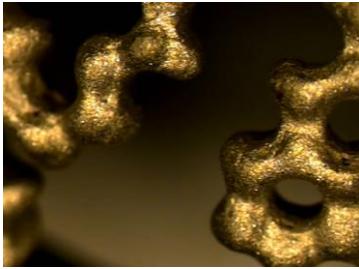


Imagen 154: Llenado incompleto y superficie en bruto en el modelo 4

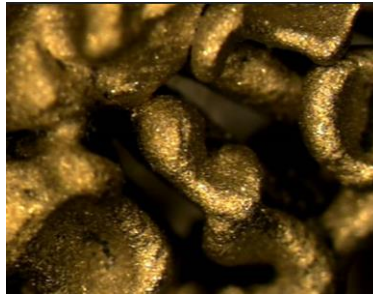


Imagen 155: Llenado incompleto y oclusiones de aire en el modelo 6

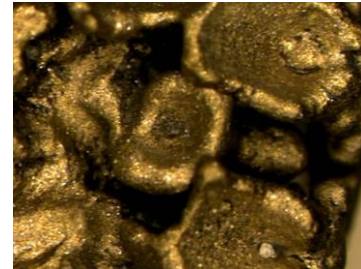


Imagen 156: Llenado incompleto y oclusiones de aire en el modelo 6

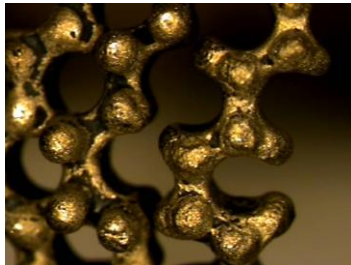


Imagen 157: Detalles bien obtenidos pero llenado incompleto en el modelo 4

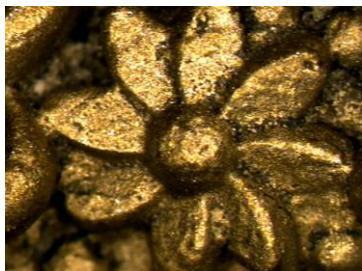


Imagen 158: Deformación del metal en el modelo 6



Imagen 159: Restos de escoria en el modelo 6

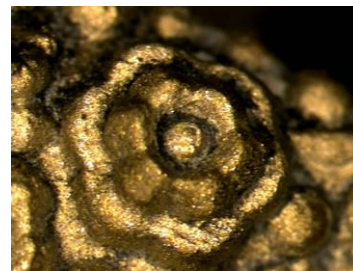
8.7 Defectos y detalles en el árbol 4



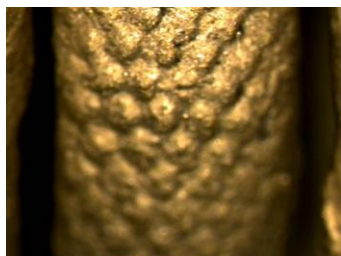
*Imagen 160: Detalle superficial
del modelo 12*



*Imagen 161: Detalle superficial
del modelo 12*



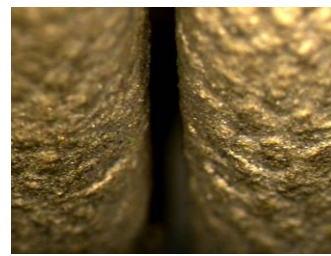
*Imagen 162: Detalle superficial
del modelo 12*



*Imagen 163: Detalle superficial
del modelo 2*



*Imagen 164: Cabeza de la
serpiente del modelo 2*



*Imagen 165: Detalle superficial
del modelo 2*



*Imagen 166: Escoria alojada en
los engarces del modelo 13*



*Imagen 167: Llenado incompleto
del modelo 13*



*Imagen 168: Llenado incompleto
y rechupes del modelo 13*



Imagen 169: Detalles de capas en I3D en el modelo 13

8.8 Defectos y detalles en el árbol 5



Imagen 170: Lágrimas calientes y grietas en el modelo 6

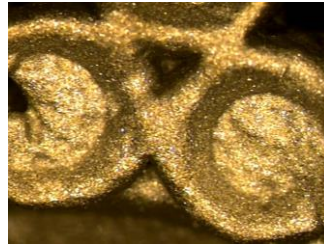


Imagen 171: Llenado incompleto y oclusiones de aire en modelo 6

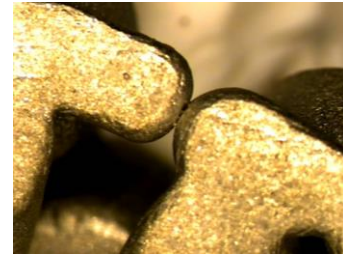


Imagen 172: Llenado incompleto del modelo 7

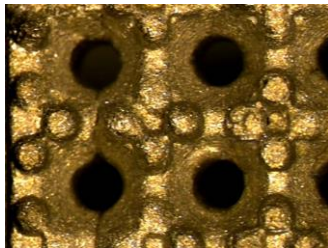


Imagen 173: Detalles y engarces del modelo 15

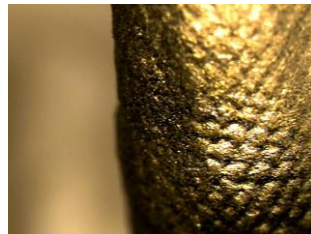


Imagen 174: Detalles y texturas del modelo 2

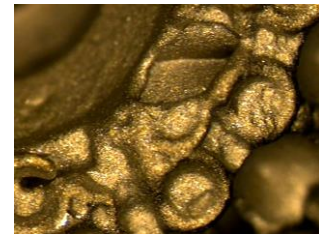


Imagen 175: Oclusiones de aire en el modelo 7



Imagen 176: Porosidades en el modelo 9



Imagen 177: Llenado incompleto en el modelo 9

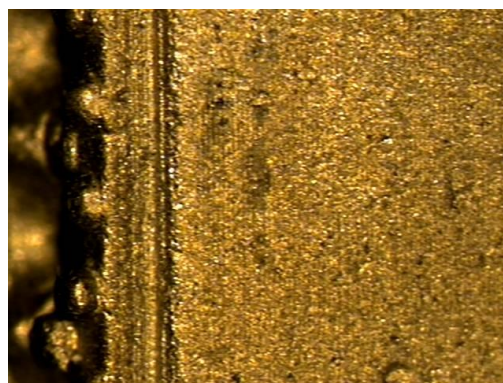


Imagen 178: Detalles de capas en I3D en el modelo 15

8.9 Defectos y detalles de otros árboles



Imagen 179: Oleaje en el modelo 7

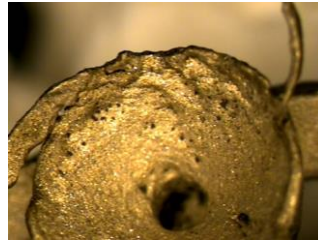


Imagen 180: Oleaje y rotura en el modelo 7



Imagen 181: Fusión inacabada de dos cuerpos del modelo 14



Imagen 182: Porosidades en el modelo 14



Imagen 183: Superficies en bruto y porosidades en el modelo 14

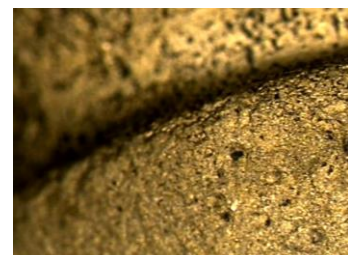


Imagen 184: Superficies en bruto y porosidades en el modelo 10



Imagen 185: Rechupe y lijado sobre el modelo 11

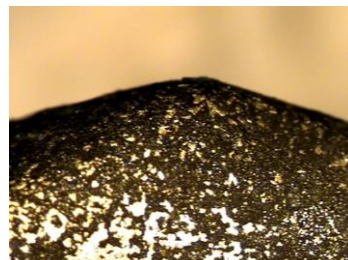


Imagen 186: Porosidades y restos de escoria en el modelo 11



Imagen 187: Detalles de soportes en el modelo 7



Imagen 188: Detalles de soportes en el modelo 7

8.10 Conclusiones sobre defectología

Desde este **estudio defectológico se respaldan las hipótesis formuladas** en las conclusiones de fundición (7.7.1 Discusión de errores y elaboración de la hipótesis) se comenta la influencia de esfuerzos como contracciones y expansiones agresivas, así como desvestimientos realizados antes de tiempo.

Entre los defectos metalúrgicos encontramos los siguientes:

- La presencia de oclusiones de aire en las piezas refleja una mala penetración del revestimiento, esto puede ser porque el **revestimiento** necesitase **más tiempo de mezclado** o una **presión mayor en el volcado sobre el cilindro** de fundición como se sugiere en apartados anteriores. Imagen 175: Oclusiones de aire en el modelo 7.
- La presencia de rechupes confirma que los esfuerzos de contracción agresivos perjudicaron la integridad de las piezas. Entre las causas de los rechupes, se encuentran **presiones bajas con temperaturas de vertido altas**. Afecta también a su aparición los **cambios de concentración de material** en las piezas, así como el uso de geometrías complejas, que da lugar a gradientes de enfriamiento irregulares. Este es exactamente el caso que se produce en los ensayos de este proyecto. Imagen 139: Rechupe en el modelo 1
- Las grietas siguen el mismo patrón que los rechupes, debido a **esfuerzos provocados por enfriamientos** no uniformes y vertidos a alta velocidad. Imagen 134: Grietas en el modelo 1
- El llenado incompleto es el defecto que más se ha identificado. Se debe, como ya se ha explicado, a la **solidificación del metal antes de que el líquido llene toda la cavidad**. Esto reafirma la propuesta de capítulos anteriores de por qué el metal no penetraba íntegramente en el molde y no avanzaba a pesar del llenado de la mitad del cuerpo de un anillo. Imagen 154: Llenado incompleto y superficie en bruto en el modelo 4
- Las porosidades pueden deberse a **gases alojados en el interior del metal** o a fallos en el **proceso de cocción de los cilindros**. Para contemplar si hubiera también porosidades internas habría que hacer un análisis en ultrasonidos, pero no es necesario ya que debido a la alta densidad de este defecto es esperable que

muchas de las piezas tengan en su interior gases alojados. Imagen 186: Porosidades y restos de escoria en el modelo 11

- Las sopladuras se han detectado en una pieza únicamente, y una de sus causas es el **vertido a baja presión**; así como gases alojados en el interior del molde. Imagen 146: Sopladuras en el modelo 10
- La aparición de escoria en algunas piezas confirma que el **metal no estaba lo suficientemente limpio**, al contrario de lo que se suponía en apartados previos. Imagen 148: Restos de escoria en el modelo 11.

En los defectos provocados por el calor encontramos el siguiente:

- Las lágrimas calientes son desgarros provocados por contracciones térmicas agresivas y temperaturas de colado demasiado altas. Este defecto **no es evitable** en el proyecto, ya que el metal requiere altas temperaturas de fusión. Imagen 170: Lágrimas calientes y grietas en el modelo 6

En los defectos provocados por el revestimiento se recogen los siguientes:

- Los cortes se deben a vertidos de alta velocidad y zonas con alta concentración de metales, que agrietan y rompen el molde. Positivamente no es uno de los defectos más abundantes en las piezas.
- Los oleajes, que se encuentran en pocas piezas, se deben a moldes de baja presión, incapaces de soportar la presión ejercida por la colada de metal y se observan con la forma de pequeñas olas a lo largo del metal. Imagen 179: Oleaje en el modelo 7

De estos defectos los de mayor presencia son los llenados incompletos, rechupes y porosidades, estas últimas tanto superficiales como superficies en bruto, gránulos o porosidades ciegas, que se originan en el interior y atraviesan el metal hasta la superficie dejando una cavidad irregular.

Se concluye que la causa final de los defectos y la mala integridad de los anillos fabricados, así como su textura superficial **se debe a lo mencionado en el último párrafo del apartado 7.7.1**, haciendo especial hincapié en las irregularidades del enfriamiento de los anillos, **evidenciado y confirmado por la presencia de llenados incompletos, porosidades y rechupes**. (KEYENCE México, s. f.), (Rapiddirect, 2024)

8.11 Anillos terminados



Imagen 189: Anillos terminados sin postacabado (Elaboración propia)

9. Técnicas de acabado

Las técnicas de acabado y pulido de las piezas empleadas son las que se expondrán a continuación. Su función es obtener los anillos del árbol, limpiarlos y retirarles cualquier tipo de impureza y dotar a las piezas de brillo. Se dan tras el proceso de fundición y tras el análisis de defectos. Se exponen en orden:

1. **Chorroado.** Tras obtener los árboles de metal del proceso de fundición se debe eliminar cualquier resto de revestimiento. Esto se realiza mediante una chorreadora. La empleada en este proyecto es la NORBLAST 3D9B. Tiene un sistema integrado de disparo a presión de arena y recuperación que elimina cualquier partícula adherida a la superficie del metal. Está diseñada para postacabados de fabricación 3D como en SLS o BinderJetting. En estos pasos también se utiliza aire a compresión para eliminar cualquier rastro de arena. (Norblast, 2022)



Imagen 190: Imágenes de la chorreadora de arena NORBLAST (Elaboración propia)

2. **Corte.** Para cortar la pieza final de los bebederos se utilizaron dos herramientas. Una es la cortadora neumática de pedal, que aplica una presión máxima de 35MPa y atraviesa el metal con un corte limpio. La otra herramienta sería la sierra vertical de cinta, de la marca EVEI (*SIERRAS EVEI*, s. f.). Los parámetros de corte de esta máquina son los siguientes para el latón empleado en este proyecto:

<i>Espesor (mm)</i>	1,5	6	25	7,5
<i>Velocidad de corte (m/ min)</i>	300	120	75	45
<i>Dientes por pulgada (ud/ 2,54 cm)</i>	18	14	10	6

Tabla 30: Velocidad de la sierra de cinta en función del espesor del latón (*SIERRAS EVEI*, s. f.)

3. **Lijadora de cinta.** Esta herramienta retira las rebabas de corte y retira los milímetros de bebedero que restan en el anillo de metal. Además sirve para pulir superficies, lo cual dio a piezas con un acabado rugoso una apariencia brillante. La empleada en los ensayos fue la metalkraft MBSM 100-130.

Después de este paso se realizan los análisis de defectología y se pulen los anillos para darles brillo y un acabado suave.

4. **Empleo de lijas manuales y eléctricas.** Se utilizan lijas manuales para retirar el grueso que pueda quedar de metal, y eléctricas, las explicadas en el apartado 3.3.2 Paso 1: Preparación de los modelos de cera, MakerX Works para dar brillo y suavidad. Se retira material con una lija rotativa de cabezal de acero.

En la industria dependiendo del material, del uso y de las dimensiones se realizan técnicas como la galvanoplastia, la inmersión en caliente, tratamientos químicos (como el *niello* 2.1 Historia de la fabricación de joyería), el electropulido o una inmersión en un tambor giratorio.

10. Análisis económico

Para realizar un análisis económico acorde al proyecto se ha decidido analizar por un lado la tecnología de fabricación 3D y por otro, y con valores aproximados porque se desconoce el precio original de la maquinaria, el coste de fundición.

En ninguno de estos apartados se tendrá en consideración las series extra de fundición ni la segunda bandeja de impresión 3D defectuosa.

10.1 Coste de impresión 3D

El coste de impresión en la tecnología SLA en este proyecto es variable ya que cada impresión contenía anillos diferentes, con un gasto completamente diferente dependiendo de la resina utilizada. Es por ello que se analizarán los en base a los datos indicados a lo largo del capítulo 6 Ensayos en impresión 3D.

Los costes de impresión se han calculado con una herramienta Excel cedida por Mariano Jiménez Calzado. (Jiménez Calzado, s. f.)

El coste inicial de la Form3 es de 3000€, y se aproxima una amortización de 5 años. El coste de mantenimiento anual se aproxima por el 10% del precio de compra. Se asume un beneficio de venta del 15%.

- Costes de impresión de la bandeja 1.

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D FROMLABS 3 SLA		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	3.000	
Coste mantenimiento anual (€)	150	
Años de amortización	5	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	2000	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	0,35	
Precio Hora venta-público (€/h)	0,40	
DATOS COSTE MATERIAL		
Castable Wax 40 (L)	301,29	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20	
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	SLA SÓLIDO	Costes parciales
Material modelo (L)	0,006	0,0018 €/ud
Soporte modelo (L)	0,0265	0,0080 €/ud
Tiempo modelo (h)	7,5667	3,0021 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,1667	3,3340 €/ud
Cantidad de piezas	7	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	11,46 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	80,25 €	

Tabla 31: Análisis de costes de la bandeja 1 (Elaboración propia)

- Costes de impresión de la bandeja 2.

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D FROMLABS 3 SLA		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	3.000	
Coste mantenimiento anual (€)	150	
Años de amortización	5	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	2000	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	0,35	
Precio Hora venta-público (€/h)	0,40	
DATOS COSTE MATERIAL		
Castable Wax 40 (L)	301,29	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20	
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	SLA SÓLIDO	Costes parciales
Material modelo (L)	0,0061	0,0018 €/ud
Soporte modelo (L)	0,0120	0,0036 €/ud
Tiempo modelo (h)	19,0833	7,5713 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,1667	3,3333 €/ud
Cantidad de piezas	8	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	11,61 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	92,84 €	

Tabla 32: Análisis de costes de la bandeja 2 (Elaboración propia)

- Costes de impresión de la bandeja 3.

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D FROMLABS 3 SLA		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	3.000	
Coste mantenimiento anual (€)	150	
Años de amortización	5	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	2000	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	0,35	
Precio Hora venta-público (€/h)	0,40	
DATOS COSTE MATERIAL		
Castable Wax 40 (L)	301,29	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20	
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	SLA SÓLIDO	Costes parciales
Material modelo (L)	0,0082	0,0025 €/ud
Soporte modelo (L)	0,0099	0,0030 €/ud
Tiempo modelo (h)	22,1333	8,7814 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,1667	3,3333 €/ud
Cantidad de piezas	4,0000	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	12,60 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	50,40 €	

Tabla 33: Análisis de costes de la bandeja 3 (Elaboración propia)

- Costes de impresión de la bandeja 4.

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D FROMLABS 3 SLA		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	3.000	
Coste mantenimiento anual (€)	150	
Años de amortización	5	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	2000	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	0,35	
Precio Hora venta-público (€/h)	0,40	
DATOS COSTE MATERIAL		
Castable Wax (L)	361,79	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20	
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	SLA SÓLIDO	Costes parciales
Material modelo (L)	0,0155	0,0056 €/ud
Soporte modelo (L)	0,0288	0,0104 €/ud
Tiempo modelo (h)	9,5667	3,7956 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,1667	3,3340 €/ud
Cantidad de piezas	11	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	14,52 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	159,76 €	

Tabla 34: Análisis de costes de la bandeja 4 (Elaboración propia)

- Costes de impresión de la bandeja 5.

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D FROMLABS 3 SLA		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	3.000	
Coste mantenimiento anual (€)	150	
Años de amortización	5	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	2000	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	0,35	
Precio Hora venta-público (€/h)	0,40	
DATOS COSTE MATERIAL		
Castable Wax (L)	361,79	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20	
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	SLA SÓLIDO	Costes parciales
Material modelo (L)	0,0094	0,0034 €/ud
Soporte modelo (L)	0,0085	0,0031 €/ud
Tiempo modelo (h)	5,4667	2,1689 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,1667	3,3340 €/ud
Cantidad de piezas	9	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	5,62 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	50,56 €	

Tabla 35: Análisis de costes de la bandeja 5 (Elaboración propia)

Costes de impresión de la bandeja 6.

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D FROMLABS 3 SLA		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	3.000	
Coste mantenimiento anual (€)	150	
Años de amortización	5	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	2000	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	0,35	
Precio Hora venta-público (€/h)	0,40	
DATOS COSTE MATERIAL		
Castable Wax (L)	361,79	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20	
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	SLA SÓLIDO	Costes parciales
Material modelo (L)	0,0228	0,0082 €/ud
Soporte modelo (L)	0,0161	0,0058 €/ud
Tiempo modelo (h)	8,1167	3,2203 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,1667	3,3340 €/ud
Cantidad de piezas	19	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	9,23 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	175,35 €	

Tabla 36: Análisis de costes de la bandeja 6 (Elaboración propia)

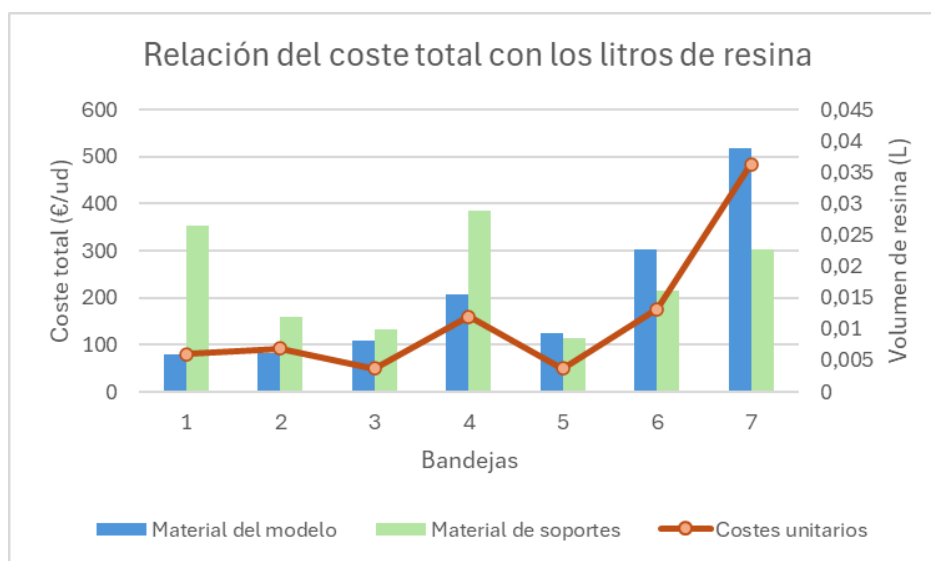
- Costes de impresión de la bandeja 7.

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D FROMLABS 3 SLA		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	3.000	
Coste mantenimiento anual (€)	150	
Años de amortización	5	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	2000	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	0,35	
Precio Hora venta-público (€/h)	0,40	
DATOS COSTE MATERIAL		
Castable Wax (L)	361,79	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20	
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	SLA SÓLIDO	Costes parciales
Material modelo (L)	0,0389	0,0141 €/ud
Soporte modelo (L)	0,0228	0,0082 €/ud
Tiempo modelo (h)	20,9167	8,2987 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,1667	3,3340 €/ud
Cantidad de piezas	29	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	16,68 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	483,62 €	

Tabla 37: Análisis de costes de la bandeja 7 (Elaboración propia)

El precio total de la producción en Form3 asciende a 1095,78€. Eliminando el coste del técnico de laboratorio, se obtiene un total de 900,52€; lo cual es un coste de fabricación relevante. Por otro lado, eliminando el coste de amortización total, que es de 319,17€; el coste del proyecto sería de 581,35€.

Con el análisis de las bandejas realizado, se observa que además de un coste total elevado, el impacto en el coste final de los soportes es determinante.

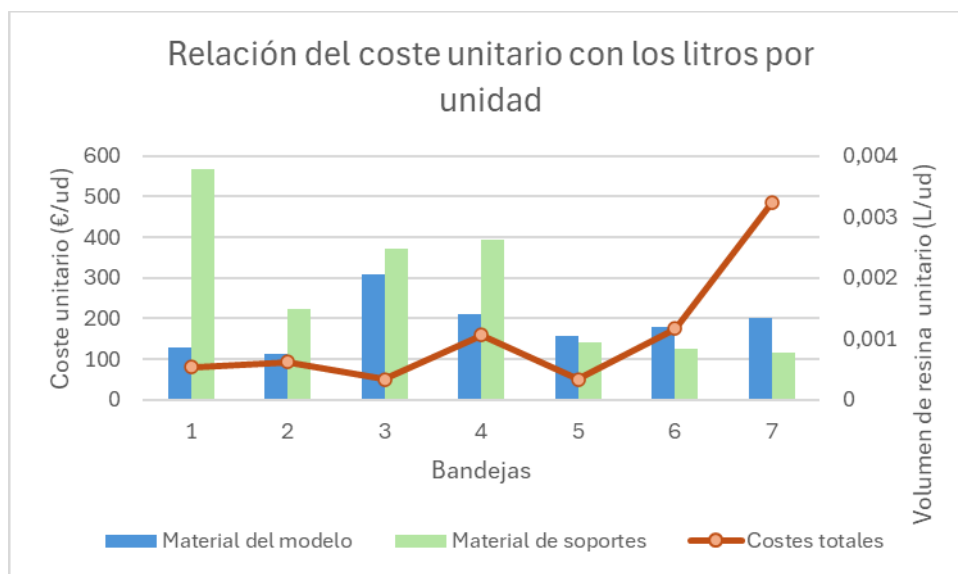


Gráfica 12: Relación del coste total con los litros de resina (Elaboración propia)

Tanto en la bandeja 1 como en la 4 sobresale notablemente el uso de material de soportes, esto se debe a que fueron las tiradas en las que se estaba probando la resina, y cómo colocar los soportes correctamente de cara a evitar rechazos por el software y piezas mal fabricadas. Tiene sentido que las tres primeras bandejas tengan más resina en los soportes que en los modelos, porque la Castable Wax 40 es menos rígida, por lo que su capacidad de optimización es limitada. Las bandejas 6 y 7, cuyos costes son superiores, ya que se produce un gasto de recursos de impresión considerable (tiempo y número de piezas), presentan una optimización de los soportes superior al resto de tiradas.

	Coste total (€)	Anillos fabricados (ud)	Coste medio unitario (€/ud)
Castable Wax 40	223,49	19	11,763
Castable Wax	869,29	68	12,784

Tabla 38: Coste medio unitario de la fabricación 3D por resinas (Elaboración propia)



Gráfica 13: Relación del coste unitario con los litros/ud de resina (Elaboración propia)

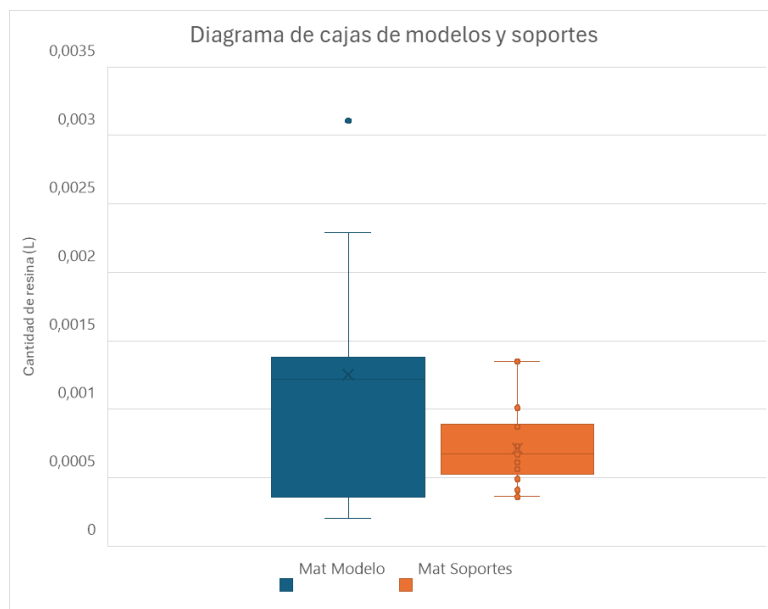
En esta comparativa, además de apreciar la misma mejoría en el uso de soportes, llama la atención el alto coste unitario de la séptima impresión. Esto se debe a que esta tirada no fue uniforme, y había piezas con alto contenido en resina, y otras de menor densidad. Por otro lado, es el proceso que más recursos consumió, contando con un tiempo de impresión superior a 20h; que repercute directamente en el precio. Al observar las medias, no se tiene una constancia real de la variación de cómo los diferentes volúmenes afectan al precio.

Se ha hecho un análisis más sensible de la bandeja 7, con las 29 piezas, ya que se trata de un ejemplo de producción industrializada. Estas son las conclusiones. Como no tiene sentido calcular el impacto de costes pieza a pieza con la misma formulación que en el proceso anterior, porque siempre es más rentable imprimir en bandejas completas, se han adaptado los parámetros de la tabla de análisis de costes para llegar a un resultado adecuado:

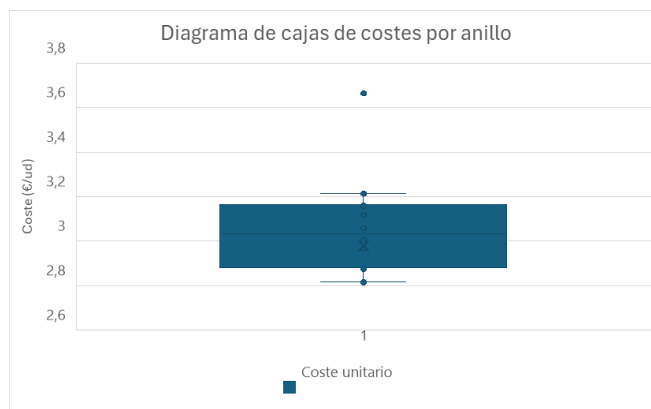
	Media	Varianza	Máximo	Mínimo	Desv típica
Mat Modelo	0,9008	0,8617	3,1100	0,2000	0,9447
Mat Soportes	0,6724	0,0641	1,3500	0,3600	0,2577
Tiempo	2,8917	0,1158	3,8000	2,5500	0,3463
Costes	3,0742	0,0409	3,6639	2,8157	0,2058

Tabla 39: Resultados estadísticos de la producción en la bandeja 7 (Elaboración propia)

Observando la desviación típica del material de modelo se puede ver cómo en esta tirada se mezclaron distintos tipos de densidades de anillos, es decir, algunos con más material que otros. Una diferencia de 0,9ml entre los anillos es lo suficientemente significativa como para dar los resultados de la tabla superior. La desviación típica en el material empleado en los soportes es de 0,25ml entre los diferentes modelos. Esto implica una buena optimización. Respecto al tiempo, la media de fabricación de una sola pieza es de 2,89 horas, lo cual es un consumo elevado de recursos. Se debe recordar que la bandeja 7 se imprimió con una resolución de 25 μm , lo cual afecta directamente al precio final, ya que el tiempo de fabricación aumenta en un 170%.



Gráfica 14: Diagrama de cajas de modelos y soportes de la bandeja 7 (Elaboración propia)



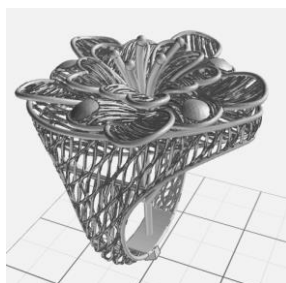
Gráfica 15: Diagrama de cajas de costes de la bandeja 7 (Elaboración propia)

Para poder comparar con webs de fabricación se necesita importar un archivo STL. Como muchos de los objetos se recibieron (cedidos por FormLabs) en un archivo en formato .form, no se pueden extraer a un archivo STL. Por lo que la comparación de costes con el mercado se hará mediante el volcado de un archivo de alta cantidad de masa, uno con superficies de alto detalle y otro de filigrana en webs de impresión 3D. Con esto se obtendrá un presupuesto comparable a la tabla superior.

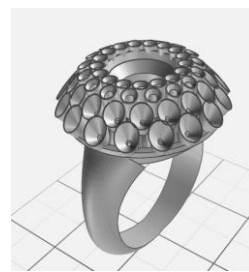
Los modelos a volcar en Protolabs y en imaterialise son los siguientes:



*Imagen 191: Modelo 2.
Obtenido con Protolabs
(Elaboración propia)*



*Imagen 192: Modelo 5.
Obtenido con Protolabs
(Elaboración propia)*



*Imagen 193: Modelo 6.
Obtenido con Protolabs
(Elaboración propia)*

Presupuestos obtenidos mediante Protolabs:

	3D printing Formlabs Standard Resin (SLA) As printed Color: Black Layer height: 100µm	1	€18.35 €18.35p/part
Running DFM analysis			
uploads_files_246177_S nake+Ring.stl			
22.9 × 18.4 × 22.8 mm 1,405.084 mm ³			

Imagen 194: : Presupuesto de impresión del modelo 2 mediante Protolabs (Elaboración propia)

	3D printing	1	€23.20
	Formlabs Standard Resin (SLA)		€23.20p/part
	As printed		
	Color: Black		
	Layer height: 100µm		
Running DFM analysis			
uploads_files_709290_ RFZ-SNL-008+R-58.stl			
24.5 × 24.0 × 30.7 mm			
501.4 mm ³			

Imagen 195: Presupuesto de impresión del modelo 5 mediante Protolabs (Elaboración propia)

	3D printing	1	€17.24
	Formlabs Standard Resin (SLA)		€17.24p/part
	As printed		
	Color: Black		
	Layer height: 100µm		
Running DFM analysis			
123ston_ring.stl			
22.2 × 19.0 × 26.3 mm			
1,231.829 mm ³			

Imagen 196: Presupuesto de impresión del modelo 6 mediante Protolabs (Elaboración propia)

Protolabs no es capaz de imprimir ni a 25 µm ni permite imprimir a 50 µm los modelos 5 y 6, ya que la filigrana es muy delgada y no pueden asegurar la entrega de un pedido de calidad. Por otro lado, se observan problemas de integridad en sus mallas. Esto quiere decir que hay un número alto de huecos e intersecciones. Presupuesto generado con resina SLA estándar, no calcinable, no ofrece una opción semejante al proyecto. La resina calcinable aumentaría considerablemente el precio.

Presupuestos obtenidos mediante imaterialise:

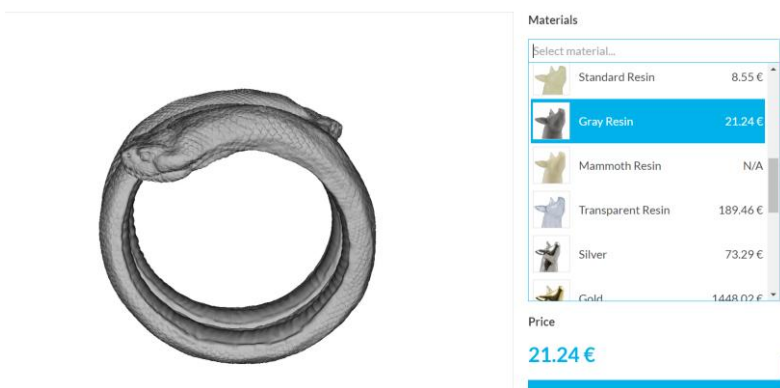


Imagen 197: Presupuesto de impresión del modelo 2 mediante imaterialise (Elaboración propia)

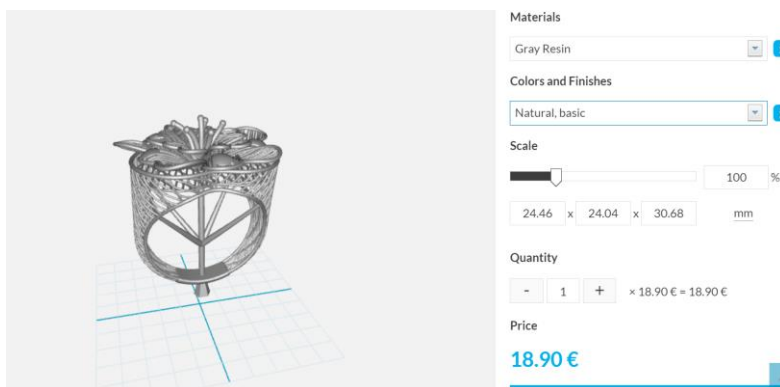


Imagen 198: Presupuesto de impresión del modelo 5 mediante imaterialise (Elaboración propia)

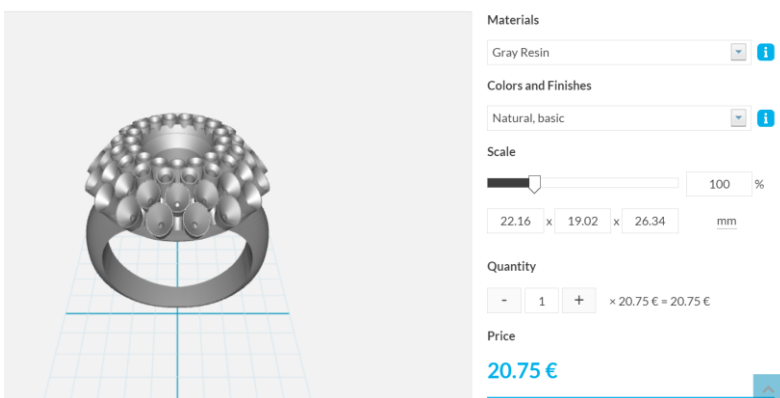


Imagen 199: Presupuesto de impresión del modelo 6 mediante imaterialise (Elaboración propia)

Dado que imaterialise no realiza un análisis de geometrías, mallado y detalles, los precios propuestos son inconsistentes y basados en el volumen de material de impresión. No ofrece trabajar con resina calcinable, así que se ha optado por la Grey Resin, también empleada en joyería para realizar patrones de moldes.

Se asumirán las piezas complejas como fabricadas con Castable Wax, y las sencillas con Castable Wax 40. Por ello se realiza la siguiente asociación:

- Los precios del modelo 2 son comparables con la Castable Wax 40.
- Los precios del modelo 5 son comparables con la Castable Wax.
- Los precios del modelo 6 son comparables con ambas resinas.

Los resultados son los siguientes:

Coste medio unitario (€/ud) en el laboratorio según el tipo de resina empleada		Presupuesto con Protolabs (€) Resina estándar, resolución de 100µm			Presupuesto con imaterialise (€) Resina gris, resolución de 100µm		
		Modelo 2	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 2	Modelo 5	Modelo 6
Castable Wax 40	11,763	18,35	-	17,24	21,24	-	20,75
Castable Wax	12,784	-	23,2	17,24	-	18,9	20,75

Tabla 40: Comparación de costes en el laboratorio contra producción bajo pedido (Elaboración propia)

Tal y como se puede deducir de la tabla superior, los costes de producción de forma particular son bastante inferiores a los propuestos por fabricación bajo pedido. A pesar de diferenciarse un laboratorio de investigación de una empresa de producción, la tecnología empleada es la misma.

10.2 Coste de fundición

El coste de fundición es complejo de calcular, ya que en cada vertido se emplea una masa diferente de latón, y no todo el latón que se funde termina siendo parte del objeto final. Habitualmente se añade al crisol hasta el doble de la masa que termina en el árbol de cera.

Además la fundición requiere de una maquinaria más costosa que la fabricación 3D, ya que intervienen muchos elementos de fabricación, como las máquinas, los materiales y un conjunto de accesorios y utillaje empleados para el proyecto.

Si bien ni los materiales ni los accesorios no computan en el cálculo de la amortización, los accesorios no son consumibles, como sí son la cera o el latón, por lo que no computan en el coste de producción; salvo por un gasto de depreciación por uso, el cual se tendrá en cuenta, tal y como se tiene en la maquinaria.

El siguiente listado de materiales es una suma aproximada de los valores que puede tomar el precio de compra de los elementos empleados en el desarrollo del proyecto. Se han intentado encontrar los precios de las máquinas originales, pero en casos como los hornos se ha optado por buscar su equivalente en el mercado, ya que son máquinas descatalogadas.

Es posible encontrar precios más competitivos en mercados asiáticos, siendo el caso más evidente el horno de fundición, que se puede conseguir por una quinta parte del precio estimado en la siguiente tabla.

ANÁLISIS DE COSTES PARA FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA			
	Cantidad	Precio/ud	Precio
MAQUINARIA			
<i>Lijadora MakerX Works</i>	1,00 ud	173,00 €/ud	173,00 €
<i>Soldador MESTRA</i>	1,00 ud	271,04 €/ud	271,04 €
<i>Inyectora de cera C&M</i>	1,00 ud	661,87 €/ud	661,87 €
<i>Fundidora de microfusión con batidora de revestimiento</i>	1,00 ud	3400,00 €/ud	3.400,00 €
<i>Horno de mufla</i>	1,00 ud	1054,26 €/ud	1.054,26 €
<i>Horno de fundición</i>	1,00 ud	5705,12 €/ud	5.705,12 €
Total			11.265,29 €
MATERIALES			
<i>Cera ACCU Flakes</i>	1,00 kg	15,00 €/kg	15,00 €
<i>Satin Cast 20</i>	3,00 kg	02,35 €/kg	7,05 €
<i>Ransom & Randolph Argentum</i>	7,00 kg	03,35 €/kg	23,47 €
<i>Agua desionizada</i>	4,40 L	02,30 €/L	10,11 €
<i>Latón 82/16</i>	0,98 kg	23,00 €/kg	22,63 €
Total			78,25 €
ACCESORIOS			
<i>Moldes de troncos y ramas</i>	1,00 ud	03,15 €/ud	3,15 €
<i>Cilindro pequeño 2"x4"</i>	1,00 ud	32,18 €/ud	32,18 €
<i>Cilindros grandes 2"x5"</i>	2,00 ud	39,88 €/ud	79,76 €
<i>Crisol</i>	1,00 ud	22,00 €/ud	22,00 €
<i>Cinta de carroceros</i>	1,00 ud	02,50 €/ud	2,50 €
<i>Bases de caucho</i>	3,00 ud	07,00 €/ud	21,00 €
<i>Cuba de desvestimiento</i>	1,00 ud	05,00 €/ud	5,00 €
<i>Báscula</i>	1,00 ud	253,98 €/ud	253,98 €
<i>Termopar</i>	1,00 ud	32,74 €/ud	32,74 €
<i>Utillaje de horno de mufla</i>			
<i>Pinzas</i>	1,00 ud	30,99 €/ud	30,99 €
<i>Abrazadera</i>	1,00 ud	20,67 €/ud	20,67 €
<i>Guantes nitrilo</i>	1,00 ud	02,40 €/ud	2,40 €
<i>Guantes de fundición</i>	1,00 ud	90,40 €/ud	90,40 €
<i>Gafas</i>	1,00 ud	02,00 €/ud	2,00 €
<i>Utillaje de h.fundición</i>			
<i>Pinzas</i>	1,00 ud	06,51 €/ud	6,51 €
<i>Cazoleta refractaria</i>	1,00 ud	02,40 €/ud	2,40 €
<i>Cazoleta refractaria</i>	1,00 ud	01,56 €/ud	1,56 €
<i>Agitador</i>	1,00 ud	06,35 €/ud	6,35 €
Total			615,59 €

Tabla 41: Precio de compra de los materiales utilizados en el proyecto (Elaboración propia)

El cálculo de la amortización de las máquinas es el siguiente:

ANÁLISIS DE COSTES PARA FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA

	Precio	Amortización (año)	Amortización (h/año) - 223*0,5 días-año / 12 horas-día	Coste de mantenimiento anual (€)	Potencia	Precio electricidad (€/kW)	Precio hora maquinaria (€/h)
MAQUINARIA							
Lijadora MakerX Works	173,00 €	3	2000 h	- €	80 W	90	0,0288
Soldador MESTRA	271,04 €	3	2000 h	- €	12 W	90	0,0452
Inyectora de cera C&M	661,87 €	10	500 h	66,19 €	230 W	90	0,1721
Fundidora de microfusión con batidora de revestimiento	3.400,00 €	15	1400 h	340,00 €	250 W	90	0,2105
Horno de mufla	1.054,26 €	15	1400 h	105,43 €	850 W	90	0,0653
Horno de fundición	5.705,12 €	15	1400 h	570,51 €	3000 W	90	0,3532
Total	11.265,29 €			1.126,53 €			

Tabla 42: Cálculo de la amortización de las máquinas de fundición

Para este análisis se ha optado por una amortización de 3 años para la lijadora y el soldador, ya que son herramientas de relativo bajo coste. La inyectora de cera asciende a un periodo de 10 años porque la vida útil de la inyectora es definitivamente superior a 10 años, pero establecer una amortización superior sería irrealista. Por último, los hornos y la fundidora/batidora cuentan con una amortización de 15 años; ya que con un buen mantenimiento, al menos estas máquinas deben poder funcionar ese periodo. (ATO *Depreciation Rates 2021 • Casting*, s. f.)

Respecto a las horas anuales de amortización, se ha optado por establecer un rango horario aproximado, en el que la lijadora y el soldador tendrán un uso elevado, ya que no solo se usan en este área; la fundidora y los hornos 1400h, debido a que sería erróneo pensar que los hornos se utilizarían 12 horas al día 223 días anualmente. La inyectora se emplea en torno a 500 horas porque es una máquina de uso poco frecuente.

Para calcular los costes finales se han tenido en cuenta los siguientes parámetros:

- La depreciación del utillaje y accesorios de fabricación es del 20%; y se emplearán de media el mismo tiempo que los hornos más potentes, 1400h.
- Se calcularán en base al número de árboles de cera fabricados, no el proceso completo y tampoco en piezas únicas.
- Los tiempos de cada proceso de fabricación son los siguientes:
- Tiempo de lijado: 10 min por árbol porque se asume que lo realiza un técnico especializado.

- Tiempo de soldado: 15 min en crear un árbol de cera por parte de un especialista.
- Tiempo de inyección: 30 minutos ya que se debe calentar la cera estándar durante un periodo largo de tiempo para poder crear los moldes y bebederos.
- Tiempo de batido: 5 minutos. No se tiene en cuenta el lavado posterior ya que la máquina no estaría en funcionamiento.
- Tiempo de horno de mufla: 23,6 horas. Esto se debe a que la media de las curvas de calentamiento es de 17h 40min. El tiempo restante son 6 horas de añadidura en las que se pone el horno en “espera” para empezar a funcionar, con las rampas precargadas.
- Tiempo de colado: 1 hora. Se computa el tiempo de fundido del latón, colado y desvestimiento.
- Se tienen en cuenta todos los materiales empleados, obtenidos de la tabla de precio de compra.

ANÁLISIS DE COSTES EN FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA ICAI						
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA						
	Lijadora	Soldador	Inyectora	Fundidora microf.	Mufla	Horno fund.
Precio máquina (€)	173	271,04	661,87	3400	1054,26	5705,12
Coste mantenimiento anual (€)	0	0	66,187	340	105,426	570,512
Años de amortización	3	3	10	15	15	15
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	2000	2000	500	1400	1400	1400
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	0,02883	0,04517	0,17209	0,21048	0,06526	0,35317
Precio Hora venta-público (€/h)	0,03	0,05	0,20	0,24	0,08	0,41
DATOS COSTE						
Materiales (cera, latón, revestimiento...)	78,25					
Depreciación hora de los accesorios	0,10113					
DATOS COSTE TÉCNICO						
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20					

CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Variable	COSTE
Material (kg)	1,64	7,825 €/ud
Tiempo de lijado (h)	0,1667	0,006 €/ud
Tiempo de soldado (h)	0,25	0,013 €/ud
Tiempo de inyección (h)	0,5	0,099 €/ud
Tiempo de batido (h)	0,0833	0,020 €/ud
Tiempo de horno de mufla (h)	23,6667	1,776 €/ud
Tiempo de colado (h)	1	0,406 €/ud
Tiempo técnico de laboratorio (h)	3,5	70,000 €/ud
Cantidad de árboles	10	

Coste de accesorios y utillaje	
Coste de útiles (€)	615,59
Depreciación (h/año)	1400
Ratio de depreciación	20%
Precio Hora depreciación (€/h)	0,08794
Precio Hora venta-público (€/h)	0,10113

Coste de amortización	2,32
Coste de material del modelo	7,82
Coste de la depreciación de los accesorios	2,60
Coste del técnico	70,00

Coste unitario (€) en ICAI + IVA	82,74 €/Ud
Coste total (€) en ICAI + IVA	827,41 €

Tabla 43: Análisis de costes de fundición a la cera perdida (Elaboración propia)

El coste de la elaboración de un solo árbol es de 82,74€/ unidad; con un coste sin operario de 12,74€; lo cual resulta sorprendente teniendo en cuenta la cantidad de variables empleadas en esta fabricación.

El coste de material por modelo es de 7,82€, ello indica que con una futura optimización del proceso con las propuestas sugeridas a lo largo del proyecto se podría reducir el importe. De estos 7,82€, el valor en latón es de 2,26€; esto quiere decir que no solo el latón se puede optimizar, también el revestimiento.

El coste total de la producción de los diez árboles fundidos (sin contar los dos extra que no entran en producción) asciende a 827,41€ teniendo en cuenta el coste del técnico de laboratorio. Al ser un proyecto universitario y no imputar el coste de un técnico, el coste es de 127,4€ que es bastante competitivo. Por otro lado, no es un coste real de lo que sería la producción a baja escala ya que los árboles no se fundieron completamente (llenados incompletos), ni se explotó al 100% la capacidad de los árboles de ser llenados de piezas debido a la baja tasa de éxito.

10.3 Conclusiones de análisis económico

Los procesos de fabricación 3D en el proyecto así como los de fabricación 3D mediante empresas externas son comparables ya que emplean las mismas tecnologías. Si bien un laboratorio de investigación y una empresa de fabricación no tienen la misma estructura interna de costes, y el beneficio por pieza de empresas como Protolabs o imaterialise es muy alto; el empleo de impresoras de última generación refleja una alta capacidad de competencia en la fabricación 3D así como la flexibilidad de obtener precisiones más exigentes de forma particular, sin la necesidad de mediar con un tercero.

Por otro lado, **este análisis de costes de producción 3D no es comparable ni con la producción en serie, ni con la fabricación artesanal.** Son procesos con notables diferencias, en costes, objetivos, producción y aplicaciones. Es por ello que no tiene sentido realizar un análisis de costes comparativo. (Wojciechowski & Wojciechowski, 2022) (Wright, 2023)

Como modelo de negocio, la fabricación en serie de modelos de joyería es repetitiva, con un alto margen de beneficio y con una producción de piezas finales iguales unas con otras. La marca de joyería de fabricación en masa por excelencia, Pandora, es un claro ejemplo de éxito en este método de fabricación.



Imagen 200: Fabricación en serie por cera perdida en colado centrifugado de Pandora (Ben Bridge Jeweler, 2014)

Impresión 3D	Producción en serie	Producción artesanal
<i>Costes</i>		
Es la propuesta más económica para realizar prototipos o tiradas de bajo volumen. No es trasladable a la producción en serie. No genera costes con cada unidad producida.	Alta inversión inicial, pero el coste de producción por pieza disminuye significativamente con el incremento del volumen de producción. Genera beneficios altos.	El coste es variable y depende del método. Delega en la pericia y experiencia de un artesano para obtener unos resultados similares a la impresión 3D.
<i>Proceso de producción</i>		
El proceso de la fabricación aditiva es a pequeña escala; centrado en geometrías imposibles de obtener con métodos tradicionales.	Se emplean cadenas de moldes y líneas de ensamblaje para mejorar la eficiencia de la planta. Está enfocado en producir muchas unidades de un producto a menor coste posible.	Las técnicas de producción artesanal están enfocadas en pequeños grupos de lotes, personalizados y con un costo elevado debido a la mano de obra especializada y la alta inversión en maquinaria.
<i>Flexibilidad</i>		
Amplio abanico de posibilidades de mejora continua, así como de atender a peticiones personalizadas.	Carece de flexibilidad a la hora de realizar alteraciones a moldes y patrones, debido a su enfoque en la repetibilidad.	Permite una cierta adaptabilidad al cliente final, pero es una producción limitante.
<i>Tiempo de producción</i>		
Como se ha comprobado en este proyecto, el tiempo de producción es dilatado, ya que se requiere de una construcción capa a capa.	Extremadamente rápida con producciones de árboles de más de cien piezas.	Tiempos medios o largos, ya que influyen complejidades de forma y proceso.
<i>Materiales</i>		
Compra a proveedor en lotes pequeños, lo cual encarece la producción. La inversión inicial es elevada y es	Compra a proveedor en lotes grandes, así como trato con proveedores cercano. Facilita rebajas por lotes. Se pueden	Compra en lotes medianos, ya que la producción es asumiblemente constante pero de bajo volumen.

complejo prever el beneficio a largo plazo.	permitir el uso de peores materiales sin afectar a la calidad final.	
<i>Enfoque</i>		
Investigación, prototipos, personalización, tiradas bajas.	Producción en masa con una alta demanda de productos idénticos.	Trato con el cliente, abaratamiento con respecto a la I3D con productos únicos. Distinción.
<i>Sostenibilidad</i>		
Implementa optimización topológica y diseño generativo para ahorrar entre un 40% y un 60% más que con fabricación tradicional.	Con la alta producción se genera un alto volumen de residuos químicos y metálicos no reutilizables de alto impacto ambiental.	Debido a la falta de recursos, se intenta reutilizar cualquier resto, ya sea viruta o cera.
<i>Almacenamiento</i>		
Al ser un método de producción “on demand” prácticamente no tienen almacenaje.	Por su alto nivel de producción se necesitan sistemas de almacenaje amplios (terreno, vigilancia, mano de obra...), impactan en su estructura de costes de forma negativa.	Con volúmenes de producción bajos o medios, el almacenaje es una pequeña inversión.

Tabla 44: Tabla análisis de diferentes métodos de producción (Elaboración propia)

11. Exploración sostenible

La fabricación en impresión 3D en SLA y el proceso de fundición a la cera perdida son métodos de producción que generan un **alto contenido en residuos**, ya sea por la resina fotopolimerizada, la cantidad de viruta, metal quemado y escoria, o el revestimiento no reutilizable. A pesar de estas particularidades, sigue siendo un proceso de producción que optimizado, como se puede observar en 10 Análisis económico, y supone una mejora sustancial comparada con un proceso tradicional (que no de producción en serie).

Actualmente las firmas de moda y diseño, así como particulares, están comenzando a explorar este ámbito, como la diseñadora de moda Iris Van Herpen, que produce sus colecciones en PolyJet para poder imprimir con diferentes materiales y lograr texturas diferentes en sus tejidos (*Iris Van Herpen | Ludi Naturae 3D Printed Foliage Dress — 3DFashion Stratasys*, s. f.); o Bobby White con sus colgantes fabricados mediante impresión en FDM y después en cera perdida (*Bobby White Pendants*, s. f.), lo cual resulta en una reducción significativa de contaminantes y un ahorro en materiales y recursos.

Desde un punto de vista económico, un taller de impresión 3D para fabricación de joyas genera altos ingresos respecto a un taller de modelado convencional. Desde un punto de vista medioambiental, el paradigma cambia, ya que se debe tener como objetivo una producción y consumo responsables.

Por otro lado, el mundo de la joyería afronta un **problema ético de gran escala**. La sobreexplotación minera y laboral de los trabajadores en extracción de metales preciosos y gemas provoca que se empiecen a buscar nuevas áreas en las que desarrollar de forma ética su negocio, entre ellas, la joyería 3D.

Los métodos de producción tradicionales daban lugar a altos niveles de excedentes creando así una problemática social y ambiental. Entre otros problemas, las explotaciones de oro tienen un alto nivel de emisiones de gases de efecto invernadero, además es causante del 38% de las emisiones anuales de mercurio, lo que provoca enfermedades crónicas en los mineros de las explotaciones. (EcoAvant.com, 2023). Marcas de joyería, tales como Pandora, han optado por utilizar íntegramente oro

reciclado a partir de 2025; y Chopard tomó este rumbo en 2018. La problemática de no reutilizar oro, y buscarlo en países en vías de desarrollo da pie a violaciones de los derechos humanos, tal y como HRW (Human Rights Watch) divulgó en noviembre de 2020: amputaciones punitivas, amenazas, trabajo infantil... (De Ips, 2020).

Estas son las propuestas para **disminuir el impacto de los tres materiales consumibles** del proyecto:

1. **Revestimiento cerámico.** El revestimiento una vez se ha obtenido la pieza se queda en una cuba de agua fría. Cuando este material se ha depositado al fondo de la cuba, se le puede dar otros usos. Estas son las diferentes propuestas que hay actualmente en funcionamiento:
 - Desarrollo de baldosas cerámicas para pavimentación. Con el revestimiento y los tratamientos térmicos adecuados, este material se puede emplear para fabricar baldosas de vías peatonales. (Recircular, 2023).
 - Desarrollo en decoración de interiores, como molduras y cornisas.
 - Reutilización en proyectos de fundición una vez ha sido tratado y limpiado.
 - Reducción de volumen. Haciendo un cálculo general se puede reducir la cantidad de revestimiento empleada en fundición. Con una aproximación sencilla del volumen del molde se puede reducir el gasto.

2. **La resina fotopolimerizada.** Este material, como ya se ha explicado en capítulos anteriores, no se presta a ser fundido otra vez porque la estructura interna de los polímeros que lo forman es diferente ante la exposición de luz ultravioleta. Es por ello que no se puede reciclar, y las formas de gestionar sus residuos son complejas. Esperablemente, no es un material que se pueda tirar al circuito de desechos urbanos. Las propuestas para disminuir el impacto son las siguientes:
 - Al ser un material termoestable, permite ser triturado y utilizado como relleno aislante. Es un método habitual de reutilización, como en plásticos como el PET o el PVC.
 - Se recomienda que cuando la resina está en fase líquida se filtre todas las veces posibles hasta que no queden residuos. En caso de no poder filtrarse más, se

propone dejarla en un ambiente exterior con luz solar directa durante 10 días para lograr polimerizarla completamente y desechar un bloque de resina. (*FormLabs Customer Support*, s. f.-b)

- Estos materiales han impulsado un campo de investigación para reciclarlos, como por ejemplo el siguiente estudio, enfocado en el reciclaje de resina de poliéster fotopolimerizada para convertirla en polímero funcional utilizando agua subcrítica. (Nakagawa & Goto, 2015).
- Optimización del volumen de resina empleando técnicas de reducción de material como mejora de soportes, reducción de altura de bases, e impresión en lotes. Se sugiere en el apartado 13 Propuestas para trabajos futuros emplearla como relleno de moldes calcinables de piezas sencillas.



Imagen 201: Residuos de resina calcinable (Elaboración propia)

3. **Metal.** El latón puede ser refundido en otras piezas, bloques o lingotes. A lo largo del proyecto los árboles de latón sin anillos se fueron reutilizando para nuevas series de fundición. Esto hace que el metal esté en constante uso y no se malgaste. Tras los vertidos puede haber presencia de escoria, se puede retirar con facilidad y continuar con este proceso cíclico.
- Desde un punto de vista industrial, habitualmente este material no necesita electrorrefinado (limpieza de impurezas), así que abarata su tratamiento y es accesible a la reventa.
 - Para reducir la cantidad de latón desperdiciado se pueden recurrir a técnicas de joyero, como poner una superficie de recogida no porosa mientras se mecaniza (9 Técnicas de acabado) para recoger la viruta y volverla a fundir.

- La escoria del metal se recicla mediante tratamientos químicos o térmicos, se separan los elementos ferromagnéticos y tiene aplicaciones como la producción de cemento, abonado de pastos, o disolvente para la industria siderúrgica. (Machinery, 2024)

12. Conclusiones

En este último capítulo se desarrollan las conclusiones finales tras el análisis y optimización del proceso de diseño y producción de piezas de joyería por fundición a la cera perdida mediante la utilización de tecnologías de impresión 3D.

- Los **parámetros de diseño** y **categorización** de las piezas han sido correctos, permitiendo un control ordenado y sistemático. Esta clasificación ha podido predecir los resultados de las piezas en fundición.
- El proceso de **impresión 3D** es **idóneo para la fabricación de piezas de joyería** de geometría compleja en estereolitografía. A lo largo de las fases de impresión no se encuentran problemas ni retos en la ejecución de esta técnica. Se destaca la precisión con la que se ha llegado a una resolución de 25 μm . Es un campo de investigación con buenos resultados y constante innovación.
- El **proceso de fundición no ha sido el esperado**, con una baja tasa de éxito en las piezas finales. Se ha concluido que este método no es el idóneo para la fabricación de piezas con geometría compleja, ya sea por la falta de herramientas específicas en el laboratorio de fundición, como por la complejidad de las piezas. Se concluye que no son compatibles. Para obtener mejores resultados, la fundición por colada por centrifugación hubiera sido posiblemente la mejor alternativa. Otras ideas de mejora se reflejan en el apartado 7.7.2 Propuestas para abordar el proyecto con éxito.
- A raíz de los resultados se ha hecho un análisis de defectología en el que se ha podido profundizar en los errores de las piezas. Este análisis ha servido para observar que la hipótesis de altos gradientes de temperatura en el vertido y el método de colada es correcta.
- Con un **método de fundición adecuado es posible llegar a la precisión y tolerancia superficial** de los modelos 3D.

Estos han sido los siguientes conocimientos adquiridos a lo largo de la elaboración de este proyecto:

- Conocimiento y experiencia práctica en la impresión por **estereolitografía**. En el proyecto se ha tratado con el posicionamiento y orientación de piezas de impresión de SLA, mantenimiento de la maquinaria, limpieza y postprocesado de piezas fabricadas. Por otro lado cabe resaltar el dominio del software Preform.
- Conocimiento y experiencia práctica en la **fundición a la cera perdida**. Respecto a la fundición, se ha profundizado en temas como las rampas de calentamiento que han sido una de las variables clave del proyecto, así como la temperatura de fusión de los metales o revestimientos. Cabe destacar la experiencia con el empleo de herramientas de fabricación y utillaje como hornos de mufla, fundidoras de microfusión o soldadores.
- Conocimientos sobre **mejora continua**. Ante los retos originados e imprevistos en la evolución del proyecto se han adquirido técnicas de mejora continua que han llevado a una clara detección de los posibles defectos que se han producido a lo largo del trabajo.

13. Propuestas para trabajos futuros

En vista de los resultados obtenidos en este proyecto, se expondrán las recomendaciones sugeridas para trabajos futuros en esta línea de investigación:

- En el ámbito de la impresión 3D se recomienda **seguir explorando el alcance en precisión y complejidad del SLA**, así como de otras tecnologías de impresión como el FDM o el SLS en la medida que se tenga disponibilidad de estas tecnologías. Un estudio interesante sería imprimir en resina calcinable, poliamida calcinable y poliestireno una misma pieza de media complejidad; y observar sus diferencias en resolución (25 - 300 μm)
- La segunda propuesta para impresión 3D de piezas complejas es la investigación en el **ámbito dental**, si bien no se requeriría fundición, sus criterios geométricos, tolerancias, y biocompatibilidad hacen de esta idea un trabajo interesante.
- Respecto a fundición, como se ha desarrollado en el punto 7.7.2 Propuestas para abordar el proyecto con éxito, la propuesta principal es realizar este mismo proyecto desde la simulación mediante un **software de fundición**. Se recomiendan FLOW-3D o Solid-Cast. Se recomienda empezar por árboles de anillos sencillos e ir escalando la complejidad en función del éxito de las simulaciones. Realizando un estudio exhaustivo de **líneas de flujo, velocidad vertido, tiempos de enfriamiento y de métodos de colado** se podría llegar a simular este proyecto y detectar los defectos que han producido y subsanarlos. La ventaja de estos softwares es que permiten simular colados por gravedad, a presión y por centrifugado, lo cual daría pie a investigación con filigranas y pavés.
- Si se tuviere acceso, realizar pruebas de **fundición mediante colado por centrifugación**, ya que es el método más eficaz para obtener piezas de alto nivel en fundición a la cera perdida.
- Una línea de investigación sería la **reutilización de resina fotopolimerizable**. El proceso sería triturarla y mezclarla con cera estándar para hacer modelos calcinables de geometría simple.

- Respecto a las variables del proyecto, explorar la posibilidad de cambiar de materiales, curvas de calentamiento o proporciones de revestimiento cerámico.

Bibliografía

- [1] 3D printer technology: What are the SLA, DLP and LCD? (2024, 2 agosto). ZONGHEGN3D. <https://www.zongheng3d.com/what-are-sla-dlp-and-lcd/>
- [2] *3D Printing Basics*. (2022, 26 abril). Markforged. <https://markforged.com/es/resources/learn/3d-printing-basics>
- [3] 3D printing: What is it & how does it work?, Protolabs Network. (s. f.). *3D printing: What is it & how does it work? | Protolabs Network*. Protolabs Network. <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/#chap>
- [4] 3D Systems (Authorized Resellers Only). (2015). General Guidelines for Casting Jewelry Using Visijet FTX Green & FTX Cast from the ProJet 1200. En *3DSYSTEMS*. 3DSYSTEMS.
- [5] Adlughmin, & Adlughmin. (2021, 16 octubre). *You Can Now See the First Ever 3D Printer — Invented by Chuck Hull — In the National Inventors Hall of Fame*. 3DPrint.com | The Voice Of 3D Printing / Additive Manufacturing. <https://3dprint.com/72171/first-3d-printer-chuck-hull/>
- [6] *ATO Depreciation Rates 2021 • Casting*. (s. f.). <https://www.depreciationrates.net.au/casting>
- [7] Ben Bridge Jeweler. (2014, 25 agosto). *The Making of PANDORA Charm Jewelry* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=rRxD9nxyb1I>
- [8] Binglong, L., Meng, Z., Qunshan, L., Baoqing, Z., Zhuang, M., Tong, Z., Peilai, L., & Lei. (2022, 15 febrero). *Application and Development of Modern 3D Printing Technology in the Field of Orthopedics*. ResearchGate.

-
- https://www.researchgate.net/publication/358642322_Application_and_Development_of_Modern_3D_Printing_Technology_in_the_Field_of_Orthopedics
- [9] Blog Structuralia, S. (s. f.). *La historia de la impresión 3D y cómo está transformando al mundo*. <https://blog.structuralia.com/historia-de-la-impresion-3d>
- [10] *Bobby White Pendants*. (s. f.). Bobby White. <https://bobbywhite.com/en-eu/collections/pendants>
- [11] *Bronce amarillo para microfusion 1kg ALL9*. (s. f.). Metales | Ligas y Metales | Madenjo S.L. <https://madenjo.com/producto-5618-bronce-amarillo-para-microfusion-1kg-all9>
- [12] *Bronze Age – Antique Jewelry University*. (s. f.). <https://www.langantiques.com/university/bronze-age/>
- [13] C. Chelladurai, N.S. Mohan, D. Hariharashayee, & S. Manikandan. (2020). Analyzing the casting defects in small scale casting industry. En *Materials Today Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.382>.
- [14] C, L., & C, L. (2024, 20 febrero). *Thor el primer avión impreso en 3D creado por Airbus*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/thor-3d-airbus-08062016/>
- [15] Carima. (2021, 22 marzo). New Top-down Industrial DLP 3D printer, DM400A. *New Top-down Industrial DLP 3D Printer, DM400A : CARIMA Co., Ltd. Korea's First Photopolymerization 3D Printer Manufacturer*. <https://carima.com/NEWS/?q=YToxOntzOjEyOiJrZXl3b3JkX3R5cGUiO3M6MzoiYWxsIjt9&bmode=view&idx=5601384&t=board>
-

-
- [16] *Castable Wax 40 resin.* (s. f.). Formlabs.
<https://formlabs.com/es/store/materials/castable-wax-40-resin/>
- [17] *Castable Wax and Castable Wax 40: Jewelry Pattern Burnout Process.*
(2022). <https://formlabs.com/store/materials/castable-wax-40-resin/>
- [18] *Castable wax resin.* (s. f.). Formlabs.
<https://formlabs.com/es/store/materials/castable-wax-resin/>
- [19] *Casting silicone rubber Castaldo Blue Super High Strength - 2,27kg.*
(s. f.). PAT - Tools And Machines For The Jewelry Industry. https://pat-tools.com/en_US/p/Casting-silicone-rubber-Castaldo-Blue-Super-High-Strength-2%2C27kg/16008
- [20] Cognodata. (2023, 23 octubre). *12 principios de la metodología agile en el desarrollo de proyectos - Cognodata.* Cognodata.
<https://www.cognodata.com/blog/principios-metodologia-agile-desarrollo-proyectos/>
- [21] *Common Defects in Lost Jewelry Wax Casting / Rough skin (rough casting surface).* (s. f.). <https://yoshidacast.com/7-causes-of-rough-casting-surface-in-lost-wax-casting/>
- [22] *Cómo la impresión 3D está revolucionando la industria de la joyería | Formlabs.* (s. f.). Formlabs. <https://formlabs.com/latam/blog/joyeria-impresion-3d/>
- [23] *Compara las especificaciones técnicas de las impresoras 3D SLA de Formlabs.* (s. f.). Formlabs. <https://formlabs.com/es/3d-printers/resin/tech-specs/>
- [24] *Comparación de tecnologías de impresión 3D: FDM, SLA o SLS.* (s. f.). Formlabs. <https://formlabs.com/es/blog/fdm-sla-sls-como-elegir-tecnologia-impresion-3d-adecuada/>
-

-
- [25] Comprehensive Guide to Types of Casting Defects. (2023, 13 noviembre). *Easiahome*. <https://www.easiahome.com/es/comprehensive-guide-to-types-of-casting-defects/>
- [26] De Ips, C. (2020, 24 noviembre). *Mientras las joyas brillan, aún se violan derechos humanos*. IPS Agencia de Noticias. <https://ipsnoticias.net/2020/11/las-joyas-brillan-aun-se-violan-derechos-humanos/>
- [27] *Earring with Nike driving a two-horse chariot – Works – Museum of Fine Arts, Boston*. (s. f.). <https://collections.mfa.org/objects/155707/earring-with-nike-driving-a-twohorse-chariot?ctx=a479f446-759b-47f3-aa72-695ead7378f7&idx=5>
- [28] Echavarría. (s. f.). *Breve historia del proceso de fundición a la cera perdida*. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/>.
https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/5304/1/EchavarriaAlejandro_2016_historiafundicionceraperdida.pdf
- [29] EcoAvant.com. (2023, 17 febrero). Minería de oro, una de las industrias más destructivas e innecesarias del mundo: acabar con ella. *EcoAvant.com*. https://www.ecoavant.com/contaminacion/mineria-oro-industrias-mas-destructivas-innecesarias-mundo-acabar-con-ella_10526_102.html
- [30] *Fíbula aquiliforme de Alovera - Google Arts & Culture*. (s. f.). Google Arts & Culture. <https://artsandculture.google.com/asset/eagle-brooch-aquiliform-fibulae/bQH8t5BLP5qGNg?hl=es>
- [31] *flesh-hook*. (s. f.). <https://www.britishmuseum.org/>.
https://www.britishmuseum.org/collection/object/H_1856-1222-1
-

-
- [32] FLOW-3D. (2016a, mayo 31). *Centrifugal Casting of a Jewelry Ring Tree* | FLOW-3D CAST [Vídeo]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=hvjz4AUJeQI>
- [33] FLOW-3D. (2016b, junio 9). *Gravity pour ring casting* | FLOW-3D CAST [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=I5k5lmW1gD4>
- [34] FLOW-3D 离心铸造 | Flow Science China. (s. f.).
http://www.flow3d.cn/b_centrifugal_casting.html
- [35] Formlabs. (2017, 28 marzo). *Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing: How Resin 3D Printers Work* [Vídeo]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=8a2xNaAkvLo>
- [36] Formlabs. (2019, 2 abril). *Inside the Form 3 and Form 3L: Deep Dive* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=dLIRAkXa6t8>
- [37] Formlabs. (2022, 4 enero). *Introducing Form 3+ and Form 3B+* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=s94KgsbGmzc>
- [38] *FormLabs Customer support*. (s. f.-a). Formlabs Customer Support.
<https://support.formlabs.com/s/article/Diagnosing-a-print-failure?language=es>
- [39] *FormLabs Customer support*. (s. f.-b). Formlabs Customer Support.
<https://support.formlabs.com/s/article/Disposing-of-resin?language=es#:~:text=Leave%20the%20container%20exposed%20to,and%20container%20as%20household%20waste.>
- [40] *François Willème inventeur ardennais de la photosculture*. (s. f.).
<https://visitardennes.e-monsite.com/pages/les-ardennais-font-l-histoire/francois-willeme.html>
-

-
- [41] Frey, S. (2017, 22 marzo). *Bottom-Up vs Top-Down vs CLIP 3D Printing - The Ortho Cosmos*. The Ortho Cosmos. <https://theorthocosmos.com/bottom-vs-top-vs-clip-3d-printing/#:~:text=Most%20consumer%20SLA%20printers%2C%20and,to%20be%20purchased%20at%20once>.
- [42] *Fundidora microfusión Vacuum R - ComraShop Herramientas joyería*. (s. f.). <https://comrashop.es/fundidoras-vacuum-centrifugas/930-fundidora-microfusion-vacuum-r.html>
- [43] Ganoksin. (2016, 16 diciembre). *Wax Casting Burnout Cycles - Ganoksin Jewelry Making Community*. <https://www.ganoksin.com/article/wax-casting-burnout-cycles/>
- [44] *Gold leaf | Minoan | Early Minoan II–III | The Metropolitan Museum of Art*. (s. f.). The Metropolitan Museum Of Art. <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/252422>
- [45] GoldeneagleJewelrytools. (s. f.). *Metaltech Master Alloys - (1 kg) Brass Casting Grain Spark591*. <https://goldeneaglejewelrytools.com/products/metaltech-master-alloys-spark591-1-kg-1?srltid=AfmBOorpv9ZqO13pqD4B7V4525V1Pc3L1ISDPYlbixE8CuHV9VpdhJED>
- [46] Gómez, C.-. E. M. (s. f.). *Estereoscopio. Museo Virtual de la Ciencia del CSIC*. <https://museovirtual.csic.es/coleccion/rjb/instrumental/rjb22.html#:~:text=Se%2>
-

-
- Oatribuye%20al%20prol%C3%ADfco%20cient%C3%ADfco,la%20visi%C3%B3n%20estereosc%C3%B3pica%20al%20observador.
- [47] *Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing*. (s. f.). Formlabs.
<https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>
- [48] *Headdress | Sumerian | Early Dynastic IIIa | The Metropolitan Museum of Art*. (s. f.). The Metropolitan Museum Of Art.
<https://www.metmuseum.org/art/collection/search/322903>
- [49] *Headdress element -- see 26.8.117a | New Kingdom | The Metropolitan Museum of Art*. (s. f.). The Metropolitan Museum Of Art.
<https://www.metmuseum.org/art/collection/search/548512>
- [50] *History of the Process — Hitchiner Manufacturing*. (s. f.). Hitchiner Manufacturing. <https://www.hitchiner.com/history-of-the-process>
- [51] Hoffmann, D. L., Angelucci, D. E., Bonilla, V. V., Zapata, J., & Zilhão, J. (2018). Symbolic use of marine shells and mineral pigments by Iberian Neandertals 115,000 years ago. *Science Advances*, 4(2).
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aar5255>
- [52] *HOJA INFORMATIVA SOBRE SUBSTANCIAS PELIGROSAS*. (2007). Departamento de Salud y Servicios para personas mayores de New Jersey.
<https://nj.gov/>
- [53] *Horno de fusión - AFI-02,03,05,06,07*. (s. f.). [Vídeo]. Argenta - de Cámara / Resistencia Eléctrica / de Inducción.
<https://www.directindustry.es/prod/argenta/product-205679-2077601.html>
- [54] *How to Choose the Best Jewelry Design CAD Software*. (s. f.). Formlabs.
<https://formlabs.com/asia/blog/jewelry-design-cad-software/>
-

-
- [55] I.Materialise. (s. f.). *Online Gold 3D Printing Service* | i.materialise.
<https://i.materialise.com/en/3d-printing-materials/gold>
- [56] *Impresión 3D para minoristas de joyería y fundiciones.* (s. f.). Formlabs.
<https://formlabs.com/latam/industries/jewelry/>
- [57] Impresoras3d.com. (2021, 28 mayo). *Guía Tipos de resina 3D para imprimir.* impresoras3d.com. <https://www.impresoras3d.com/guia-sobre-tipos-de-resinas-3d-para-imprimir/>
- [58] Impresoras3d.com. (2024, 26 junio). *Breve Historia de la impresión 3D.* impresoras3d.com. <https://www.impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresion-3d/>
- [59] *Iris van Herpen | Ludi Naturae 3D Printed Foliage Dress — 3DFashion Stratasys.* (s. f.). 3DFashion Stratasys. <https://3dprintedart.stratasys.com/videos-2-Stznm/v/iris-van-herpen-ludi-naturae#:~:text=The%20fabric%20of%20the%20Foliage,when%20exposed%20to%20ultraviolet%20light.>
- [60] Jiménez Calzado, M. (s. f.). *Excel de análisis de costes para prototipado.*
- [61] Jimenez Calzado, M., & Álvarez Hernández, R. (s. f.). *FUNDAMENTOS DE FABRICACIÓN GITI TEMA 5: PROCESOS DE CONFORMACIÓN AVANZADOS: FABRICACIÓN ADITIVA (IMPRESIÓN 3D).*
- [62] Jimenez Calzado, M., Soldani, X., & Fraiz Cosano, D. (s. f.). *TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN GITI TEMA 3: FUNDICIÓN CLASIFICACIÓN, PROCESOS, DISEÑO y DEFECTOLOGÍA.*
- [63] Kaia. (2014, 14 julio). *PARTES DE UN ANILLO.*
<https://kaiajoyasuruguay.blogspot.com/2014/07/partes-de-un-anillo.html>
-

-
- [64] Kauppila, I. (2024, 24 junio). *ALL3DP*. <https://all3dp.com/es/1/mejor-servicio-impresion-3d-metal-online/>
- [65] KEYENCE México. (s. f.). *Observación y análisis de la fundición en arena | Industrias automotriz y aeroespacial*.
[https://www.keyence.com.mx/ss/products/microscope/vhx-casestudy/automobile/sand-casting.jsp#:~:text=Un%20llenado%20incompleto%20se%20produce,forma%20incompleta%20del%20producto%20fundido.&text=Se%20producen%20rebabas%20a%20lo,coincidentes%20\(superficies%20de%20separaci%C3%B3n\).](https://www.keyence.com.mx/ss/products/microscope/vhx-casestudy/automobile/sand-casting.jsp#:~:text=Un%20llenado%20incompleto%20se%20produce,forma%20incompleta%20del%20producto%20fundido.&text=Se%20producen%20rebabas%20a%20lo,coincidentes%20(superficies%20de%20separaci%C3%B3n).)
- [66] Kočí, J. (2022, 19 septiembre). *Todo lo que siempre quisiste saber sobre las Resinas e Impresión en SLA segura (pero temías preguntar) - Original Prusa 3D Printers*. Original Prusa 3D Printers. https://blog.prusa3d.com/es/todo-lo-que-siempre-quisiste-saber-sobre-las-resinas-e-impresion-en-sla-segura-pero-temias-preguntar_70758/
- [67] Laboratorios 3d. (2021, 20 agosto). *Binder Jetting o inyección aglutinante: qué es, aplicaciones y ventajas*. Laboratorios 3D.
<https://laboratorios3d.es/blog/binder-jetting-aplicaciones-ventajas/>
- [68] *Los caballos de la Basílica de San Marcos*. (2022, 26 abril).
<https://franciscojaviertostado.com/2022/04/26/los-caballos-de-la-basilica-de-san-marcos/comment-page-1/>
- [69] Machinery, F. (2024, 25 marzo). *Reciclaje de escoria de acero: la solución de procesamiento definitiva*. Maquinaria Foto.
<https://www.ftmmachinery.com/es/blog/steel-slag-recycling-and->
-

-
- processing.html#:~:text=A%20pesar%20del%20gran%20y,relleno%20en%20caliente%20%2C%20fundici%C3%B3n).
- [70] Manufacturing explained: direct metal laser sintering (DMLS), Protolabs Network. (2020, 18 mayo). *Manufacturing explained: direct metal laser sintering (DMLS) | Protolabs Network*. Protolabs Network.
<https://www.hubs.com/blog/direct-metal-laser-sintering/>
- [71] *Máster en Fabricación y Diseño de Joyas | Escuela Artesanía*. (2023, 4 septiembre). Escuela Artesanía. <https://escuelaartesania.com/cursos/fabricacion-y-diseno-de-joyas/>
- [72] Mellado, E. P. (2024, 26 junio). Joyas en Egipto, adorno, lujo y protección. *historia.nationalgeographic.com.es*.
https://historia.nationalgeographic.com.es/a/joyas-antiguos-egipcios-mucho-mas-que-adorno_18321
- [73] Mensley, M. (2020, 4 marzo). *Reseña de Formlabs Form 3: la mejor impresora 3D de resina de 2020*. <https://all3dp.com/1/formlabs-form-3-review-3d-printer-specs/>
- [74] Minev, R., & Minev, E. (2016). TECHNOLOGIES FOR RAPID PROTOTYPING (RP) - BASIC CONCEPTS, QUALITY ISSUES AND MODERN TRENDS. En *ResearchGate*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4917.4002>
- [75] Museum Egypt. (2024, 2 abril). *Falcon Pectoral of Tutankhamun*. Egypt Museum. <https://egypt-museum.com/falcon-pectoral-of-tutankhamun/>
-

-
- [76] Nakagawa, T., & Goto, M. (2015). Recycling thermosetting polyester resin into functional polymer using subcritical water. *Polymer Degradation And Stability*, 115, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.02.005>
- [77] Niello – Antique Jewelry University. (s. f.).
https://www.langantiques.com/university/niello/?srsltid=AfmBOoqLjZUt9La-4hoRxbEWgjPno3VJopY9TxC2xV045COvJHilBBzO#identifier_9_73323
- [78] *No assembly required*. (2024). <https://showme.missouri.edu/2024/no-assembly-required/>
- [79] Norblast. (2022, 14 diciembre). *Línea de impresión 3D: Máquinas de granallado y arenado con impresión 3D | Norblast*.
<https://norblast.it/es/maquinas/3d-printing-line/>
- [80] *OTT.82/18 MICROP - - Alloys and solders - Products*. (s. f.).
<https://www.pandoralloys.com/en/products/alloys-and-solders/ott-82-18-microp.html>
- [81] P, A., & P, A. (2022, 14 noviembre). *The Complete Guide to Stereolithography (SLA) in 3D Printing*. 3Dnatives.
<https://www.3dnatives.com/en/stereolithography-explained100420174/>
- [82] P. Nikesh. (2022, 10 febrero). *Discover everything about lost wax casting | The Bench*. The Bench. <https://www.cooksongold.com/blog/learn/what-is-the-lost-wax-casting-process/>
- [83] *Pandora Alloys*. (s. f.). <https://www.pandoralloys.com/en/>
- [84] *Paquete básico Form 3*. (s. f.). Formlabs.
<https://formlabs.com/es/store/3d-printers/form-3-basic-package-without-service/#/>
-

-
- [85] PMC Supplies. (s. f.). *99.9% Copper casting grain - PER POUND*.
<https://pmcsupplies.com/99-9-copper-casting-grain-per-pound.html>
- [86] *Powders and Resins for 3D Printing*. (s. f.). Formlabs.
<https://formlabs.com/materials/>
- [87] *Productos para impresión 3D e imagen directa | TI.com*. (s. f.).
<https://www.ti.com/es-mx/dlp-chip/3d-printing-direct-imaging/overview.html>
- [88] *¿Qué es el procesamiento digital de luz (DLP)?* (2023, 17 marzo).
Markforged. <https://markforged.com/es/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-digital-light-processing-dlp>
- [89] *Quick Scope QS-L - Máquina de medición visión by MITUTOYO | DirectIndustry*. (s. f.). <https://www.directindustry.es/prod/mitutoyo/product-7785-2424953.html>
- [90] Rama, C. E. (2021, 31 enero). Fundición a la cera perdida (procesos de joyería artesanales). *Candela en rama*. <https://candelaenrama.com/procesos-de-joyeria-fundicion-a-la-cera-perdida/>
- [91] *Ransom & Randolph | ARGENTUM investments*. (s. f.). Ransom-randolph 2022. <https://www.ransom-randolph.com/argentum-investments>
- [92] Rapiddirect. (2022, 9 agosto). *Fundición centrífuga: diferentes tipos de procesos, aplicaciones industriales*. Rapiddirect.
<https://www.rapiddirect.com/es/blog/centrifugal-casting/>
- [93] Rapiddirect. (2024, 28 febrero). *17 tipos de defectos de fundición: comprensión de sus causas y remedios*. Rapiddirect.
<https://www.rapiddirect.com/es/blog/17-types-of-casting-defects/>
-

- [94] Recircular. (2023, 2 noviembre). *Reciclaje de material refractario, abriendo la puerta a la construcción sostenible* | *recircular.net*. *recircular.net*.
<https://recircular.net/blog/reciclaje-de-material-refractario>
- [95] Sadurní, J. M. (2023, 9 marzo). Sutton Hoo, el gran tesoro funerario de la Inglaterra medieval. *historia.nationalgeographic.com.es*.
https://historia.nationalgeographic.com.es/a/sutton-hoo-el-gran-tesoro-funerario-de-la-inglaterra-medieval_16427
- [96] *Satin Cast 20 / KerrCast 2000 Directions For Use*. (s. f.).
kerrcasting.com.
<https://youngjintool.cafe24.com/web/pdf/DFU+SC20+KC2000.pdf>
- [97] *SIERRAS EVEI*. (s. f.). <https://www.evei.biz/>
- [98] *Sinterización selectiva por láser | 3D Systems*. (2023, 10 mayo). 3D Systems. <https://es.3dsystems.com/selective-laser-sintering#:~:text=La%20sinterizaci%C3%B3n%20selectiva,en%20una%20capa%20de%20polvo>.
- [99] *SLA vs. DLP vs. MSLA vs. LCD: Guía de impresoras 3D de resina*. (s. f.). Formlabs. <https://formlabs.com/es/blog/comparacion-impresoras-3d-resina-sla-dlp/>
- [100] Staff, W. (2018, 7 mayo). Pandora Expands Manufacturing in Thailand. WWD. https://wwd.com/accessories-news/jewelry/gallery/pandora-expands-manufacturing-in-thailand-1202666717/pandora-expands-manufacturing-in-thailand-17/?post_type=pmc-gallery&p=1202666717

-
- [101] Systèmes, D. (2022, 7 julio). *FDM - Modelado por deposición fundida*. Dassault Systèmes. <https://www.3ds.com/es/make/service/3d-printing-service/fdm-fused-deposition-modeling>
- [102] *The Complete Guide to Electron Beam Melting (EBM) in 3D Printing*. (2022, 10 junio). 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/en/electron-beam-melting100420174/>
- [103] *The Mask of Agamemnon: An Example of Electroformed Reproduction of Artworks Made by E. Gilliéron in the Early Twentieth Century - The Metropolitan Museum of Art*. (s. f.). <https://www.metmuseum.org/articles/mask-of-agamemnon>
- [104] Tiberto, D., & Klotz, U. E. (2012). *Computer simulation applied to jewellery casting: challenges, results and future possibilities* (33 012008). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- [105] Ultraseal International. (2017, 9 agosto). *¿Qué es la porosidad de las piezas de fundición? | Centro de conocimientos | Ultraseal International*. MEXICO. <https://www.ultraseal-impregnation.com/mx/2017/08/09/porosidad-de-piezas-de-fundicion/>
- [106] *Una guía completa para el proceso de casting de inversión*. (2021, 25 noviembre). Dawang Metals. <https://dawangmetals.com/es/blog/investment-casting-process/>
- [107] *Validación de la isotropía en la impresión 3D por estereolitografía (SLA)*. (s. f.). Formlabs. <https://formlabs.com/es/blog/isotropia-impresion-3D-estereolitografia-sla/>
-

- [108] *Vetulonia, Tomb of the lictor, Fibula - Livius.* (s. f.).
<https://www.livius.org/pictures/italy/vetulonia/vetulonia-tomb-of-the-lictor-fibula/>
- [109] *What is favourable temperature gradient in casting?* (s. f.). Quora.
<https://www.quora.com/What-is-favourable-temperature-gradient-in-casting>
- [110] *What is FDM (fused deposition modeling) 3D printing?*, Protolabs Network. (s. f.). *What is FDM (fused deposition modeling) 3D printing?* | Protolabs Network. Protolabs Network. <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>
- [111] *What is Material Jetting 3D printing?*, Protolabs Network. (s. f.). *What is Material Jetting 3D printing?* | Protolabs Network. Protolabs Network.
<https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>
- [112] *What is SLA printing? The original resin 3D print method*, Protolabs Network. (s. f.). *What is SLA printing? The original resin 3D print method* | Protolabs Network. Protolabs Network. <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>
- [113] *What is SLS 3D printing?*, Protolabs Network. (s. f.). *What is SLS 3D printing?* | Protolabs Network. Protolabs Network.
<https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/>
- [114] *White Paper: Introduction to Desktop Stereolithography.* (2015).
Formlabs.
- [115] *White/yellow smoke and residue when melting brass.* (2023, diciembre).
reddit.com.
-

- https://www.reddit.com/r/metalworking/comments/196qi7a/whiteyellow_smoke_and_residue_when_melting_brass/
- [116] Wojciechowski, P., & Wojciechowski, P. (2022, 1 agosto). 3D Printing vs Traditional Manufacturing: 10 key factors. *Zmorph S.A.*
<https://zmorph3d.com/blog/3d-printing-vs-traditional-manufacturing-10-key-factors/>
- [117] Worx. (2024, 15 agosto). *MakerX 20V Rotary Engraving Tool and Wood/Metal Soldering Iron Combo Kit. Hobby Crafting Tool Kit with Battery, Control Hub and 43pc Accessories* | Worx. <https://eu.worx.com/en/makerx-combo-kit-rotary-tool-wood-metal-crafting-tool-20v-with-hub-battery-charger-43pc-accessories-wx988/>
- [118] Wright, D. (2023, 13 septiembre). 3D Printing vs Traditional manufacturing: Comparison - Generation 3D. *Generation 3D*.
<https://generation3d.ae/3d-printing-vs-traditional-manufacturing-comparison/>
- [119] Yap, Y. L., & Yeong, W. Y. (2014). Additive manufacture of fashion and jewellery products: a mini review. En *Virtual And Physical Prototyping*.
<https://doi.org/10.1080/17452759.2014.938993>
- [120] Yusheng C. S., & Gupta K. (2000). A Web-Based Process/ Material Advisory System. *ASME International Metal Engineering Proceedings*.
- [121] Zapata. (s. f.). *Joyería en el Renacimiento HISTORIA DE LA ORFEBRERÍA, JOYERÍA Y BISUTERÍA. HISTORIA DE LA ORFEBRERÍA, JOYERÍA y BISUTERÍA*. <https://marinazapata.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/04/renacimiento.pdf>
-

[122] Zeal 3D Services. (2024, 15 julio). *On-Demand SLM and DMLS 3d*

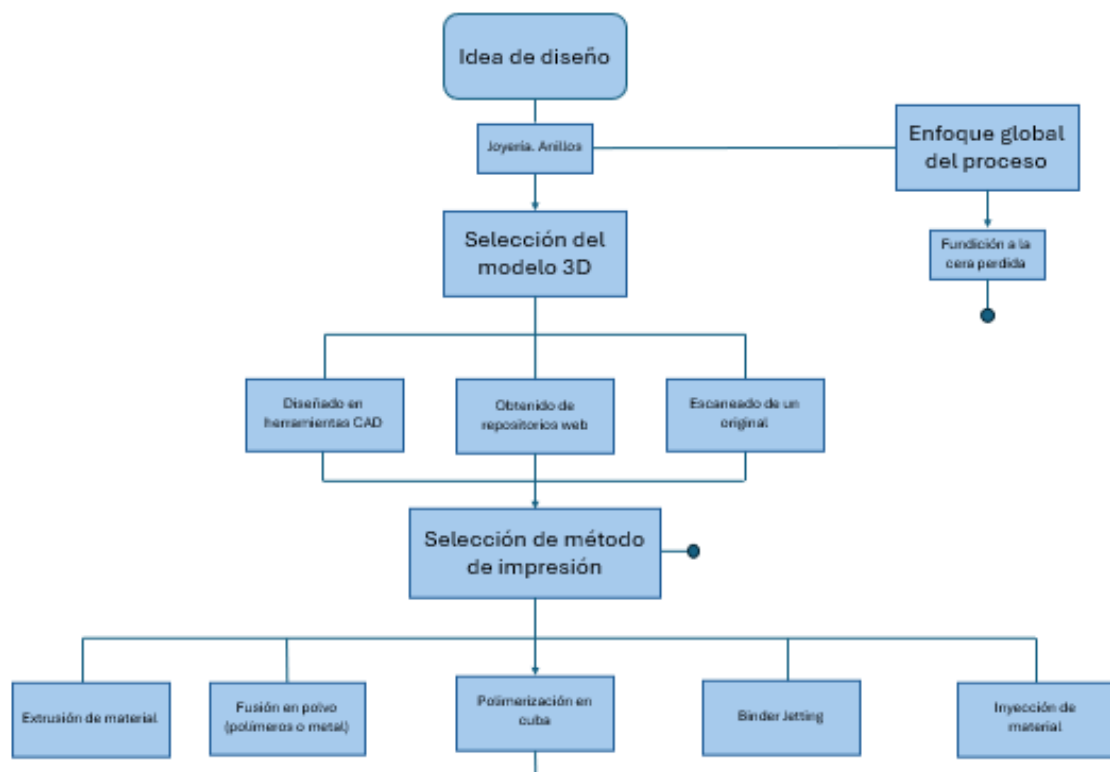
Printing from Zeal 3D Printing. Zeal3D.

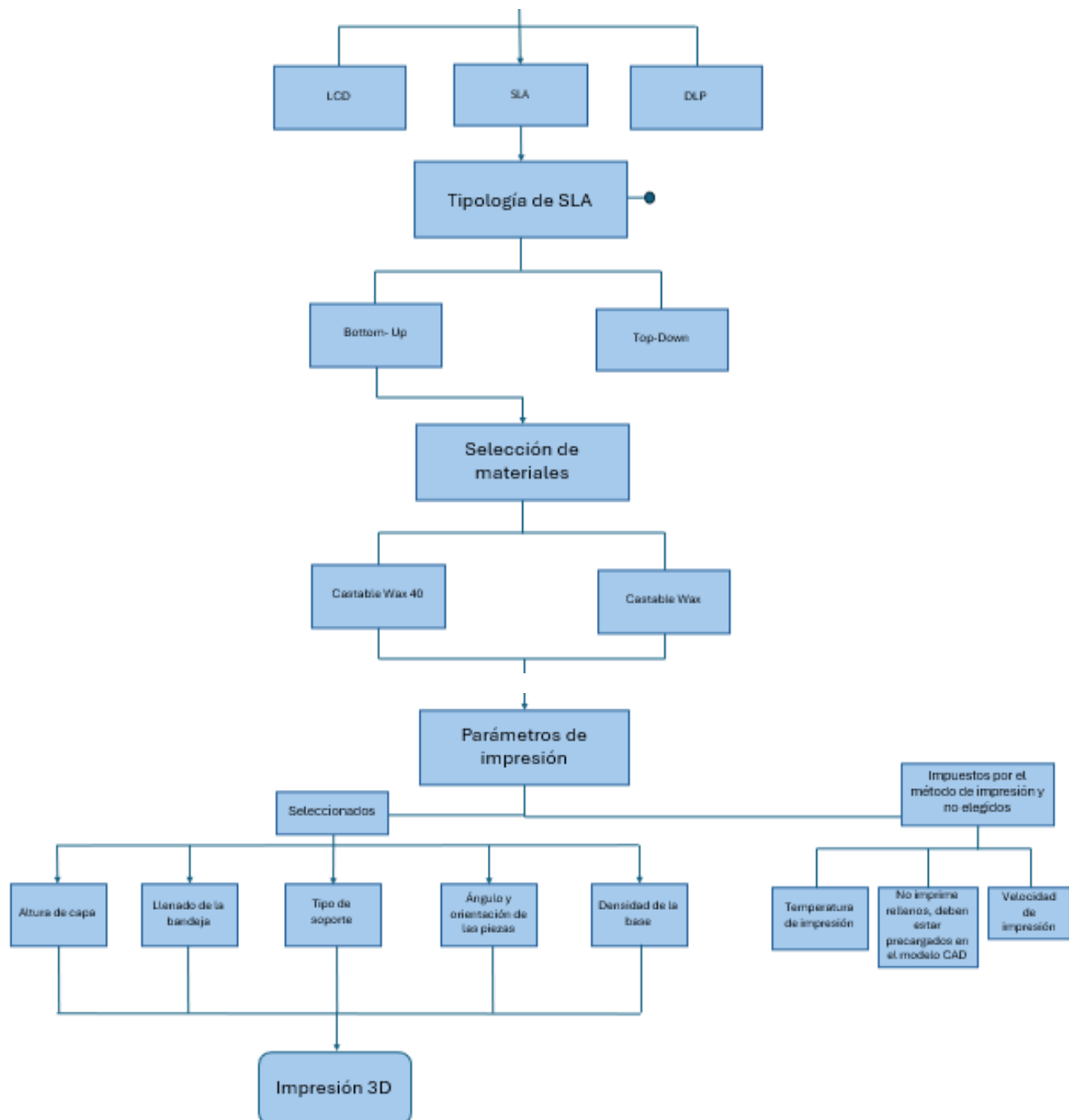
<https://www.zeal3dprinting.com.au/slm-and-dmls-3d-printing/>

ANEXOS

ANEXO 1

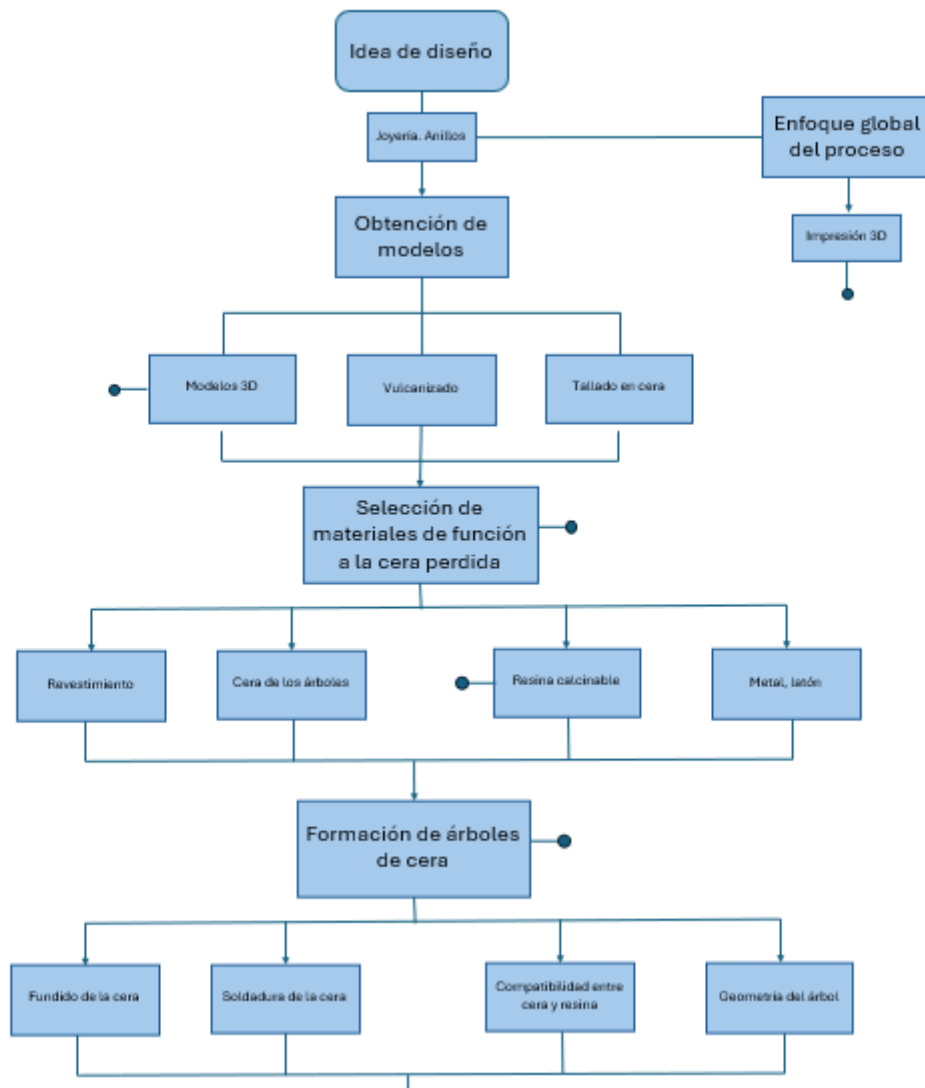
DIAGRAMA DE FABRICACIÓN EN FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA EN EL PROYECTO

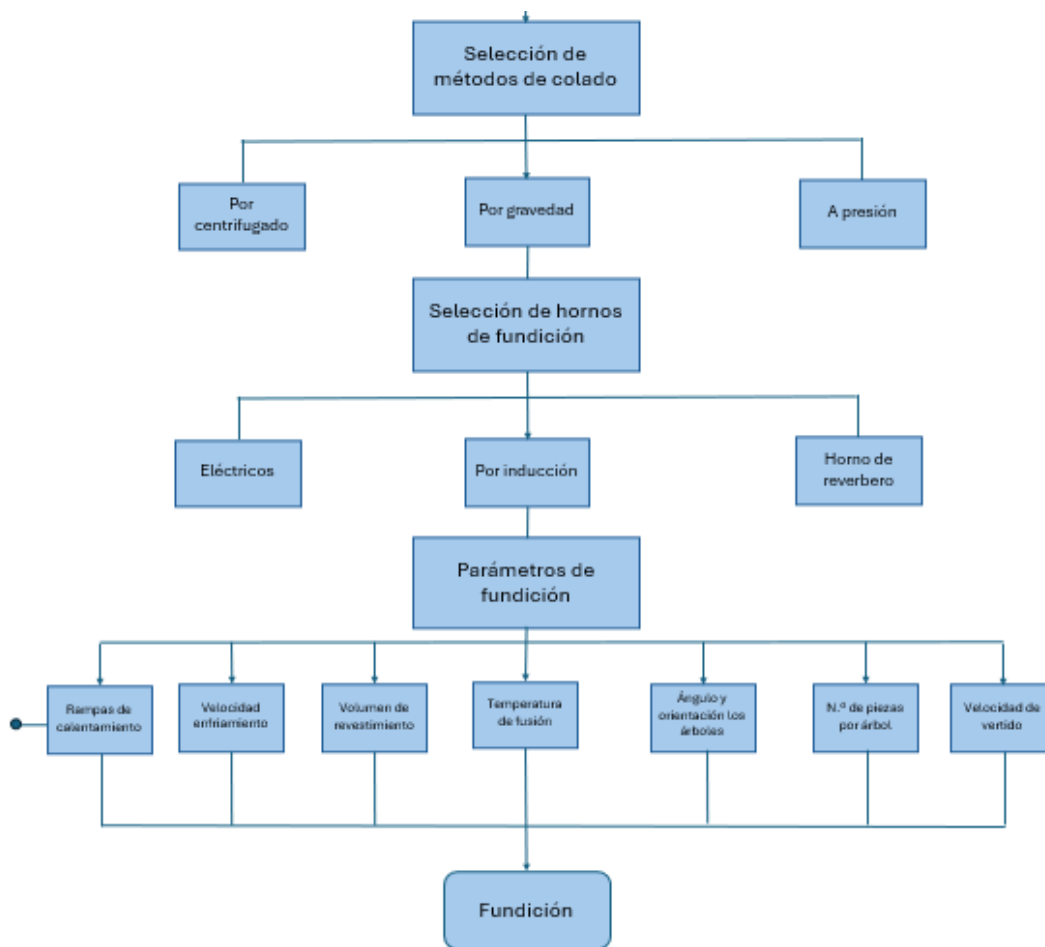




ANEXO 2

DIAGRAMA DE FABRICACIÓN EN FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA EN EL PROYECTO

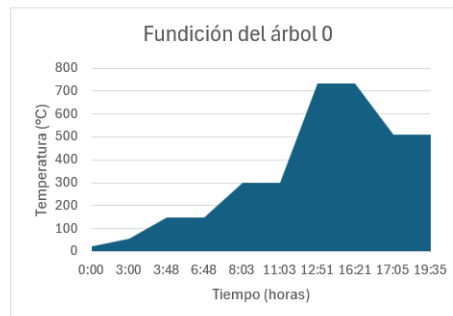




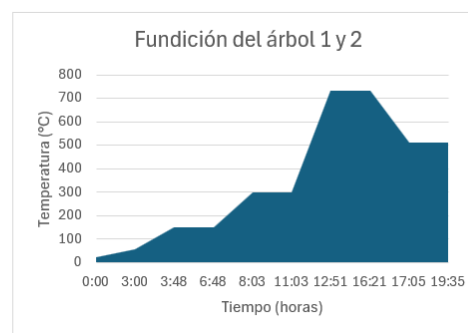
ANEXO 3

RAMPAS DE FUNDICIÓN

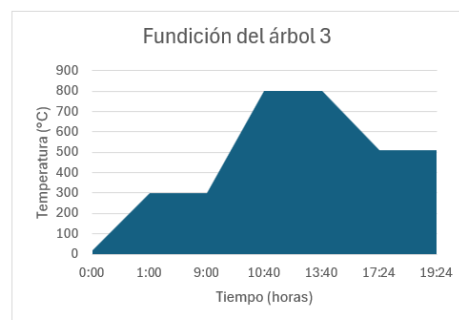
Rampa	Hold	Temperatura	Tiempo acumulado	Temperatura
0:00		21 °	0:00	21 °
3:00	0:00	55 °	3:00	55 °
0:48	3:00	150 °	3:48	150 °
1:15	3:30	300 °	6:48	150 °
1:48	4:00	732 °	8:03	300 °
0:44	2:30	512 °	11:33	300 °
			13:21	732 °
			17:21	732 °
			18:05	512 °
			20:35	512 °



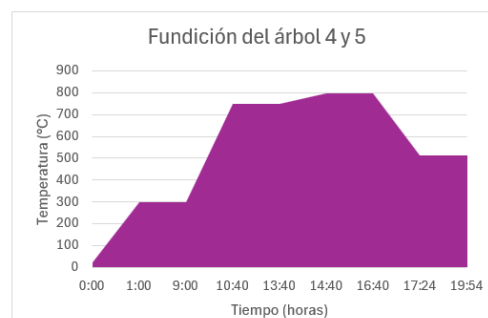
Rampa	Hold	Temperatura	Tiempo acumulado	Temperatura
0:00		21	0:00	21
3:00	0:00	55	3:00	55
0:48	3:00	150	3:48	150
1:15	3:00	300	6:48	150
1:48	3:30	732	8:03	300
0:44	2:30	512	11:03	300
			12:51	732
			16:21	732
			17:05	512
			19:35	512



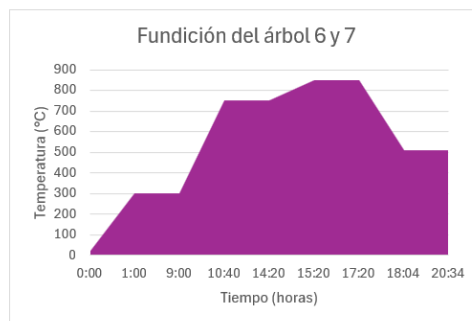
Rampa	Hold	Temperatura	Tiempo acumulado	Temperatura
0:00		21	0:00	21
1:00	8:00	300	1:00	300
1:40	3:00	800	9:00	300
3:44	2:00	800	10:40	800
0:44	2:30	512	13:40	800
			17:24	512
			19:24	512



Rampa	Hold	Temperatura	Tiempo acumulado	Temperatura
0:00		21	0:00	21
1:00	8:00	300	1:00	300
1:40	3:00	750	9:00	300
1:00	2:00	800	10:40	750
0:44	2:30	512	13:40	750
			14:40	800
			16:40	800
			17:24	512
			19:54	512



Rampa	Hold	Temperatura	Tiempo acumulado	Temperatura
0:00		21	0:00	21
1:00	8:00	300	1:00	300
1:40	3:40	750	9:00	300
1:00	2:00	850	10:40	750
0:44	2:30	512	14:20	750
			15:20	850
			17:20	850
			18:04	512
			20:34	512



Rampa	Hold	Temperatura	Tiempo acumulado	Temperatura
0:00		21	0:00	21
1:00	8:00	300	1:00	300
1:40	3:40	750	9:00	300
1:00	2:00	810	10:40	750
0:44	2:30	512	14:20	750
			15:20	810
			17:20	810
			18:04	512
			20:34	512



ANEXO 4

TABLA DE PIEZAS TOTALES

	Soldadas	Fundidas	Calidad
ÁRBOL 0	4	4	1
ÁRBOL 1	5	5	5
ÁRBOL 2	7	5	2
ÁRBOL 3	10	7	0
ÁRBOL 4	8	7	4
ÁRBOL 5	7	5	3
ÁRBOL 6	3	2	1
ÁRBOL 7	6	2	2
ÁRBOL 8	3	3	3
ÁRBOL 9	5	5	2
ÁRBOL EXTRA 1	1	0	0
ÁRBOL EXTRA 2	1	0	0
Total	60	45	23

ANEXO 5

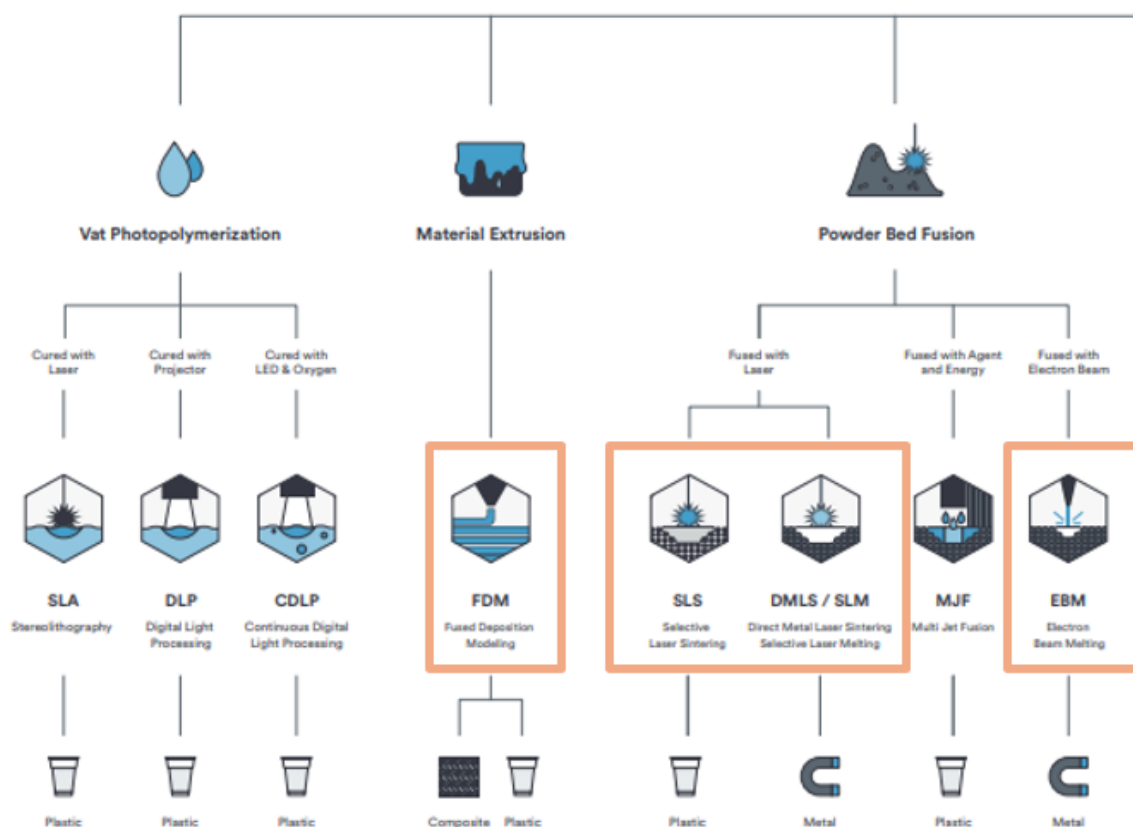
TABLA DE CÁLCULOS DE COSTES POR ANILLO DE LA BANDEJA 7

	Mat Modelo	Mat Soportes	Tiempo	Tiempo op.	Cantidad	Coste unitario
1	0,00311	0,00089	3,08333333	0,08335	1	3,21343077
2	0,00311	0,00089	3,08333333	0,08335	1	3,21343077
3	0,00311	0,00089	3,08333333	0,08335	1	3,21343077
4	0,00311	0,00089	3,08333333	0,08335	1	3,21343077
5	0,0002	0,00049	2,6	0,08335	1	2,87589946
6	0,0002	0,00049	2,6	0,08335	1	2,87589946
7	0,0002	0,00049	2,6	0,08335	1	2,87589946
8	0,00127	0,00073	2,71666667	0,08335	1	3,00940367
9	0,00127	0,00073	2,71666667	0,08335	1	3,00940367
10	0,00127	0,00073	2,71666667	0,08335	1	3,00940367
11	0,00031	0,00087	2,98333333	0,08335	1	3,16550695
12	0,00031	0,00087	2,98333333	0,08335	1	3,16550695
13	0,00122	0,00057	2,85	0,08335	1	3,00439918
14	0,00122	0,00057	2,85	0,08335	1	3,00439918
15	0,0004	0,00041	3,28333333	0,08335	1	3,11814112
16	0,0004	0,00041	3,28333333	0,08335	1	3,11814112
17	0,00106	0,00101	2,58333333	0,08335	1	3,0577289
18	0,00106	0,00101	2,58333333	0,08335	1	3,0577289
19	0,00229	0,00135	3,8	0,08335	1	3,663895
20	0,00229	0,00135	3,8	0,08335	1	3,663895
21	0,00135	0,00067	3,15	0,08335	1	3,15965022
22	0,00135	0,00067	3,15	0,08335	1	3,15965022
23	0,00135	0,00067	3,15	0,08335	1	3,15965022
24	0,00031	0,00036	2,56666667	0,08335	1	2,81568155
25	0,00031	0,00036	2,56666667	0,08335	1	2,81568155
26	0,00138	0,00061	2,71666667	0,08335	1	2,96602867
27	0,00138	0,00061	2,71666667	0,08335	1	2,96602867
28	0,00072	0,00056	2,55	0,08335	1	2,88157539
29	0,00072	0,00056	2,55	0,08335	1	2,88157539

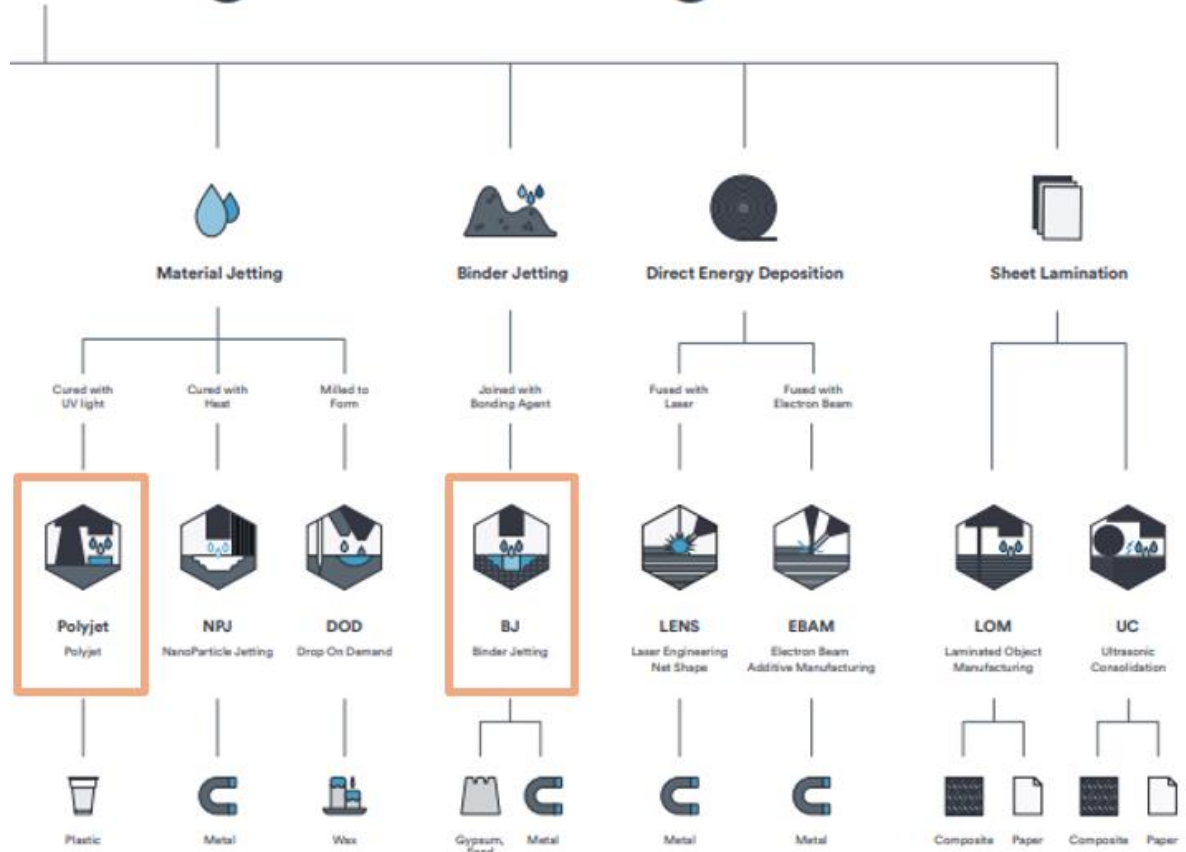
ANEXO 6

TIPOS DE IMPRESIÓN 3D CON LAS COMENTADAS SUBRAYADAS

Additive Manufac



Manufacturing Technologies



ANEXO 7

HOJA DE CARACTERÍSTICAS DE LA CASTABLE WAX 40

DATOS DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL

Castable Wax 40 Resin

	MÉTRICO ¹	IMPERIAL ¹	MÉTODO
	No poscurada ²	No poscurada ²	
Propiedades de quemado			
Temperatura al 5 % de pérdida de masa	249 °C	480 °F	ASTM E 1131
Contenido en cenizas (TGA)	0,0 - 0,1 %	0,0 - 0,1 %	ASTM E 1131

¹ Las propiedades pueden variar en función de la geometría de la pieza, la orientación y ajustes de impresión y la temperatura.

² Los datos se han obtenido a partir de piezas sin poscurar impresas con la Form 3 a 50 micras y con ajustes para la Castable Wax 40 Resin, sin tratamiento adicional.

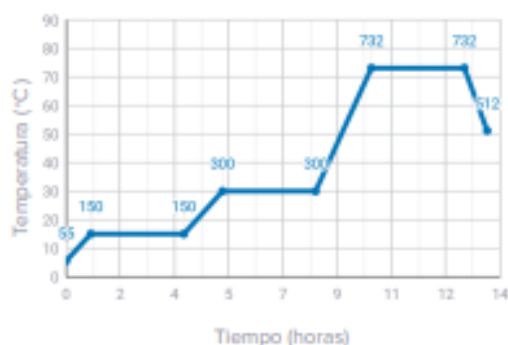
PROGRAMA DE QUEMADO PARA LA CASTABLE WAX 40 RESIN 2021

El siguiente programa de quemado se ha diseñado para ayudar a reducir la expansión térmica de la resina dentro del molde, al mismo tiempo que asegura un quemado completo para las piezas de joyería gruesas. Formlabs recomienda el revestimiento en polvo Certus Prestige Optima™.

Usa este programa como punto de partida y realiza los ajustes necesarios.

Descubre cómo ajustar el quemado y la preparación del revestimiento para obtener un rendimiento óptimo en la [página de asistencia](#).

		FASE	TIEMPO	PROGRAMA °C	PROGRAMA °F
A	Transición térmica El bebedero de cera se derite y aumenta el flujo de aire en el patrón de resina. La cera en la resina acaba en el revestimiento. El quemado comienza con suavidad, descomponiendo el patrón sin una expansión violenta.	Mantenimiento	180 minutos	55 °C	131 °F
		Rampa	48 minutos	2 °C/min	3,6 °F/min
		Mantenimiento	180 minutos	150 °C	302 °F
		Rampa	75 minutos	2,0 °C/min	3,6 °F/min
B	Quemado Elimina la resina y la ceniza restantes en el revestimiento para fundición.	Mantenimiento	180 minutos	300 °C	572 °F/min
		Rampa	108 minutos	4,0 °C/min	7,2 °F/min
C	Temperatura de fundición Entra las cajas de moldeo hasta la temperatura de fundición del metal seleccionado.	Mantenimiento	180 minutos	732 °C	1350 °F
		Rampa	44 minutos	-5 °C/min	-9 °F/min
		Ventana de fundición	Hasta 2 horas	Temperatura de fundición deseada	Temperatura de fundición deseada



Información de lavado:

Lava las piezas impresas con la Castable Wax 40 Resin en alcohol isopropílico durante 5 minutos. Enjuáguelas durante 5 minutos en otro baño de alcohol isopropílico limpio para eliminar cualquier resto de material sin curar. Seca completamente las piezas con aire comprimido. No uses éter monometílico de tripropilglicol para lavarlas.

Información de poscurado:

Las piezas voluminosas de Castable Wax 40 Resin no requieren poscurado, pero puede aumentar su resistencia a la manipulación, si se desea. Cura las piezas hasta un máximo de 30 minutos sin calor.

ANEXO 8

HOJA DE CARACTERÍSTICAS DE LA CASTABLE WAX

DATOS DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL

Castable Wax Resin

	MÉTRICO ¹	IMPERIAL ¹	MÉTODO
	No poscurada ²	No poscurada ²	
Propiedades de tracción			
Resistencia a la rotura por tracción	12 MPa	1680 psi	ASTM D 638-10
Módulo de tracción	220 MPa	32 ksi	ASTM D 638-10
Alargamiento de rotura	13 %	13 %	ASTM D 638-10
Propiedades de quemado			
Resistencia a la flexión	249 °C	480 °C	ASTM E 1131
Módulo de flexión	0,0 - 0,1 %	0,0 - 0,1 %	ASTM E 1131

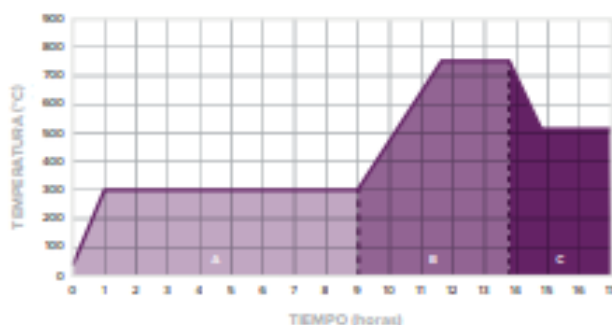
¹ Las propiedades pueden variar en función de la geometría de la pieza, la orientación y ajustes de impresión y la temperatura.

² Datos obtenidos de piezas impresas con la Form 2, y con ajustes de 50 µm para obtener detalles precisos con Castable Resin, lavada sin poscurado.

QUEMADO ESTÁNDAR

El programa de quemado estándar está diseñado para ofrecer la mayor resistencia de revestimiento posible y completar el quemado de los detalles más finos usando Certus Prestige Óptima u otros materiales de revestimiento similares. Usa este programa como punto de partida y realiza los ajustes necesarios.

	FASE	TIEMPO	PROGRAMA °C	PROGRAMA °F
A	Insertión de las cajas de moldeo	0 min	21 °C	70 °F
	Rampa	60 min	4,7 °C / min	8,4 °F / min
	Mantenimiento	480 min	300 °C	572 °F
B	Rampa	100 min	4,5 °C / min	8,1 °F / min
	Mantenimiento	180 min	750 °C	1382 °F
C	Rampa	60 min	-4,0 °C / min	-7,1 °F / min
	Ventana de fundición	Hasta 2 horas	512 °C (o la temperatura de fundición deseada)	954 °F (o la temperatura de fundición deseada)



Información de poscurado:

No requiere poscurado.

ANEXO 9

HOJA DE CARACTERÍSTICAS DE REVESTIMIENTO RANSOM & RANDOLPH ARGENTUM INVESTMENT

ARGENTUM™ INVESTMENT



An Economical Alternative for Casting Silver, Brass, and Bronze

ARGENTUM investment provides jewelry casters with an economical investment that reduces excess metal and watermarking defects for dependable casting results and maximum profits.

Available from Europe.

Typical Material Properties*

Water/Powder Ratio	Water Temperature	Working Time	Setting Time	Slump
38 parts water to 100 parts powder by weight	72-73°F (22-23°C)	11-11.5 minutes	<22 minutes	111-117mm

*These results are based on the testing methods, frequency and procedures of Ransom & Randolph or its approved suppliers. The levels referenced herein are only for general guidance and do not constitute a firm specification.

Application Instructions

1. Weigh the required amount of ARGENTUM investment. To determine the proper amount of water and powder to use per flask, use the online flask calculator located at www.ransom-randolph.com or calculate the volume of your flask ($V = \pi r^2 h$) and multiply by the appropriate factor in the chart below.

	W:P 38/100		W:P 39/100		W:P 40/100		W:P 41/100		W:P 42/100	
	Per In³ volume	Per cm³ volume	Per In³ volume	Per cm³ volume	Per In³ volume	Per cm³ volume	Per In³ volume	Per cm³ volume	Per In³ volume	Per cm³ volume
Investment Needed										
Grams	21.0	1.28	20.7	1.26	20.4	1.25	20.1	1.23	19.8	1.21
Pounds	0.05		0.05		0.04		0.04		0.04	
Ounces (Weight)	0.74		0.73		0.72		0.71		0.70	
Water Needed										
Grams	8.00	0.49	8.10	0.49	8.20	0.50	8.20	0.50	8.30	0.51
Pounds	0.02		0.02		0.02		0.02		0.02	
Fluid Ounces	0.28		0.29		0.29		0.29		0.29	

2. Measure or weigh the required amount of water (1 g = 1 ml, 1 fluid oz = 29.6 ml) and place in mixing bowl.
Note: Changes in temperature affect working time, to reduce variations, water and powder temperatures should be held to 72-75°F (22-24°C). Working time is defined as the time the powder is added to the water to the time the investment becomes thick.
Note: Deionized water is recommended to maintain consistency of the working time.
3. Always add the preweighed quantity of investment to water. Adding the water to the powder will make it difficult to mix and will affect the working time.
4. Wet out the powder with a mixing paddle or a wire whip. This should take no more than 30 seconds.
Note: If using a vacuum investment mixing unit, mix with no vacuum on slow speed until the powder is completely wetted (approximately 1 minute).

ARGENTUM™ INVESTMENT

5. Mix with mechanical mixer for 3 minutes. Good mixing is important to activate essential ingredients that make the investment perform to its fullest potential.
Note: If using a vacuum investment mixing unit, start vacuum, increase mixing speed and mix for an additional 3 minutes.
6. Place the mixed investment in a vacuum chamber and apply enough vacuum to cause a rapid boil. The investment should be vacuumed until it rises and breaks. Do not exceed 2 minutes. If a longer time is required, the vacuum pump may be undersized, there may be an air leak or the vacuum system may be in need of repair.
7. Pour the vacuumed investment into and down the side of the flask. Avoid pouring it directly over the patterns to prevent wax pattern breakage. Fill flask at least 1" (2.54 cm) over pattern.
Note: If using a vacuum investment mixing unit, pour the investment down along the inside of the flask allowing it to flow up, around, through and over the top row of patterns.
8. Vacuum the invested flask about 1½ minutes. Vibrating or tapping the flask during this operation will assist in releasing air bubbles from the pattern/investment interface. Release vacuum and fill the flask to the top of the metal edge. Do not overfill.
Note: If using a vacuum investment mixing unit, after flasks are filled, continue to vacuum for 1½ to 2 minutes. Vibration may be applied, if available.
9. Immediately transfer the invested flask to a vibration free storage area. It is extremely important not to disturb the flask during the gloss-off phase as well as during the initial hardening process.
10. To achieve appropriate green strength, allow the investment to sit undisturbed (bench cure) for 2-6 hours.
Note: If bench cure will exceed 6 hours, maintain moisture by rewetting, covering with a wet cloth and sealing in a plastic bag. This will reduce potential cracking of molds due to uneven drying.
11. After bench curing for 2-6 hours, remove the sprue base and investing collar.
12. Ideally, flasks should be loaded into a burnout oven, preheated to 300°F (150°C), button side down. Flasks should be elevated at least 1" (2.54 cm) above oven floor to allow proper air circulation and wax drainage. Do not place flasks too close to the heat source or to each other.
Note: If loading into a cold oven, 300°F (150°C) temperature must be reached as fast as possible.
13. If steam dewax is used, transfer the flasks immediately from dewax into an oven preheated to 300°F (150°C). Do not allow flasks to stand at room temperature for more than 10 minutes.
14. Follow the wax burnout schedule suitable for your application.
Note: Wax burnout schedules described are recommendations. Adjustments may be required for various furnace types, flask sizes and oven loading.

Wax Burnout Schedule				
		Flask size: up to 3" x 3" (7.6 cm x 7.6 cm)	Flask size: up to 4" x 6" (10.2 cm x 15.2 cm)	Flask size: up to 4" x 8" (10.2 cm x 20.3 cm)
Water Removal	Ambient to 300°F (150°C) as fast as possible (can be preheated)	Hold 1 hour	Hold 3 hours	Hold 3 hours
Thermal Transition	Raise to 700°F (370°C)	Raise over 1 hour Hold 1 hour	Raise over 2 hours Hold 2 hours	Raise over 2 hours Hold 2 hours
Pattern Removal	Raise to 1350°F (730°C)	Raise over 2 hours Hold 2 hours	Raise over 2 hours Hold 2 hours	Raise over 3 hours Hold 3 hours
	Reduce to casting temperature and allow for stabilization	Hold 1 hour	Hold 2 hours	Hold 2 hours

Note: Refer to the mold casting temperatures recommended by your alloy supplier.

ANEXO 9

HOJA DE CARACTERÍSTICAS DE REVESTIMIENTO SATIN CAST 20

Investment Recommended Water / Powder Ratios



To determine the number of pounds of investment needed to fill any particular flask, divide the cubic inch content of the flask by 20.
(1 lb = 454 grams).

To determine flask content in cubic inches:

Round Flask:
 $0.7854 \times \text{dia.}^2 \times \text{height}$

Square Flask:
 $\text{width} \times \text{length} \times \text{height}$

Heavy Castings

Heavy Ladies Rings,
Men's Rings & School Rings
38 ml water to 100 g powder

Regular Castings

Ladies Rings, Pendants,
Filigree & Intricate Wax Patterns
40 ml water to 100 g powder

Weight / lbs.	grams	Water av. oz.	ml	Yields cubic inch	Yields cubic cent.	Water av. oz.	ml	Yields cubic inch	Yields cubic cent.
1/2	227	3.0	86	10.5	174	3.2	91	11	179
1	454	6.1	172	21	349	6.4	182	22	359
5	2268	31	862	107	1745	32	908	110	1794
10	4535	61	1724	213	3490	64	1816	219	3589
15	6803	92	2586	320	5235	96	2724	329	5383
20	9070	122	3448	426	6980	128	3632	438	7178
25	11338	153	4310	533	8725	160	4540	548	8972

Investment Powder & Water Requirements for Flask Sizes

Top Figure - Investment Powder (oz), Bottom Figure - Water (ml)

Regular Castings

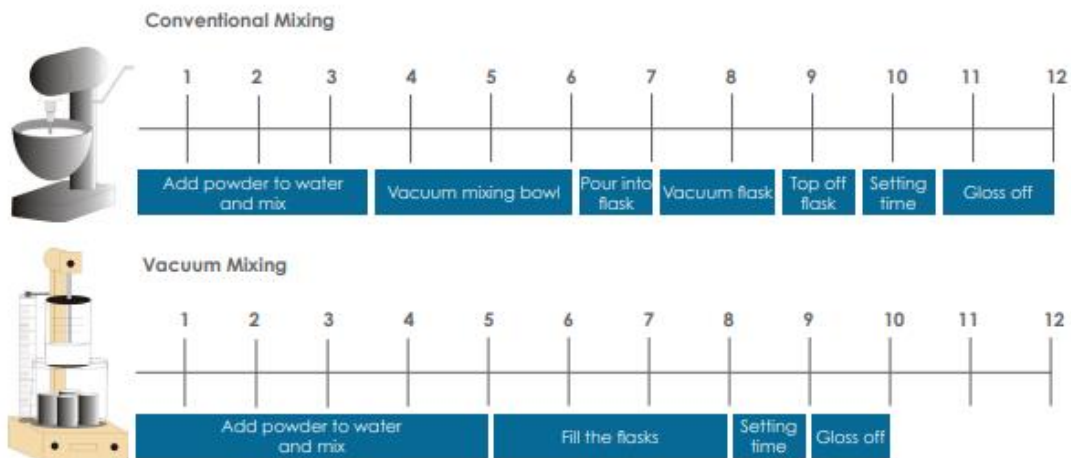
Ladies Rings, Pendants,
Filigree & Intricate Wax Patterns
40 ml water to 100 g powder

Heavy Castings

Heavy Ladies Rings,
Men's Rings & School Rings
38 ml water to 100 g powder

Flask Diameter	Height 2"	2.5"	3"	3.5"	4"	5"	6"	2"	2.5"	3"	3.5"	4"	5"	6"
2"	5 oz 57 ml	6 oz 68 ml	7.5 oz 85 ml	9 oz 102 ml	10 oz 114 ml			5 oz 53.9 ml	6 oz 64.6 ml	7.5 oz 80.8 ml	9 oz 97 ml	10 oz 107.8 ml		
2.5"	8 oz 91 ml	10 oz 114 ml	12 oz 136 ml	14 oz 160 ml	16 oz 183 ml	20 oz 228 ml		8 oz 86.2 ml	10 oz 107.8 ml	12 oz 129 ml	14 oz 150.9 ml	16 oz 172.5 ml	20 oz 215.6 ml	
3"	12 oz 136 ml	15 oz 170 ml	18 oz 205 ml	21 oz 240 ml	1.5 lb 274 ml	30 oz 340 ml	32 oz 410 ml	12 oz 129.3 ml	15 oz 161.7 ml	18 oz 194 ml	21 oz 226.4 ml	1.5 lb 258 ml	30 oz 323 ml	32 oz 345 ml
3.5"	1 lb 182 ml	1.25 lb 228 ml	1.5 lb 274 ml	1.75 lb 320 ml	2 lb 364 ml	2.5 lb 456 ml	3 lb 548 ml	1 lb 172 ml	1.25 lb 215 ml	1.5 lb 258 ml	1.75 lb 301 ml	2 lb 344 ml	2.5 lb 430 ml	3 lb 516 ml
4"	18 oz 205 ml	23 oz 262 ml	27 oz 308 ml	2 lb 364 ml	2.25 lb 410 ml	3 lb 546 ml	3.5 lb 637 ml	18 oz 194 ml	23 oz 247.9 ml	27 oz 291 ml	2 lb 344 ml	2.25 lb 387 ml	3 lb 516 ml	3.5 lb 602 ml
5"					3.75 lb 682 ml	4.75 lb 864 ml	5.5 lb 1000 ml					3.75 lb 645 ml	4.75 lb 817 ml	5.5 lb 946 ml

Recommended Work Time - In Minutes



Work Time: Work time is the time that has elapsed between adding the powder to the water, and when the investment thickens.

Water Temperature: Water should be 70°F / 21°C to 75°F / 24°C. Colder water extends work time, warmer water shortens work time.

Recommended Burnout Cycles

Casting Temperatures

Ladies Rings,
filigree or intricate designs
900° - 1000°F (482° - 538°C)

Gents Rings,
heavier designs
700° - 900°F (371° - 482°C)

During the last 1 to 2 hours of burnout,
the temperature must be adjusted
so that the flasks are at correct
temperature for casting.

