



**Universidad  
Europea**

**UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID**

**FACULTAD DE DISEÑO Y TECNOLOGÍAS CREATIVAS**

**GRADO EN ANIMACIÓN**

**PROYECTO FIN DE GRADO**

**Análisis y Métodos de Modelado 3D para Figuras  
Coleccionables en Formato Miniatura**

**HERNÁN ALONSO DÍAZ**

**Dirigido por**

**Dra. M.<sup>a</sup> Teresa Barranco Crespo**

**CURSO 2024-2025**

**TÍTULO:** ANÁLISIS Y MÉTODOS DE MODELADO 3D PARA FIGURAS COLECCIONABLES EN  
FORMATO MINIATURA

**AUTOR:** HERNÁN ALONSO DÍAZ

**TITULACIÓN:** GRADO EN ANIMACIÓN

**DIRECTOR/ES DEL PROYECTO:** DRA. M.<sup>a</sup> TERESA BARRANCO CRESPO

**FECHA:** JULIO de 2025

## RESUMEN

Este proyecto se centra en el diseño y desarrollo de un paquete temático de miniaturas destinado a su fabricación física, tanto mediante impresión 3D en resina (SLA) como por inyección en molde. El enfoque ha sido abordar todo desde la perspectiva del modelador, sin adentrarse en aspectos más técnicos como el diseño del molde o procesos de ingeniería. Para las piezas concebidas para impresión se ha realizado la orientación, el vaciado interno y la preparación de soportes, mientras que una de las miniaturas se ha trabajado específicamente para inyección, considerando el eje de desmoldeo y seccionando las partes donde ha resultado necesario. A lo largo del proyecto se ha comparado cómo varía el proceso según la tecnología y qué implicaciones conlleva esto a nivel de modelado. Asimismo, se han aplicado los principios visuales que permiten que las miniaturas funcionen en escala heroica y puedan ser pintadas, como la exageración de proporciones, la separación nítida entre superficies pintables o el empleo de mechones para representar el cabello. El objetivo final es proporcionar una guía práctica y provechosa, sobre todo para modeladores que necesiten adaptar su trabajo a estas modalidades de producción sin adentrarse en ámbitos que no les competen directamente.

**Palabras clave:** *miniaturas, modelado, impresión 3D, inyección, diseño de piezas, wargames.*

## ABSTRACT

This project focuses on the design and development of a thematic set of miniatures intended for physical manufacturing, both through resin 3D printing (SLA) and mold injection. This approach addresses everything from the modeler's perspective, without delving into more technical aspects such as mold design or engineering processes. For the pieces conceived for printing, orientation, internal hollowing, and support preparation have been carried out, while one of the miniatures was specifically developed for injection, taking into account the parting line and segmenting areas where necessary. Throughout the project, a comparison has been made of how the process varies depending on the technology and what implications this entails at the modeling level. Additionally, visual principles have been applied to ensure that the miniatures work well at heroic scale and can be painted effectively, such as the exaggeration of proportions, clear separation between paintable surfaces, or the use of locks to represent hair. The ultimate goal is to provide a practical and valuable guide, especially for modelers who need to adapt their work to these forms of production without venturing into fields that do not directly concern them.

**Keywords:** *miniatures, 3D modelling, 3D printing, mold injection, part design, wargames.*

## **Dedicatoria**

A mis padres por llevarme de pequeño al quiosco, lugar donde encontré una revista con un diseño llamativo que captó mi atención: mi primer número de “White Dwarf” (Warhammer, Games Workshop). Aquí nació en mí un amor por pintar cosas, particularmente miniaturas.

A mis profesores del colegio por hacer la vista gorda en clase a pesar de ser plenamente conscientes de lo que estaba haciendo en realidad, dibujar; y a mis padres por llevarme a clases de pintura.

A mi amigo David Prieto dejarme invadir su casa a diario para hacer las largas pruebas de impresión y por formarme en los procesos de limpieza y curado.

## TABLA RESUMEN

	<b>DATOS</b>
<b>Nombre y apellidos:</b>	Hernán Alonso Díaz
<b>Título del proyecto:</b>	Análisis y métodos de modelado 3D para figuras coleccionables en formato miniatura
<b>Directores del proyecto:</b>	M. <sup>a</sup> Teresa Barranco Crespo
<b>El proyecto se ha realizado en colaboración de una empresa o a petición de una empresa:</b>	NO
<b>El proyecto ha implementado un producto:</b> (esta entrada se puede marcar junto a la siguiente)	SÍ
<b>El proyecto ha consistido en el desarrollo de una investigación o innovación:</b> (esta entrada se puede marcar junto a la anterior)	NO
<b>Objetivo general del proyecto:</b>	Estudiar las técnicas óptimas para esculpir miniaturas de cara a su posterior impresión y/o moldeo por inyección.

## Índice

<b>RESUMEN</b>	<b>3</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>4</b>
<b>TABLA RESUMEN</b>	<b>6</b>
<b>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
1.1 Contexto y justificación	9
1.2 Planteamiento del problema	9
1.3 Objetivos del proyecto	10
1.3.1 Objetivo General	10
1.3.2 Objetivos Específicos	10
<b>Capítulo 2. ANTECEDENTES</b>	<b>12</b>
2.1 Contexto	12
2.2 Referentes	12
2.3 Marco Conceptual	14
2.3.1 Métodos para la concepción física de un modelo 3D	15
2.3.1.1 Impresión 3D	15
Métodos Principales	16
Métodos Menos Utilizados	16
2.3.1.2 Moldeo por Inyección	19
Materiales Empleados en Inyección para Miniaturas	20
2.3.2 Escultura y Modelado Digital	20
2.3.2.1 Modelado para Impresión 3D	21
2.3.2.2 Modelado para Inyección en Moldes	22
2.3.3. Técnicas de escultura para miniaturas: Diferencias frente al 3D orientado a animación y videojuegos	23
2.3.3.1 Carga Poligonal	23
2.3.3.2 Triángulos o Quads	24
2.3.3.3 Topología	25
2.3.3.4 Simetría y Posado	26
2.3.4 Escultura digital para figuras de wargames	27
2.3.4.1 Consideraciones Artísticas	27
2.3.4.2 Consideraciones Técnicas en Casos Prácticos	28
2.3.4.2.1 Impresión 3D	28
2.3.4.2.2 Inyección en Moldes	31
<b>Capítulo 3. DESARROLLO DEL PROYECTO</b>	<b>33</b>

3.1 Planificación del proyecto	33
3.2 Descripción de la solución, metodologías y herramientas empleadas	34
3.2.1 Concepts y Diseños Iniciales	34
3.2.2 Modelado Inicial: Silueta y Mallas Base	34
3.2.3 Posado: Rompiendo la Simetría	39
3.2.4 Ropa y partes duras en ZBrush: Extracts	40
3.2.5 Hard Surface: Blender	42
3.2.6 Establecer Ejes de Desmoldeo: Diseño para Inyección	43
3.2.7 Pintabilidad y Proporciones: Diseño para Pintado a Mano	44
3.2.8 Esculpido de Detalles: Uso de Alphas y Modelado en High	46
3.2.9 Preparación para Impresión 3D	48
3.2.9.1 Corrección de malla	48
3.2.9.2 Seccionamiento	50
3.2.9.2 Vaciado y análisis de viabilidad	50
3.2.9.3 Procesos en el Slicer	53
3.2.10 Preparación para Moldeo por Inyección	57
3.2.10.1 Aplicación de ejes de desmoldeo	57
3.2.10.2 Seccionamiento	59
3.2.11 Materialización en físico	61
3.2.12 Comercialización: Portales de Venta Online y Posicionamiento de Producto	63
3.3 Recursos requeridos	64
3.4 Viabilidad e implementación	65
3.5 Resultados del proyecto y análisis	66
3.5.1. Concept Art	71
3.5.2. Modelado General	72
3.5.2.1 El límite de ZRemesher	72
3.5.2.2 Los pinceles ya no funcionan igual	74
3.5.2.3 Crasheos y errores silenciosos de ZBrush en proyectos grandes	74
3.5.3. Superficies que se puedan pintar	76
3.5.3.1 Diferencias en lo pintable entre inyección e impresión	76
3.5.3.2 Estructuración de formas para facilitar el pintado	77
3.5.4. Miniaturas para moldeo por inyección	77
3.5.4.1 Esculpir atendiendo a ejes de desmoldeo	77
3.5.4.1 Seccionamiento en partes	79
3.5.4.1 Análisis de Pieza	81
3.5.5. Miniaturas para impresión 3D	82
3.5.3.1 El Polycount	82
3.5.3.2 Vaciado y limpieza de malla	83
3.5.3.3 Orientación y Soportes en Lychee Slicer	87

3.5.5. Venta Online	92
<b>Capítulo 4. CONCLUSIONES</b>	<b>93</b>
4.1 Conclusiones del trabajo	93
4.1.1. Adecuación a los Objetivos	93
4.1.1. Conclusiones de viabilidad	94
4.2 Conclusiones personales	95
<b>Capítulo 5. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO</b>	<b>96</b>
<b>Capítulo 6. REFERENCIAS</b>	<b>97</b>
6.1. Libros y artículos de investigación	97
6.2. Otras fuentes referenciadas	97
6.3. Imágenes	99
<b>Capítulo 7. ANEXOS</b>	<b>100</b>
Capturas en Vídeo de Cómo se ha hecho el Producto	100
Juego de Mesa	100

# Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Contexto y justificación

El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar una colección de modelos digitales a escala miniatura, concebidos específicamente para su producción mediante técnicas de fabricación aditiva (impresión 3D). Se generará un conjunto temático de figuras en resina, orientado a coleccionistas de un mercado particular, cumpliendo con elevados estándares de competitividad dentro del sector.

Como parte del desarrollo y para potenciar el posicionamiento del producto, se diseñará un juego de mesa que integre las miniaturas, acompañado de su propio worldbuilding, enriqueciendo así la experiencia y el valor añadido del conjunto.

En el proceso de diseño digital, se analizarán las técnicas más adecuadas para esculpir las figuras, garantizando una óptima optimización de la malla y ajustando las configuraciones pertinentes para una correcta producción. Asimismo, se trabajará en el diseño de secciones ensamblables, logrando una coherencia estructural acorde con las formas definidas previamente.

Del mismo modo, se elaborará un informe detallado con los resultados obtenidos, que abarque tanto las técnicas de esculpido como los procedimientos de creación de soportes y seccionamiento, así como las pruebas de impresión realizadas. Además, se examinarán los posibles materiales en los que el cliente podría imprimir o inyectar las piezas, considerando sus características específicas para la producción física.

## 1.2 Planteamiento del problema

Entre las posibles salidas laborales del modelado tridimensional se encuentran industrias estrechamente vinculadas al ámbito audiovisual, como la del videojuego, la cinematográfica o la de la animación. También hay modeladores trabajando en sectores menos evidentes a primera vista, como el arquitectónico, el diseño de piezas industriales o el ámbito médico; pero el modelado constituye asimismo la forma digital de dar continuidad a industrias clásicas que tradicionalmente dependían de la escultura. Entre estas se halla el caso menos advertido de la industria juguetera y sus derivados, tales como el merchandising, los coleccionables y los wargames.

Si bien el modelado para figuras, juguetes y coleccionables pudiere parecer una salida evidente, puesto que los productos de estas industrias se encuentran de una u otra forma en la mayoría de los hogares, el número total de profesionales dedicados a ello no resulta en absoluto comparable con el de modeladores orientados a la producción de contenido audiovisual. Es cierto que no existen datos públicos exactos sobre la distribución de modeladores en las distintas industrias, pero al analizar tendencias de mercado recogidas en

*Verified Market Reports* se observa una marcada concentración de estos profesionales en el ámbito audiovisual (cine, videojuegos, animación, publicidad, etc.).

De todos ellos, el número que se dedica específicamente al modelado para miniaturas puede inferirse como mucho más reducido, lo que explica la dificultad para encontrar recursos acerca de las particularidades y flujos de trabajo propios de este campo. Se trata de un tema algo opaco, cuya información más accesible apenas profundiza en el asunto.

Este proyecto, si bien no innova dentro del ámbito, pretende arrojar algo de luz sobre el proceso de diseño y concepción de modelos tridimensionales para su posterior materialización física, además de obtener como resultado un producto viable para su comercialización.

Existe abundante información sobre cómo imprimir un modelo en 3D, pero no tanta acerca de cómo diseñarlo para que pueda imprimirse correctamente. Asimismo, hay numerosa documentación orientada al usuario final sobre cómo ensamblar y pintar las miniaturas que vienen en las conocidas “planchas” de las cajas de Warhammer, pero casi nada sobre el proceso que permite que un modelo 3D pueda integrarse en ellas. Cuestiones como el porqué de que las piernas de un modelo vengan por separado del torso, mientras que en otro de la misma caja no ocurre así. Con este proyecto se busca esclarecer esta posible salida profesional.

## **1.3 Objetivos del proyecto**

### **1.3.1 Objetivo General**

Establecer un estándar de calidad para la creación de modelos tridimensionales comercializables, desarrollando directrices claras y versátiles que permitan documentar y replicar el proceso de modelado, ensamblaje y preparación de las figuras para su uso en juegos de mesa. Estas directrices estarán diseñadas para adaptarse a diversas situaciones, facilitando que cualquier lector pueda seguir y aplicar el proceso completo.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Investigar las técnicas de modelado aplicables tanto a la venta destinada a impresión 3D y con el foco en particulares, como a la venta a empresas que producen en masa mediante inyección en moldes.
2. Obtener un producto satisfactorio para ser pintado a mano, lo que conlleva buscar patrones en aquello que hace a una pieza tanto divertida como accesible para ello. Entre ellos estarán exagerar o reducir las proporciones de determinadas partes y alcanzar diversos métodos de abstracción de la realidad para poder representar en formas simples y sobre todo, a escala de pincel, el conjunto de la pieza.

3. Investigar acerca de poses y siluetas, así como del correcto intercalado entre partes recargadas y planas para obtener un producto atractivo a la vista de cara a su exposición y coleccionismo.
4. Estudiar cuáles son las prácticas de cara a un buen diseño de pieza que permita su correcta impresión y moldeo, y que a la vez mantenga la integridad de su estructura limitando la aparición de zonas endebles y no uniformes.
5. Cuando sea necesario, hacer dos versiones alternativas del producto para que cada una se ajuste a uno o a otro método de concepción en físico. Para impresión, vaciar las piezas, establecer agujeros de drenaje y tener en cuenta la colocación de los soportes para generar la pieza aditivamente por capas sin imprevistos, y para inyección, dilucidar una correcta disposición en secciones de las partes del modelo con respecto a un mismo plano de observación y conseguir así una extracción fácil y sin rotura del molde, y establecer dónde y cómo será mejor que se coloquen las vías de entrada del material fundido para conseguir una más fácil extracción de la pieza de la plancha de plástico resultante.
6. De cara a la comercialización posterior del producto, estudiar y tratar de imitar dentro de lo posible los planes de suscripción de los portales de venta de miniaturas digitales. A groso modo, se trata de suscripciones periódicas en las que se envía al particular un conjunto temático de miniaturas, que a su vez, pertenecen a una temática más grande que engloba el producto de la marca. Además, cuentan con estrategias de descuentos para captación de nuevos clientes, así como planes recompensa por fidelidad que se incrementan mes a mes.
7. Indagar acerca de los pormenores para publicar las miniaturas en un portal de venta online. Entre ellos pueden estar temas contractuales con las webs o de posicionamiento de producto.

## Capítulo 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Contexto

Gibson et al. (2015) afirman que los espacios de fabricación como los FabLabs y los I2P Labs han contribuido a democratizar las tecnologías de manufactura aditiva, convirtiéndose en centros abiertos que permiten a cualquier persona experimentar con sus ideas en un entorno accesible. Estos lugares se denominan comúnmente como Maker Spaces<sup>1</sup> y han experimentado un notable crecimiento, convirtiéndose en centros clave para la innovación y la creatividad. Gracias a la digitalización y a la accesibilidad de herramientas de fabricación personalizadas, estas tecnologías han dejado de ser exclusivas de investigadores o creadores especializados. Ahora, tienen un impacto significativo en los "autocreadores" individuales, quienes aprovechan este entorno comunitario para materializar sus ideas.

Este enfoque inclusivo y colaborativo ha fomentado el desarrollo de nuevos modelos de impresoras y dispositivos innovadores, impulsados por investigaciones colectivas y el intercambio de conocimientos. Los Maker Spaces no solo están democratizando la fabricación, sino que también están estimulando el crecimiento de la cultura DIY<sup>2</sup> a nivel local y global (Rehak, 2017, pp. 114–115).

En concreto, el mundo de las miniaturas, es una pequeña industria dentro del mundo de la fabricación aditiva<sup>3</sup>, pero con el auge de este fenómeno DIY y las redes sociales, cada vez va ganando más notoriedad. Aquí debajo se exponen algunas de las principales fuentes actuales tanto para la impresión como para los métodos tradicionales de creación de miniaturas.

### 2.2 Referentes

Ben Redwood, Filemon Schöffner y Brian Garret en "The 3D Printing Handbook" exponen, a nivel de usuario y de diseñador, las normas a seguir para un buen prototipado de pieza para impresión. Emplean un enfoque muy visual, donde comparan resultados y materiales acompañados de fotografías y explicaciones. Este libro es uno de los recursos recientes más populares en el sector.

Por otro lado, a un nivel más teórico, Ian Gibson, David Rosen y Brent Stucker recogen en "Additive Manufacturing Technologies" explicaciones técnicas del funcionamiento de los procesos de fabricación aditiva, desde un análisis exhaustivo de las propiedades de los

---

<sup>1</sup> Maker Space: espacio colaborativo donde diversos creadores comparten conocimientos.

<sup>2</sup> DIY: proviene de 'do it yourself!', 'hazlo tú mismo' en inglés, y hace referencia a crear o modificar algo sin ayuda de especialistas o procesos industriales.

<sup>3</sup> Fabricación Aditiva: nombre técnico de la impresión 3D. Fabricar un objeto sin falta de planificar sus procesos. Coloca capas mediante soportes hasta completar la pieza.

materiales a nivel químico-estructural y las diferentes técnicas que existen para imprimirlos, a sus costes y aplicaciones en las industrias médica, automovilística, artística, etc.

Un enfoque más práctico se puede encontrar en las guías de impresión y diseño que ofrecen los fabricantes de impresoras 3D en sus páginas web. Un buen ejemplo es 'Proto Labs', que en sus recursos recoge errores comunes de diseño de pieza, explicaciones simples de los procesos técnicos y guías de usuario. También cabe resaltar el intercambio de información entre particulares en foros especializados como los 'subreddit' de impresión 3D o "The Miniatures Page".

En cuanto a la inyección, Robert A. Malloy expone en detalle en "Plastic Part Design for Injection Molding" el apartado técnico del diseño de moldes, haciendo hincapié en su diseño estructural para aguantar el estrés de carga, químico y de temperatura al que los someten los procesos de fabricación de cada material inyectable: termoplásticos<sup>4</sup>, resinas, aleaciones de estaño<sup>5</sup>... También expone las consideraciones para diseñar las piezas a moldear, como son su seccionamiento de cara a un mismo plano, la planificación de la interconexión de los conductos para la inyección en la pieza o las esclusas para disipar posibles burbujas de aire. Aunque Malloy recoge normas comunes, se trata de un enfoque industrial general y no tanto de cómo las empresas de miniaturas lo hacen. Los procesos específicos de grandes estudios como 'Games Workshop' no son públicos, pero algunas empresas más pequeñas sí que ofrecen insights a sus fábricas, como 'Black Site Studios' o 'Trenchworx' (ver recursos en *bibliografía*), donde explican en vídeos sus procesos de fabricación, tanto de impresión para masters<sup>6</sup> como de moldeo.

Por último, antes del diseño para fabricación ya mencionado, viene el diseño de la miniatura en sí. Y es que en el mundo del modelado de miniaturas, al ser algo tan específico y que no atañe al usuario final como sí que lo haría la impresión 3D, existen muy pocos recursos, y la mayoría son web. La bibliografía es muy escasa. El grueso de las convenciones del ámbito se pueden extraer de la simple observación de las cosas en común que tienen los productos finales. Aún así, algún escultor particular como Tom Mason en "The Ultimate Quick Start Guide to Sculpting Miniatures" (escultor senior en 'Wizkids', el fabricante de 'D&D') expone algunas recomendaciones. Otros ejemplos de esto son los escultores "Tom Meier" o "Aaron Lovejoy", pero la vastísima mayoría del contenido acerca de miniaturas es sobre cómo imprimirlas, pintarlas, modificarlas o su uso en el tablero, casi nada acerca de cómo se modelan. Para información más consensuada habría que recurrir a bibliografía acerca del modelado de personajes en general, un ámbito mucho más grande. "ZBrush Character Creation" del autor Scott Spencer es uno de los libros más populares.

---

<sup>4</sup> Termoplásticos: plásticos maleables al calentarse que se endurecen al enfriarse. En miniaturas se emplean sobre todo el polivinilo, el nylon y el polietileno.

<sup>5</sup> Aleaciones de estaño: el peltre es la aleación de metal más utilizada para miniaturas modernas, muy resistente y permite detalle, pero es frágil en zonas finas como espadas o antenas.

<sup>6</sup> Master: escultura original muy detallada a partir de la que se hacen las demás, por ejemplo, aquella que se usa para hacer los moldes.

En cuanto a los recursos web de modelado previamente mencionados, aunque presentan el mismo desafío que la bibliografía —la necesidad de recurrir al modelado general de personajes debido a la casi inexistencia de material específico sobre miniaturas—, cabe destacar a "Flipped Normals" como uno de los creadores de contenido más reconocidos en este ámbito.

Con el presente proyecto se pretende reunir de estas fuentes información de carácter práctico de cara a diseñar una pieza estéticamente atractiva que pueda materializarse en físico de manera óptima y que dé lugar a un pintado a mano viable y lo más satisfactorio posible. Si bien es cierto que parte del proceso puede acontecer al ámbito industrial ingenieril, se pretende ajustar la pieza, desde aquello que acontece al artista 3D, de forma que facilite posteriormente al ingeniero su tarea, conllevando un número mínimo de correcciones.

## **2.3 Marco Conceptual**

### **Introducción**

El modelado 3D para miniaturas, concebidas con la intención de ser materializadas físicamente, plantea desafíos específicos que requieren una planificación detallada. En este contexto, las técnicas de fabricación, como la impresión 3D y el moldeo por inyección, se presentan como las principales opciones para llevar diseños digitales al mundo físico. Ambas metodologías ofrecen ventajas y limitaciones que las hacen adecuadas para diferentes escenarios de producción.

Por un lado, la impresión 3D, conocida también como fabricación aditiva, ha democratizado el acceso a la creación de objetos tridimensionales complejos, permitiendo a diseñadores particulares producir piezas únicas o de tiradas pequeñas con relativa facilidad. (Gibson et al., 2015). Por otro lado, el moldeo por inyección se posiciona como la “opción ideal para la producción masiva, gracias a su capacidad para generar grandes volúmenes con alta precisión a menor costo unitario, aunque con mayores requerimientos iniciales en términos de diseño y fabricación de moldes” (Kazmer, 2010, p. 41).

Este apartado analiza en detalle estas tecnologías, sus aplicaciones específicas al modelado de miniaturas, y las consideraciones técnicas que los diseñadores deben tener en cuenta para maximizar la calidad y viabilidad de las piezas producidas. Asimismo, se abordan las diferencias fundamentales entre el modelado para propósitos artísticos y para fines industriales, destacando la importancia de ajustar los procesos creativos a los requisitos técnicos de cada método de producción.

## 2.3.1 Métodos para la concepción física de un modelo 3D

### 2.3.1.1 Impresión 3D

La impresión 3D es el término popular por el que se conoce a la fabricación aditiva, ‘Additive Manufacturing’ en inglés, o simplemente ‘AM’, lo que antiguamente se denominaba ‘prototipado rápido’ en un contexto de manufactura de producto. Aunque existía como concepto teórico, no es hasta 1981 que Hideo Koyama plantea el primer prototipo de fabricación aditiva, y en 1984, que Charles Hull inventa la manera de aplicarlo a partir de datos digitales (estereolitografía), constituyendo ya la impresión 3D como tal (Gibson et al., 2015, p. 37).

Se trata de uno de los tres métodos principales para materializar un producto. Los otros dos son la fabricación ‘formativa’ (moldes) y la ‘sustractiva’ (retirar material de un bloque inicial), como ya se ha referido anteriormente en el apartado de ‘inyección’ (Redwood et al., 2017, p.12). Cada método tiene sus ventajas y desventajas. Las virtudes y el funcionamiento de la fabricación aditiva pueden resumirse así:

“El principio básico de la tecnología de Fabricación Aditiva es que un modelo, previamente creado con software tridimensional (CAD), puede ser fabricado directamente sin la necesidad de planear su proceso. Aunque esto en realidad no es tan simple como parece, la tecnología AM sí que simplifica notablemente el proceso de producir objetos 3D complejos directamente a partir de datos CAD. Otros procesos de manufactura requieren de un detallado y meticuloso análisis de la geometría del modelo para determinar el orden en que sus partes serán fabricadas, qué herramientas y procesos son los más óptimos, y qué soportes o accesorios adicionales serán necesarios para completar la pieza. Por el contrario, para llevar a cabo un proceso de fabricación aditiva solo se necesitan unos detalles dimensionales básicos y un ligero conocimiento de cómo funciona la máquina AM y qué material usar” (Gibson et al., 2015, p.2).

A pesar de esta nueva democratización del proceso de manufactura que permite la impresión 3D en comparación con otros métodos como la inyección, para crear diseños que van a ser impresos es recomendable tomar ciertas consideraciones. Si bien la probabilidad de aparición de problemas ya es exponencialmente menor, de esta manera se evita que se den situaciones imprevistas, como partes endebles, zonas más propensas a la deformación que otras, imprecisión en el detalle, la imposibilidad de formación de los soportes adecuados, o incluso que haya partes del modelo totalmente inaccesibles para la impresora (Redwood *et al.*, 2017). Por tanto, siempre es recomendable conocer los límites del modelado para impresión, que ya se discutirán más adelante, y los tipos de impresora y sus metodologías, y es que algunas conceden mayor o menor flexibilidad que otras a la hora de preparar los modelos.

Aunque existen más tipos de impresión 3D, en cuanto a miniaturas solo atañen cinco de ellos, el resto se relegan a la producción industrial. A continuación, se explican detallando

sus ventajas e inconvenientes, así como sus casos de uso más frecuentes y una reflexión general para cada uno de los métodos; tal y como los clasifican Ben Redwood et al. en “The 3D Printing Handbook”.

### Métodos Principales

- **FDM (Fused Deposition Modelling) | PLÁSTICO (termopolímeros):** Es el tipo de impresora más asequible y, por ello, la más difundida entre usuarios particulares. Resulta sencilla de utilizar y no requiere de procesos industriales complejos, lo que la convierte en una opción idónea para el ámbito doméstico. Como contrapartida, se trata del método menos preciso y el que presenta un mayor nivel de imperfecciones superficiales. Este procedimiento fue desarrollado en 1988 por Scott Crump (Gibson *et al.*, 2015).
- **SLA y DLP (‘Stereolithography’ y ‘Digital Light Processing’) | RESINA:** Es la técnica que permite alcanzar el mayor nivel de detalle, constituyendo además el estándar de impresión para miniaturas profesionales. Antiguamente se recurría a la escultura física original para crear el molde, pero desde la adopción del modelado digital se emplea impresión SLA para obtener esa primera figura maestra de máxima resolución, a partir de la cual se replican las demás. Aunque sea el método más preciso, también es el más antiguo. El primer prototipo de fabricación aditiva (1981) desarrollado por Hideo Koyama ya se destinaba a resina, tecnología que posteriormente perfeccionaría Charles Hull en 1984 (Redwood *et al.*, 2017).

### Métodos Menos Utilizados

Los siguientes métodos no son para nada la norma en el mundo de las miniaturas. Cosa que el flujo de trabajo de empresas de fabricación como Trenchworx o Black Site Studios deja claro, pero aún así se listan aquí, pues de cara al modelado previo pueden existir ciertas diferencias o facilidades. Según *The 3D Printing Handbook* (Redwood et al., 2017) existen:

- **SLS (Selective Laser Filtering) | NYLON:** Aunque puede usarse para miniaturas y escenografía, apenas se usa para ello ya que hay otras alternativas mejores para la mayoría de situaciones. Permite imprimir geometrías muy complejas y no requiere de usar soportes, a cambio de resolución.
- **MJF (Multi Jet Fusion) | NYLON:** No utiliza material sólido que luego calienta y deposita de manera lineal hasta rellenar cada capa, sino que recibe el material en “polvo” y lo fusiona mediante un láser y químicos, toda la capa simultáneamente. Esto agiliza la producción notablemente.

Es la forma de impresión 3D más rápida y el resultado es notablemente resistente. Se usa mucho en el ámbito industrial, pero en miniaturas se emplea solo cuando el tiempo es un factor clave, la inyección no es una opción y no se requiere de excesivo

detalle: una combinación que no se da casi nunca. Si existe la posibilidad y el tiempo apremia, sale más a cuenta recurrir a la inyección para estos casos, que es todavía más rápida y alcanza mayor detalle al contar con moldes hechos con ‘masters’ en “SLA”. Si se tratara de un particular sin acceso a inyección, tampoco usaría MJF porque no es de uso doméstico.

- **DMLS (Direct Metal Laser Sintering) | METAL:** Aunque permite imprimir en metal, este es un material en desuso en el mundo de las miniaturas. Incluso cuando se trata de inyección (donde no incrementa mucho el coste), ya que a día de hoy se puede alcanzar el mismo o incluso mejor detalle con otras técnicas, y la resina y el plástico pesan menos. En impresión, el metal es absurdamente caro en comparación.

	Ventajas	Desventajas	Usos
FDM (Fused Deposition Modelling)   PLÁSTICO (termopolímeros)	<b>Accesible y económico.</b> Las impresoras FDM son baratas y fáciles de usar. Ideal para piezas de mayor tamaño o que requieren menos detalle.	<b>Resolución limitada:</b> Las líneas de capa pueden ser visibles, afectando a los detalles finos. Necesidad de <b>post-procesado para suavizar superficies.</b> Las famosas “líneas” han de ser lijadas si se busca un buen acabado.	<b>Creación de prototipos</b> iniciales de miniaturas: pruebas. <b>Producción directa de miniaturas de “bajo detalle”:</b> miniaturas menos detalladas cuyo propósito directo es su uso en juegos de mesa y no tanto su pintado o exposición. <b>Escenografía:</b> piezas grandes que ambientan el lugar en el que se juegan las miniaturas. Debido a su mayor tamaño, importa menos el nivel de detalle y no hace falta recurrir a métodos de impresión más caros y precisos como “SLA”.
SLA y DLP (“Stereolithography” y “Digital Light Processing”)   RESINA	<b>Alta resolución,</b> ideal para miniaturas detalladas, complejas y pequeñas. Amplia gama de resinas: Incluyen resinas rígidas, flexibles y translúcidas. <b>Relativamente asequible:</b> algunas Impresoras SLA como Elegoo o Anycubic Photon son populares entre los aficionados más especializados.	<b>Post-procesamiento intensivo:</b> necesidad de lavado, curado y lijado. Posteriormente a la impresión se ha de pasar por procesos químicos e industriales. <b>Manejo de resina:</b> materiales tóxicos y delicados que requieren precaución. <b>Altos costes:</b> existen modelos algo más económicos, pero las impresoras profesionales SLA son mucho más caras.	<b>Creación de prototipos “maestros”:</b> miniaturas muy detalladas que se utilizan como modelo para crear los moldes para una posterior producción masiva mediante inyección. Producción directa de miniaturas: tiradas cortas o exclusivas, o cuando la inyección en molde no es una posibilidad.

		<p>Mayor tiempo de producción: el postprocesado suma tiempo extra.</p> <p><b>Poca accesibilidad:</b> todo lo descrito anteriormente evidencia que se trata de un método menos viable para particulares, aunque el uso de SLA cada vez se ve más en ambientes “caseros”.</p>	
<p>SLS (Selective Laser Filtering)   NYLON</p>	<p><b>Más barato que SLA</b>, por lo general. <b>No requiere soportes:</b> facilita diseños más complejos (menos limitaciones para el modelado). Permite trabajar con gran variedad de materiales muy resistentes.</p>	<p><b>Menos resolución</b> en comparación con SLA, aunque suficiente para figuras en ciertas escalas. Costos más altos que SLA para producciones muy pequeñas.</p>	<p><b>Piezas industriales.</b> Modelos funcionales para pruebas mecánicas o ensamblajes. Miniaturas cuando el diseño no tiene tanto detalle como para SLA, pero es muy complejo en ángulos y recovecos y no se beneficiaría del suavizado de MJF. Piezas tan complejas que son imposibles de moldear. Escenografía en algunos casos.</p>
<p>MJF (Multi Jet Fusion)   NYLON</p>	<p><b>Rápido</b> en comparación con el resto de métodos de impresión. Imprime en nylon, que es mejor si la pieza ha de aguantar peso o va a tener un uso intensivo: ideal para piezas grandes de escenografía. Detalle decente incluso en nylon, aunque no llega a SLA. Puede imprimir directamente a color.</p>	<p>Su caso de uso a coste eficiente es <b>poco probable</b>.</p>	<p><b>Se requiere de impresión rápida</b> sin excesivo detalle y en cantidad a la que es eficiente usar MJF, que es en lotes medianos (de 10 a 500 unidades). Para lotes grandes, aunque hay el sobrecoste de los moldes, ya sale rentable recurrir a inyección. Cuando se necesita que la pieza se imprima en color directamente.</p>
<p>DMLS (Direct Metal Laser Sintering)   METAL</p>	<p><b>Permite la fabricación de miniaturas en metal</b>, lo que algunos clientes prefieren puesto que el metal es mejor para repintar una miniatura (la resina aguanta peor el uso de disolventes y sufre mucho si se rasca la pintura). También es un material mucho más</p>	<p><b>Costo elevado:</b> Solo utilizado para productos premium o piezas artísticas exclusivas.</p>	<p>Creación de <b>ediciones limitadas</b> en metal como figuras coleccionables de alta gama.</p>

	resistente y da mejor sensación de acabado.		
--	---	--	--

Tabla 1. Tipos de fabricación aditiva y sus ventajas y desventajas.

En resumen, en la mayoría de los casos será recomendable preparar las piezas como si fueran a ser impresas mediante la metodología SLA, ya que es el estándar profesional. Si finalmente se emplea FDM, la resolución extra del archivo no supondrá un inconveniente, aunque no se reflejará en el producto final; mientras que lo contrario no sería viable.

Para escenografía de gran tamaño, se puede prescindir de una alta carga poligonal, ya que probablemente se imprimirá con FDM, aunque contar con mayor detalle siempre es beneficioso. Si se sabe que la pieza deberá soportar peso, el fabricante optará por MJF. En el caso de piezas extremadamente complejas, es probable que se utilice SLS, lo que elimina la necesidad de considerar la construcción de soportes, ya que esta tecnología no los requiere. Finalmente, para clientes particulares, es casi seguro que solo tendrán acceso a tecnologías como FDM, y en el caso de los entusiastas más avanzados, a SLA.

### 2.3.1.2 Moldeo por Inyección

La inyección, o fabricación “formativa” es uno de los tres tipos industriales de fabricación (Redwood et al, 2017). Aunque la creación de piezas a partir de moldes existe desde la edad de piedra, en el ámbito industrial nace a finales del S.XIX, cuando los hermanos Hyatt inventan las primeras máquinas industriales de moldeo por inyección. Se trata de un proceso rápido y automatizado que es capaz de producir piezas con geometrías muy complejas. El proceso puede fabricar tanto productos muy pequeños como muy grandes empleando prácticamente cualquier tipo de plástico existente y ciertas aleaciones metálicas (Malloy, 2010). Consiste en utilizar una pieza maestra de muy buena calidad (master) para crear un molde a partir del cuál obtener muchas unidades idénticas. El molde está dividido en dos mitades que han sido ahuecadas con la forma externa de la pieza a producir, que posteriormente se cierran y reciben el material inyectado a su interior mediante exclusas para formar una nueva pieza igual que la original. Según Moldblade (s.f.), el proceso consta de 5 etapas:

1. **Llenado:** tras cerrar el molde, el material fundido fluye al interior a través de las vías de entrada.
2. **Compactación:** es un proceso simultáneo al de enfriado y consiste en presurizar y comprimir el material para asegurar que rellena completamente la oquedad del molde y que, por tanto, replica con detalle la superficie del mismo.
3. **Sujeción:** el fundido se mantiene dentro del molde a presión para compensar la reducción de tamaño propia del proceso de enfriado del material. Normalmente se lleva a cabo hasta que la puerta de entrada se solidifica. Una vez esto ocurre, ya no puede producirse la entrada o salida del fundido en la cavidad.

4. **Enfriado:** aunque empieza una vez entra el material en la cavidad, sigue ocurriendo tiempo después de que termine el proceso de sujeción.
5. **Expulsión:** el molde se abre y la pieza enfriada es eyectada de la cavidad, generalmente mediante un sistema mecánico. En miniaturas puede hacerse manualmente por la fragilidad de las partes más finas y endebles (ver el proceso de fabricación de *Trenchworx* en *Goobertown Hobbies*, 2024, en *Bibliografía*).

### **Materiales Empleados en Inyección para Miniaturas**

Según el flujo de trabajo de la empresa Trenchworx, aunque en inyección existe gran variedad de materiales a elegir, para miniaturas son relevantes los siguientes:

**Termoplásticos:** poliestireno (estándar de industria, usado en Warhammer, Gunpla y en maquetas de aviación), policloruro de vinilo (“PVC”, es más blando y flexible, usado por Reaper Bones, Wizkids y Board Game Minis).

Para poliestireno y PVC se necesitan moldes metálicos especialmente caros, muy buenos para fabricación en grandes números. Para tiradas medianas de miniaturas el nuevo método “siocast” es una mejor opción. Se trata de una mezcla de poliuretanos líquidos inyectados a baja presión.

**Resinas:** en la inyección en moldes de la industria de las miniaturas se usa principalmente la “resina bicomponente”, formada por resina base y un reactivo endurecedor. Por el contrario, para impresión 3D se usan los “fotopolímeros”.

**Aleaciones de Estaño:** antiguamente era un estándar. Cada vez se emplea menos por ser ligeramente más caro que las otras opciones, que ya alcanzan al metal en calidad de detalle. La fabricación en metal por molde sigue siendo perfectamente viable, a diferencia de la fabricación en metal por generación aditiva (impresión 3D), que es sustancialmente más cara. Originalmente las miniaturas de metal eran de plomo, pero ese material ya está completamente descatalogado por sus cualidades tóxicas a largo plazo.

#### **2.3.2 Escultura y Modelado Digital**

Cada forma de materialización en físico requiere de consideraciones diferentes a tener en cuenta para el modelado previo, aunque comparten muchas de ellas.

Con el auge reciente de la venta de impresoras 3D al pequeño consumidor y los nuevos portales masivos de venta de 3D, al escultor 3D autónomo se le abre un mundo de posibilidades, y es que al ser un proceso mucho más permisivo, se le permite exagerar las poses y llevar los detalles al extremo, fomentando la creatividad (Stein, 2018). Además, al

requerir de menos, o incluso de ninguna preparación, se reducen los tiempos de producción. Por tanto, es conveniente conocer el flujo de trabajo para impresión.

Por el contrario, el uso de moldes, aunque requiere de una inversión inicial mayor (cada miniatura requiere de uno y además este se deteriora con el uso) abarata el proceso cuando se ha de producir en masa, pues reduce muchísimo el coste de producción por unidad. Es por esto que las grandes marcas de miniaturas, como lo son Games Workshop (*Warhammer*) o WizKids (*Dungeons and Dragons*), usan casi exclusivamente este método. Por tanto, si un modelador quiere entrar en la plantilla de una de ellas, deberá aprender las vicisitudes del modelado para inyección, que es más restrictivo.

Las principales diferencias y consideraciones son las siguientes.

### 2.3.2.1 Modelado para Impresión 3D

Si se planifica adecuadamente, casi cualquier pieza puede imprimirse, incluso si no cabe en la impresora. Se pueden crear complejas estructuras de soportes o seccionar el modelo en todas las partes necesarias, pero aún así, hay cosas que se pueden tener en cuenta en el modelado para facilitar el posterior proceso de impresión y ahorrar material en el proceso. La empresa de impresoras *Protolabs* deja unas guías generales para diseño de pieza:

**Grosor uniforme:** evitar diferencias grandes de grosor entre zonas colindantes. Si son necesarias, deberá hacerse gradualmente dentro de lo posible. De lo contrario, la zona fina se enfriará mucho más rápido que la gruesa, pudiendo causar una reducción de tamaño perceptible con respecto al diseño original. Aunque también puede ocurrir en inyección en casos extremos, esto es especialmente acusado en impresión, pues el fundido no se encuentra presurizado.

*Ejemplo práctico: el filo de una espada es sustancialmente más estrecho que la mano que la empuña. Una solución sería añadir una guarda al arma para que el grosor disminuya gradualmente hasta el filo.*

**Evitar partes colgantes grandes:** cualquier parte colgante en anchura y profundidad, ejes perpendiculares a la gravedad, que sea superior a 0.5mm deberá estar sujeta por soportes. Cuanto mayor sea la superficie que sobresale, más compleja será la estructura de los soportes. Aunque se puede rotar la pieza de mil maneras para acomodarla a una impresión que requiera de menos islas soportadas, si varias partes de un modelo se disparan en direcciones perpendiculares, dará igual cómo se coloque la pieza, que se van a tener que crear cantidad de soportes.

*Ejemplo práctico: procurar que la mayoría de las protuberancias grandes de un modelo sobresalgan paralelamente entre sí, dentro de lo posible.*

**Analizar los modelos con software de impresión:** programas como Netfabb de Autodesk, Lychee o Meshmixer pueden encontrar errores en las mallas de los modelos. Si bien otras consideraciones como los soportes, los agujeros de drenaje o el vaciado interno del modelo son un plus, pero pueden recaer sobre aquél que lo vaya a imprimir porque no son parte del modelado en sí, cosas como que no haya agujeros en la malla, evitar geometría volteada y asegurar que todo está en una única pieza y sin partes separadas, sí que le corresponden siempre al modelador.

### 2.3.2.2 Modelado para Inyección en Moldes

#### CONSIDERACIONES DE CARA A MOLDEO

De la mano de R.A. Malloy y su exhaustivo *Plastic Part Design for Injection Molding* pueden extraerse ciertas consideraciones generales. La inyección en molde requiere que la pieza sea planificada con antelación. Si se pretende producir la pieza completa sin atender a estas premisas, es muy probable que se fracture al intentar extraerla del molde, dado que un molde se compone de dos mitades (o más) entre las que se conforma la pieza, y para retirarla tras el proceso es necesario separar dichas mitades. Si en la dirección de apertura se interpone algún elemento de la pieza dispuesto en sentido opuesto, no podrá extraerse sin sufrir daños. Existen, por tanto, recomendaciones relativas a ángulos admisibles respecto al eje de separación, dentro de las cuales debe proyectarse la pieza.

La idea fundamental es determinar desde qué ángulo de observación la pieza presenta un mayor número de zonas coplanares y emplearlo como eje principal para diseñar el molde, es decir, el eje en el que confluyen ambas mitades. En el caso de miniaturas, este ángulo óptimo desde el que orientar el molde muchas veces no existe, puesto que las figuras se modelan en poses dinámicas y rara vez en reposo. Casi siempre hay un brazo, un arma o algún detalle situado en ángulos contrarios que impiden una extracción adecuada. Por ello, existen dos estrategias para adaptar las miniaturas a la inyección: o bien se modela directamente la pieza entera de forma que permita el moldeo sin complicaciones, lo que restringe la expresividad creativa, o bien, una vez finalizado el diseño, se seccionan las zonas que puedan generar conflictos y se disponen separadas de la pieza principal, procurando que todo mantenga la mayor perpendicularidad posible respecto a la dirección de apertura (Malloy, 2010).

#### SECCIONAR MODELOS

Según *Protolabs*, no sería recomendable que ninguna parte del modelo se interpusiera a más de 30º con respecto a la dirección de separación (eje Z, profundidad) o con respecto a la dirección del molde (eje X, ancho). Habrían de evitarse los ángulos intermedios y nunca darse ambos casos a la vez. Las partes paralelas a ambos ejes o las partes perpendiculares que no

tengan protuberancias con desviaciones mayores de 30º no deberían de suponer un problema para la extracción. El eje que separa el molde en dos mitades también es recomendable que constituya la mitad aproximada del volumen de la pieza. No es buena idea generar desproporciones de carga en una de las mitades del molde si la pieza es compleja en salientes.

En caso de que alguna parte de un modelo no cumpla con lo referido anteriormente, ésta deberá ser seccionada y colocada por separado en una dirección que no sea conflictiva. Ya que una miniatura terminada contiene mucha geometría, y por tanto, seccionarla manualmente seleccionando sus vértices sería muy engorroso, muchos programas de 3D cuentan con la herramienta “bisect”, que corta de manera uniforme, y/o con booleanas.

Una vez separadas las partes se han de rellenar los cortes con geometría. Después, se pueden crear una serie de pestañas para facilitar el ensamblaje o se puede dejar el corte plano. Si se opta por la elaboración de pestañas, el encaje de éstas no ha de ser perfecto, ya que hay que contar con posibles deformaciones de la pieza en su fabricación y con el espacio que ocuparía el pegamento una vez el usuario final trata de montar la pieza. Dejar un hueco de aproximadamente una décima parte en el extremo de la pestaña con respecto a la cavidad a ocupar es una buena opción (Kazmer, 2007).

### **2.3.3. Técnicas de escultura para miniaturas:** Diferencias frente al 3D orientado a animación y videojuegos

#### **2.3.3.1 Carga Poligonal**

La resolución o carga poligonal de un modelo hace referencia al número de polígonos que lo conforman. Se mide en “quads” (rectángulos) o “tris” (triángulos). Un cubo podría representarse con tan solo 6 quads o 12 tris. Un modelo más complejo, como un soldado de la Segunda Guerra Mundial, requeriría de varios cientos o incluso miles de polígonos; en función de la fidelidad con la que se quiera representar. A mayor número de polígonos, mayor detalle en la pieza.

Especialmente en videojuegos, mantener al mínimo la carga poligonal de un modelo es clave para su funcionamiento optimizado. Esto se debe a que los videojuegos tienen que correr a una velocidad adecuada en el máximo de dispositivos posibles y no solo en el ordenador que los fabrica, como sería en el caso de una animación. De lo contrario, solo los clientes con máquinas de gama alta podrían permitirse jugar, lo que restringe mucho el público objetivo, y por tanto, el beneficio. Para mantener la carga poligonal baja, se recurre a técnicas de otras partes del proceso de creación de un activo 3D que son posteriores al modelado. Estos otros procesos se encargan de enmascarar que el modelo es más simple y el detalle de la pieza llega por otra parte, no por el modelado en sí. Entonces, el modelador tendrá que cuidar mucho el número de polígonos e incluso reconstruir los modelos originales con versiones más reducidas

- retopología - (Gahan, 2011). Los personajes jugables de videojuegos modernos rondan los 100K; los NPCs, muchas veces ni la mitad. Por ejemplo, en *The Witcher III* (2015), el personaje principal jugable de Geralt cuenta con 75K, en su armadura base.

En el modelado inicial de una miniatura la carga poligonal no importa, de hecho cuanto más alta sea, mejor; mayor detalle será capaz de captar la pieza (Flipped Normals, 2022). Si la impresora 3D no puede imprimir a tanta resolución como tenga la pieza, simplemente esta diferencia de calidad no se verá en el producto final, pero la impresión se llevará a cabo sin problemas. La inyección de plásticos y resinas mediante moldes consigue productos donde el límite por arriba de detalles no es casi perceptible por el ojo humano, por lo que pueden trabajar también con resoluciones de modelo muy altas. Entonces, se concluye que la norma general en modelado para miniaturas es una alta carga poligonal a raíz de la cual se crean versiones alternativas decimadas.

Aunque esto es una preocupación menos para el modelador, tampoco es conveniente abusar de la carga poligonal. El detalle excesivo solo aumenta el peso del archivo y tarda más en procesarse por el software de impresión (slicer), aunque el tiempo de impresión sea el mismo. Una impresora SLA, el tipo más preciso comercializable, tiene una resolución media de 50 micrones (Gibson et al., 2015), por lo que más de 1.5 millones de polígonos para una pieza pequeña (30-50 mm de altura) sería redundante. Por otro lado, una FDM, que es más habitual en particulares, solo alcanza los 0.2mm por capa, lo que en una pieza pequeña haría perceptible la diferencia hasta el medio millón de polígonos. Para la inyección el criterio sería similar al de la impresión SLA, ya que es el método con el que se fabrican los masters. Por otra parte, para la comercialización y marketing de los modelos, sí que puede ser recomendable tener versiones de carga poligonal más alta, sobre todo si se quieren exponer renders de secciones pequeñas de los modelos, como una imagen haciendo zoom al arma de una miniatura.

Un baremo aceptable, entonces, estaría entre los pocos cientos de miles de polígonos y los dos millones para el archivo de impresión (Lychee Documentation, s.f.); y no habría un límite máximo de polycount para crear imágenes comerciales o “renders” de los modelos.

### **2.3.3.2 Triángulos o Quads**

Aunque en la industria de la animación se trabaja con los ya citados quads porque permiten una mejor deformación, para las esculturas no son estrictamente necesarios. Hay que tener en cuenta el principio que se aplica en la industria de los videojuegos: los quads solo se usan para aquello que se vaya a animar, lo estático no los necesita (Daan Meysman, 2019). Esto permite a los modeladores hacer trucos para reducir la carga poligonal aún más en videojuegos, además de ser una preocupación menos, ya que comprobar que toda la malla esté en quads puede ser un proceso engorroso.

Si bien para miniaturas la carga poligonal no es un problema y puede ir en quads, se trata de algo estático, por lo que no hace falta preocuparse por ellos. Además, la extensión de archivo estándar para impresión 3D es el “STL”, que no soporta los quads y lo trianguliza todo. No obstante, muchos programas de escultura 3D como ZBrush o Blender calculan las mallas en quads por defecto, pero esto es solo un modo de facilitar la creación de personajes para que puedan ser animados, que es otra salida del modelado, pero no es una función diseñada para escultores.

### 2.3.3.3 Topología

En modelado, la topología es la colocación de los puntos que conforman los polígonos de un modelo entre sí (Autodesk, n.d.). Una buena topología podría definirse como la colocación armoniosa de los polígonos para que permitan una correcta deformación con respecto a lo que se pretende conseguir una vez esté animado el objeto. Esto se obtiene usando anillos o “loops”, es decir, prolongaciones de quads contiguos que si se siguen, vuelven a sí mismos (*ver debajo*).

Según J. Osipa (2010), una topología limpia es aquella que tiene la geometría ordenada con distancias uniformes entre puntos, y una topología buena es aquella que además está basada en loops lógicos para reforzar las articulaciones. Una mala topología estará desordenada y provocará que parezca que la malla se rompe al animarse, casi siempre involucrando la aparición de errores de iluminación.



Figura 1. Explicación visual de los anillos o loops.

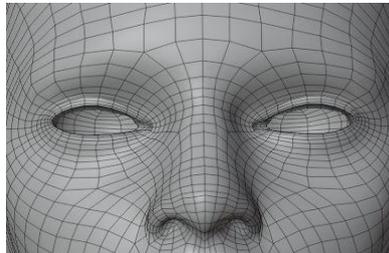


Figura 2. Buena topología para deformación, los anillos definen las zonas de deformación.

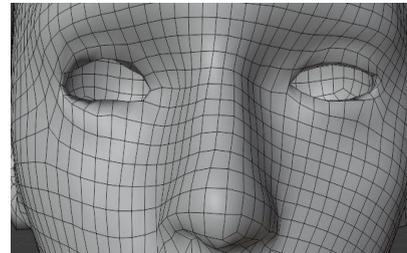


Figura 3. Topología limpia, es uniforme, pero mala para deformación, los loops no definen nada.

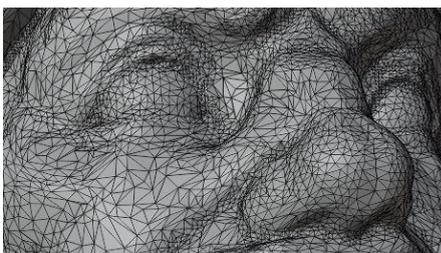


Figura 4. Topología sucia, muy mala para deformación, ni siquiera usa loops, pero suficiente para escultura.

A diferencia de en otros ámbitos, donde una topología limpia es extremadamente importante, para miniaturas es indiferente mientras que la resolución sea lo suficientemente alta como para no mostrar artefactos<sup>7</sup>. De ser muy baja y tener la geometría dispuesta de forma arbitraria pueden aparecer estos artefactos, esencialmente cuando no se observa la pieza desde las vistas habituales. Pero en miniaturas se suele trabajar con recuentos altos. Si la malla no tiene errores como geometría duplicada, es decir, polígonos que ocupan el mismo espacio, o caras volteadas, no habrá problemas (Flipped Normals, 2022). Incluso mallas con agujeros pequeños pueden no suponer ningún problema, ya que los programas de preparado para impresión lo arreglan con unos clicks.

Es importante que todo esté en una sola pieza y fusionado sin huecos, cosa que se logra con herramientas como “Dynamesh” de ZBrush; pero más allá de eso, que la geometría siga unas pautas lógicas o no, siempre que el visionado de la pieza sea el correcto, es del todo indiferente. La pieza no va a requerir de una deformación adecuada porque no se va a animar, por lo que una mala topología para animación no tiene porqué ser una mala topología para esculturas estáticas (Flipped Normals, 2022).

#### 2.3.3.4 Simetría y Posado

Para ahorrar tiempo, la escultura digital permite establecer ejes de simetría a raíz de los cuáles se copian los cambios que se hagan en uno de los lados al otro. Esto permite esculpir la mitad si un objeto es simétrico. Si bien en una miniatura el sujeto está en una pose de acción o que describa su personalidad, la mayoría de artistas digitales ya no lo esculpen directamente así, sino que primero usan la simetría para agilizar tiempos y es después cuando proceden a posarlo (Spencer, 2011).

Existe controversia acerca de en qué pose esculpir un modelo. El riggeado<sup>8</sup> es más sencillo si se modela en “Pose T”<sup>9</sup>, pero el acabado es más natural y correcto anatómicamente si originalmente se esculpe en “Pose A”<sup>10</sup>. Por otro lado, existen escultores muy experimentados como Tom Mason que dicen ahorrar tiempo si esculpen directamente en la pose final asimétrica. Es cierto que posarlo una vez ya está esculpido puede ser un proceso engorroso y que a veces puede requerir incluso de volver a esculpir partes de la pieza si es que no se está posando en etapas tempranas del modelado. Esperar mucho a posar un modelo es un dolor de cabeza asegurado. Posar un modelo lo deforma, y si la geometría es elevada, se perderá todo el detalle al tratar de rotarlo o trasladarlo, además de que se generarán

---

7 Artefactos: errores de iluminación. Por lo general son zonas oscuras no deseadas que pueden tener bordes dentados. Normalmente se deben a problemas en la malla del modelo.

8 Rigging: proceso por el cuál se articula un modelo para su posterior animación. Delimita cómo se va a deformar la geometría al ser estirada y rotada.

9 Pose-T: con los brazos levantados a 90° con respecto al torso y totalmente extendidos, similar a la postura de crucifixión, pero con las piernas separadas. Cuerpo recto, neutro y mirando al frente. Extremidades equidistantes. Simetría general en el eje de abscisas.

10 Pose-A: igual que la pose T, pero con los brazos aproximadamente a 45° en lugar de a 90°. Es la postura de reposo natural, pero con algo de separación con respecto al cuerpo para facilitar la escultura.

artefactos tediosos de resolver, perdiéndose todo el detalle en el proceso. Si no hay detalle, no hay nada que perder. Por eso es mejor posarlo antes.

Para miniaturas, a diferencia de para videojuegos o animación, no se requiere ni del proceso de rigging ni del de retopología, por lo que no es necesario realmente esculpir con simetría. Aún así, varios autores, entre ellos Flipped Normals, recomiendan hacerlo en las primeras etapas para conseguir unas buenas proporciones (en pose A) y luego ya, antes de tener excesiva geometría (en torno a 100k sin contar vestimentas y accesorios), posarlo. Eso sí, la cabeza se recomienda mantenerla simétrica hasta mucho más adelante.

La desventaja clara a la hora de posar en etapas tempranas es que los detalles finos deberán esculpirse por duplicado al no poder aprovecharse ya la simetría. Desde *Flipped Normals* aseguran que este inconveniente se resuelve con un flujo de trabajo que hace uso intensivo de alphas<sup>11</sup>. Por eso recomiendan tener una librería<sup>12</sup> grande de estos pinceles. Recalcan la importancia de guardar alphas de piezas más complejas y no solo de texturas para detallar. Tener cosas como narices enteras, bocas, cuernos, abdómenes u ojos en un estado medio-avanzado de esculpido para reutilizarlos agiliza mucho el proceso. Permiten pasar de cero a un prototipo en pocos minutos.

## 2.3.4 Escultura digital para figuras de wargames

### 2.3.4.1 Consideraciones Artísticas

Las principales consideraciones a tener en cuenta para que una miniatura esté a escala satisfactoria para ser pintada, según Nextutt Education y el pintor profesional de miniaturas Emil Nyström (Squidmar), son las siguientes: una exageración de proporciones, especialmente en cabeza, manos y pies, un pelo formado por mechones gruesos, presentar la pieza en una pose de acción llamativa pero que permita al pincel llegar a todos sus recovecos, y añadir más texturas y rugosidades de lo habitual para que la totalidad de la pieza sea divertida de pintar.

Cuanto menor sea la escala (el tamaño físico) de la miniatura, mayor deberá ser la exageración de proporciones si se pretende que sea óptima para pintado (Nyström, 2022). En una figura muy pequeña pintar el torso de la pieza con un pincel no presentará un reto, pero sus manos y cabeza si se mantienen en la misma proporción sí que serán un problema, ya que a un tamaño tan reducido sería imposible llegar a pintar detalles clave para la legibilidad de la pieza como serían los ojos. Por el contrario, si la escala es grande, no será necesario exagerar las proporciones.

---

<sup>11</sup> Alphas: pinceles de escultura que suman o restan geometría en función de una textura asociada. Esto permite aplicar calcomanías inteligentes como texto, logos, detalles de piel, escamas, etc, y no hace falta esculpir dichos detalles a mano.

<sup>12</sup> Librería: en este contexto, una colección personal de recursos prefabricados reutilizables.

Aunque es muy importante generar texturas variadas a lo largo de toda la pieza para minimizar el número de partes que puedan percibirse como rutinarias, o incluso como tediosas de pintar, también es buena idea dejar partes totalmente lisas de vez en cuando. Las partes planas incentivan las técnicas denominadas “free-hand” en pintura de miniaturas, que permiten al pintor poner algo de su parte en el diseño de la pieza y que no sea un proceso completamente guiado (Nyström, 2024). Un muy buen ejemplo es un pergamino, una capa o un libro abierto, o también una larga plancha de metal en un tanque. El pintor puede aplicar calcomanías o incluso pintar a mano logotipos de su propia invención.

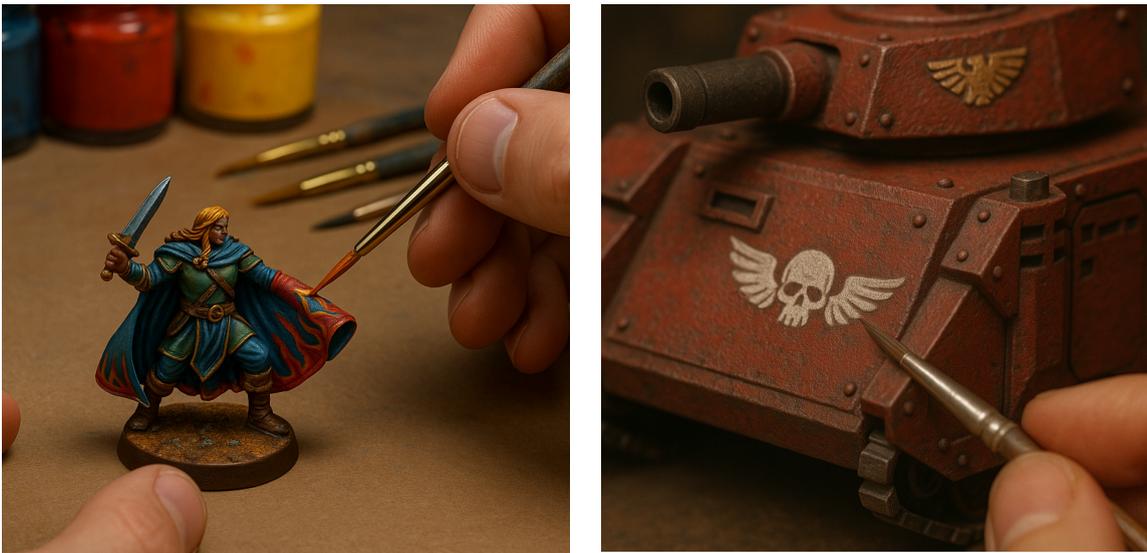


Figura 5. Detalles freehand en una capa (izquierda) y en un tanque (derecha). Obsérvese que no forman parte del relieve real del modelo.

### 2.3.4.2 Consideraciones Técnicas en Casos Prácticos

Lo más importante para diseñar una miniatura es modelarla teniendo en cuenta cómo se va a materializar en físico. Existen consideraciones comunes como las propiedades del material y la planificación de escala, que se resuelven a grosso modo con el dicho ampliamente acuñado en el ámbito: “Everything needs to be thick” (*todo ha de ser grueso*). A pesar de esto, el grosor mínimo no es una ciencia cierta y dependerá mucho del tamaño de la miniatura, del material empleado y de la precisión del molde o la impresora. Es posible, no obstante, conseguir grosores mínimos en ciertos casos si se hace un correcto uso de soportes finos colocados manualmente (ver 3.5 Resultados).

#### 2.3.4.2.1 Impresión 3D

Si se trata de impresión 3D, es obligatorio tener en cuenta las propiedades ya discutidas anteriormente del material en el que se vaya a imprimir y, por tanto, cómo diseñar la

pieza para evitar roturas y zonas blandas por culpa de no tener en cuenta las vicisitudes específicas de cada material, y luego buscar una pose que facilite la concepción en físico y a la vez balance el gasto de material con la calidad obtenida (Redwood et al., 2017).

### PROPIEDADES

Imprimir directamente sin una orientación correcta ni una separación óptima en partes puede parecer que incurre en menor gasto de material porque la mayoría de la pieza está dispuesta verticalmente, pero produce la aparición del efecto “stair stepping” (líneas de capa visibles) y además aumenta el tiempo de impresión, que depende en gran medida de la altura de la pieza (Gibson et al., 2015). El efecto en cuestión se manifiesta como pequeños escalones o estrías paralelas visibles en la superficie del objeto, siguiendo el patrón de la construcción por capas.

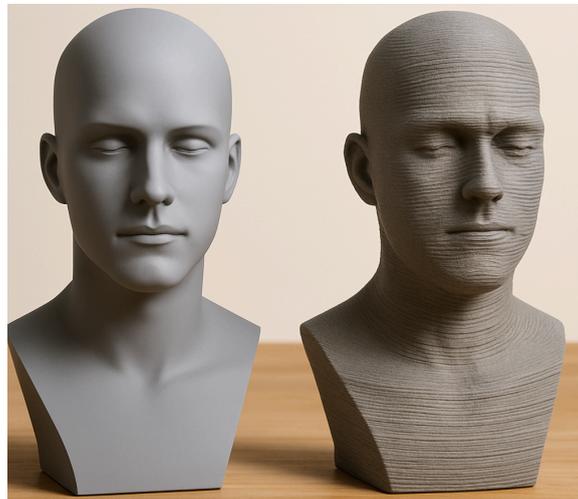


Figura 6. Comparativa de modelo impreso correctamente (izquierda) frente a uno con stair-stepping (derecha) en su máxima expresión.

Depender exclusivamente de la creación automática de soportes muy posiblemente destruya la legibilidad de la pieza. Según Gibson (2015), una cantidad abusiva de soportes podría dejar defectos y marcas no intencionadas - witness marks- al ser retirada. Se requeriría de un lijado posterior que en caso de tratarse de una parte relevante es muy recomendable evitar que llegue a ocurrir.

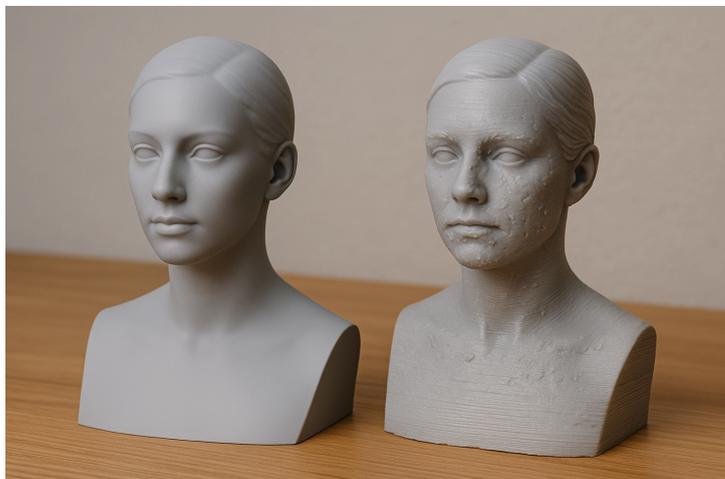


Figura 7. Comparativa de modelo impreso correctamente (izquierda) frente a uno con witness marks (derecha) en su máxima expresión.

El grosor mínimo recomendado para impresión, aunque como se ha mencionado no es exacto y dependerá del tipo de material e impresora, deberá respetarse para evitar deformaciones. En *The 3D Printing Handbook* lo establecen como un baremo entre 1 y 3 mm. Como referencia mental, se recuerda que la mayoría de empresas que producen miniaturas las diseñan para escala 28mm.

Para indagar más en la resina, que es el material que se empleará de cara a esta investigación, cabe resaltar dos propiedades importantes en el diseño de la pieza que describe Malloy (2010). La primera es la fuerza de succión que se genera, por lo que a diferencia de en la impresión FDM con termoplásticos, es mejor colocar la pieza algo más arriba de la placa de construcción. La segunda propiedad que hace diferente a la resina es su estado líquido. Por esto, si la pieza está hueca por dentro, cosa que es muy habitual para ahorrar material, se deberán crear agujeros de drenaje para que salga el excedente de resina. De lo contrario, se queda atrapado dentro y se mantiene en su estado líquido más tiempo que el exterior, provocando errores en la impresión y posibles agrietamientos y deformaciones a largo plazo.

Los agujeros de succión han de tener un mínimo de 4 mm de diámetro para ser eficaces (Redwood et al., 2017). Luego, el modelo ha de estar completamente cerrado, es decir, no puede haber ninguna cara interna expuesta al exterior. Incluso las piezas vaciadas deberán tener un grosor real con geometría que soporte su interior. Esto se conoce como una malla “manifold”, que deberá cumplir la regla de Euler para sólidos (Gibson et al., 2015).

Regla de sólidos:  $N^{\circ} \text{ caras} - N^{\circ} \text{ aristas} + N^{\circ} \text{ vértices} = 2 \times N^{\circ} \text{ cuerpos}$

#### PAUTAS GENERALES DE DISEÑO

Luego existen una serie de recomendaciones y buenas prácticas a seguir que no son obligatorias, pero que facilitan mucho la impresión. De hecho, ese es el espíritu del presente documento: esclarecer unas guías prácticas para diseño de pieza que den el mínimo número posible de complicaciones al cliente cuando las imprima por su cuenta; darle un producto lo más usable posible aunque solo se le aporte un STL. A priori, tras una investigación inicial (ver 3.3 Metodología para mayor precisión), el consenso de usuarios del subreddit *PrintedMinis* usa las siguientes palabras para describir estas prácticas:

- Todo lo que apunte hacia abajo y sobresalga, si no está unido a la base, va a requerir de soportes, por lo que es recomendable plantear una posible separación en partes para imprimirlo por separado, pero apuntando ahora hacia arriba.
- Diseñar la pieza de forma que no sea necesario poner soportes en las partes más finas de la pieza, ya que podrían ser directamente arrancadas con el soporte al retirar los soportes.

- Diseñar la pieza de forma que no sea necesario poner soportes en partes importantes como la cara, ya que podrían dañarse al retirar los soportes.
- Evitar manos abiertas, y si lo están, tratar de hacer que todos los dedos se toquen o separar el brazo a otra pieza e imprimirlo orientado completamente hacia arriba.
- Las armas es muy recomendable que vayan por separado, pero incluyendo siempre la mano que la sujeta en la misma pieza que el arma.
- Las túnicas, capas y demás tejidos es muy recomendable que vayan unidas al cuerpo por la cara interna al igual que se haría para inyección en moldes, que sean gruesos.
- Evitar ejes muy afilados, tratar de redondearlos un poco. Se verán bien al ser impresos.
- Evitar cavidades vacías en un modelo ahorra soportes.
- Evitar que haya partes que casi se tocan pero que no llegan a tocarse del todo. Es preferible que se toquen o dejar un espacio más grande entre ellas porque de lo contrario haría falta un soporte y no habría espacio físico para colocarlo.

Aún así, una impresora de alta calidad que use un material tan permisivo como es la resina podría salir airosa sin tener en cuenta alguno de estos consejos. Imprimir en escalas más grandes también facilita mucho las cosas. En palabras de los autores de *The 3D Printing Handbook* “, imprimir piezas de mayor tamaño o varias piezas en una sola tirada, no solo reduce costes, sino que amplía la libertad de orientación y diseño del modelo, gracias al espacio disponible y la capacidad de controlar mejor la temperatura ambiente” (Redwood et al., 2017, p. 47).

#### 2.3.4.2.2 Inyección en Moldes

Para hacer modelos de cara a su posterior inyección en molde no existen unas pautas exactas a seguir, ya que será un ingeniero industrial quien tome muchas decisiones en la pieza una vez haya sido esculpida y antes de ser concebida en físico. Según entrevistas a artistas de la empresa Trenchworx de miniaturas, se trata de un proceso iterativo entre el modelador y el ingeniero. Será este último quien siempre lleve la voz cantante para que la pieza tenga un balance entre calidad y viabilidad para materializarse en físico: es él quien diseña el molde para ser efectivo (MCDM, 2019).

Entonces, el artista sólo puede seguir unas directrices simples que eviten problemas a posteriori, pero el ingeniero siempre puede pedir modificaciones en la pose, ya que el material líquido entra en las planchas por un único orificio central y ha de llegar a todas las piezas por igual a la vez antes de que se seque. Esto puede provocar cambios radicales en la viabilidad de una pose, o incluso requerir de añadir partes móviles al molde para permitir más ángulos de desmoldeo si es que la pieza no funciona con respecto a un único eje de desmoldeo. El ingeniero decide qué partes separar y dónde poner las cavidades de entrada y salida de material para mantener la integridad de la pieza.

Desde Trenchworx resumen su flujo de trabajo como el siguiente: inicialmente hacen el modelo de cara a un eje principal, pero sin preocuparse demasiado por la viabilidad, después el ingeniero sugiere cambios en la pose para corregir posibles problemas futuros en la inyección, luego el artista aplica los cambios, ahora sí teniendo en cuenta las indicaciones técnicas, y por último, el ingeniero le indica qué partes de la pieza se han de seccionar y reorientar en la plancha para su viabilidad. En caso de que la pieza lo requiera, se da luz verde a un nuevo eje secundario de desmoldeo, lo que aumenta mucho las posibilidades creativas de la pose, pero también encarece sustancialmente los costes, pues requiere de un nuevo molde metálico complejo con partes móviles. En caso de usarse moldes blandos, la pieza puede ser algo más compleja, puesto que el desmoldeo es mucho más permisivo al tratarse de un molde que puede doblarse hasta cierto punto; eso sí, solo permite tiradas pequeñas, se deteriora rápido.

Las pautas comunes para modelar de cara a inyección serían las siguientes:

- Una vez posada la criatura, esclarecer cuál es el eje principal al que van a quedar más partes del modelo apuntando.
- Una vez establecido el eje, tratar de orientar todo aquello que no case con el eje de desmoldeo y que no sea estrictamente necesario que esté apuntando en dirección opuesta para que sí lo haga.
- Seccionar todo lo que quede en dirección contraria al eje, separarlo y reorientarlo en la escena para que ahora sí case con el eje principal.
- Asegurar que no hay ni una sola cavidad, los moldes son mucho más restrictivos que la impresión 3D. Ejemplo: si una mano está delante de una prenda de ropa y están en la misma pieza, se deberá unir la parte trasera de la mano a la ropa. No puede quedar un hueco entre la pieza principal y la posición final de retirada del molde o ésta sería arrancada en el proceso.

Aún siguiendo todas estas pautas, es posible que la distribución en la plancha del molde no permita una correcta entrada y salida de material líquido en las esclusas tal y como el artista ha dispuesto la pieza, o que exista cualquier otro problema indetectable para un modelador. Entonces, aunque se recomienda seguir estas directrices, la última palabra la tiene el ámbito ingenieril. Eso sí, si la comunicación con el ingeniero no es muy fluida, el artista puede comprobar la viabilidad de la pieza él mismo en programas de diseño de piezas para inyección como SolidWorks.

Figura 8. (Izquierda) Ejemplo de miniatura en plancha de resina con seccionamientos y encajes para hacer viable su producción de acuerdo un único eje de desmoldeo.

Figura 9. (Derecha) Mechón de pelo sin voladura. Las puntas van estiradas hasta el cuerpo para no ir en contra del eje.



## Capítulo 3. DESARROLLO DEL PROYECTO

### 3.1 Planificación del proyecto

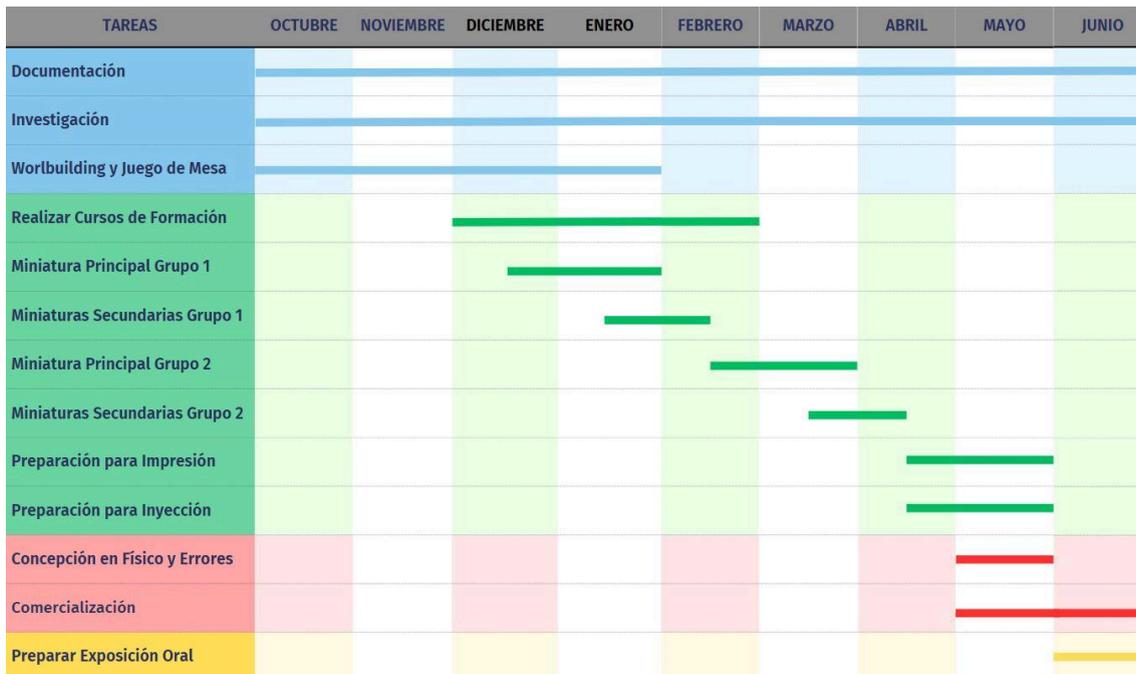


Figura 10. Diagrama de Gantt del desarrollo estimado del proyecto. 'Azul' corresponde a preproducción y documentación, 'verde' a producción, y 'rojo' a post-producción.

La planificación inicial de procesos es la siguiente: para el modelado orgánico se emplea el programa *ZBrush*, mientras que para la base de las partes duras se utiliza *Blender*. Las partes duras se integran de nuevo en *ZBrush* para detallarlas.

Se utiliza software específico para escaneo de viabilidad y preparación para impresión y moldeo de las partes. El uso de herramientas concretas para esto último forma parte de investigación y no de la metodología previa, por lo que para conocerlos, véase la sección 3.5 Resultados.

Todo proceso extra que pueda hacerse en *Blender* de forma óptima, se hará en *Blender*, ya que se trata de un estándar muy extendido. Además, así se ahorra en comprar e instalar software adicional.

## 3.2 Descripción de la solución, metodologías y herramientas empleadas

### 3.2.1 Concepts y Diseños Iniciales

Lo primero será diseñar los personajes a esculpir concienzudamente antes de modelarlos. Para ello se procede a realizar muchos dibujos, primero unos bocetos simples hasta que se tiene la idea bien formada, y luego otros más complejos y mucho más detallados que muestran al personaje desde todos los ángulos importantes para que no haya problemas a la hora de llevarlo al 3D. Para la toma de decisiones y los concepts realizados, ver 3.5. Resultados.

### 3.2.2 Modelado Inicial: Silueta y Mallas Base

#### CREAR UN PROYECTO EN ZBRUSH

Como ya se comentó en el apartado 2.3.3 Técnicas de Escultura para Miniaturas, no hay una necesidad acuciante de deformación perfecta, como sí que la habría para riggeado, por lo que no es necesaria la pose en "T" y se puede recurrir a la pose en "A", que es preferible para esculpir anatomía.

Lo primero es crear un proyecto en ZBrush. Para ello, lo más rápido es abrir un proyecto prefabricado desde el "lightbox" (ventana que se abre automáticamente tras cargar la interfaz del programa al arrancar). Aquí se suele partir o bien de una esfera - si se necesita mucho control inicial, se busca un punto extra artesanal o si se va a hacer una pieza con anatomía extraña - , o directamente una malla base si es que se va a esculpir una criatura de fisionomía estándar. En el caso de las mallas bases, ZBrush otorga una para humanoides masculinos, otra para femeninos y otra para cuadrúpedos. Empezar con malla base tiene sus ventajas e inconvenientes:

Ventajas	Desventajas
Se parte de una base sólida y sin errores anatómicos.	Toda la geometría está cosida, no hay control por piezas (denominadas "subtools" en ZBrush).
No es necesario hacer procesos repetitivos desde cero que son comunes a todos los modelos con la misma fisionomía y que consumen mucho tiempo, como dedos de manos y pies, orejas o párpados.	Mayor dificultad para posar la pieza al ir todo en una sola malla. Cada rotación y reposicionamiento afecta a la geometría colindante, por lo que será necesario trabajar con máscaras y volver a esculpir aquello que se rompa.
Por consecuencia de todo lo anterior, es mucho, pero mucho, más rápido que partir de una forma primitiva como la esfera..	Recalcular geometría es global a todo el modelo por ir cosido, por lo que manipular diferentes geometrías en cada parte de la pieza requiere de procesos extra.
Tabla 2. <i>Ventajas y desventajas de partir de una malla base de ZBrush</i>	La geometría inicial de las mallas base por defecto de ZBrush es algo más alta de la ideal para manipular rápidamente las formas. Será necesario usar "ZRemesher" una o varias veces antes de empezar a trabajar con ellas.

## MALLA BASE

En este caso, para esculpir las miniaturas se ha partido de la malla base masculina denominada *Male-ZBrush*, cedida a Pixologic por Tsvetomir Georgiev para ZBrush 2023. Es recomendable ejecutar un ZRemesher con la opción “Half” activada (menú derecho: Geometry -> ZRemesher) para reducir la geometría, dado que el modelo original cuenta con 252 k polígonos, una cantidad excesiva para un control inicial.

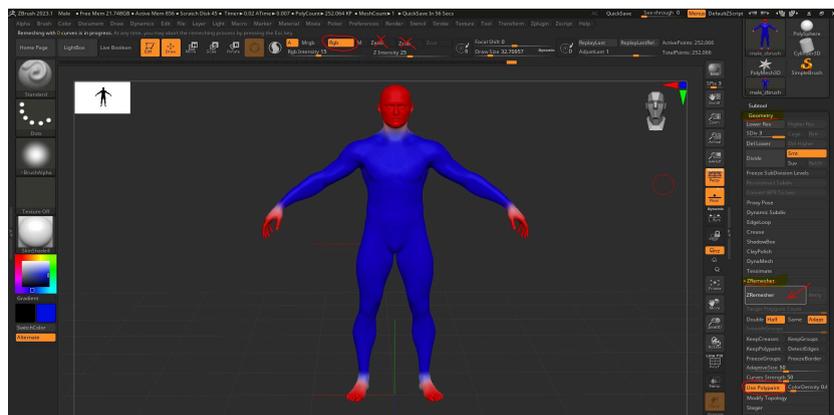
Por debajo de 100 k se pierden detalles importantes, como el esculpido de los párpados, aunque sigue existiendo un exceso de geometría que dificulta la manipulación adecuada del cuerpo. Como criterio personal, se ha optado por reducir localmente la geometría en el cuerpo y mantenerla en la cara y las manos. Al encontrarse todo en una única pieza y ser ZRemesh un cálculo global, resulta necesario indicar a ZBrush cómo debe distribuir la geometría. Para ello, se ha elegido como opción preferente activar “Use Polypaint” en el menú de ZRemesher.

Para que el cálculo tenga en cuenta la polypaint, es preciso pintar de un tono azul aquellas zonas donde se desee reducir considerablemente la geometría, y en rojo las áreas donde se pretenda conservar mayor densidad (consultar la documentación de ZBrush para más información). Para pintar con polypaint, debe activarse la opción “RGB” en la barra de herramientas superior central y desmarcar “ZAdd” y “ZSub” si estuvieran seleccionadas; en caso contrario, la posición de los polígonos se alterará al pintar.

Antes de comenzar, resulta aconsejable ir a “Color” en la barra superior y utilizar “Fill Object” para rellenar el objeto con el color actual, evitando así que al cambiar el color del pincel se aplique automáticamente a todo el modelo, lo que dificultaría distinguir las áreas pintadas. Para seleccionar rápidamente el color, puede mantenerse presionada la barra espaciadora, lo que desplegará un menú temporal que permite elegir el tono deseado. Conviene destacar que las opciones ZAdd, ZSub y RGB se aplican únicamente al pincel activo, por lo que al cambiar de pincel será necesario reactivar RGB para continuar pintando. Para recuperar la funcionalidad original del pincel, bastará con desmarcar RGB y volver a marcar las casillas iniciales.

Una vez establecidos los colores, se procede a pintar sobre el modelo, procurando que las transiciones entre las zonas roja y azul queden suavizadas, sin cambios abruptos ni superposiciones excesivas. Para ello, se ajusta la presión del pincel o se regula mediante la opción “Rgb Intensity”.

Figura 11. Malla base *Male-ZBrush* preparada para hacer ZRemesh por polypaint.



Resumen conciso de cómo reducir geometría localizada a una subtool:

1. Activar el modo RGB en la barra de herramientas central.
2. Desactivar ZAdd y ZSub ahí mismo.
3. Ir a Color en la barra de herramientas superior y darle a “Fill Object” con un color por defecto que no sea ni azul ni rojo; preferiblemente blanco.
4. Elegir el color con el que se va a pintar desde la barra espaciadora del teclado.
5. Pintar con azul sobre las partes del modelo donde se quiera reducir la geometría.
6. Pintar con rojo sobre las partes del modelo donde se quiera más geometría.
7. Seleccionar la opción “use polypaint” en Geometry -> ZRemesh.
8. Seleccionar en ese mismo menú la geometría objetivo (“half” (la mitad), “double” (el doble), “same” (similar a la actual) o introducirla a mano en el slider “target polycount”).
9. Aplicar las opciones y empezar el recálculo de la malla con la nueva distribución al darle al botón “ZRemesher”.
10. Repetir el proceso tantas veces como sea necesario.

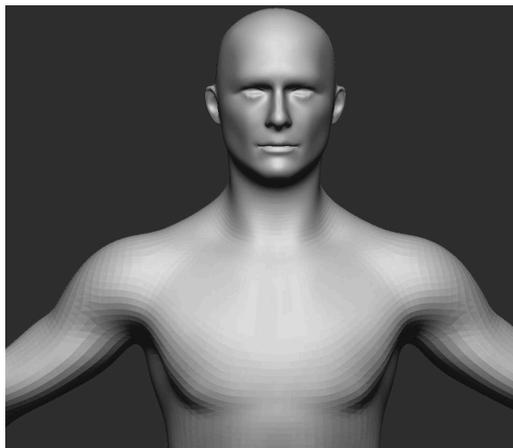


Figura 12. Malla base Male-ZBrush una vez ha sido reducida con polypaint. Mucha más geometría en la cara que en el cuerpo.

#### CARGAR REFERENCIAS

ZBrush puede resultar un tanto farragoso de usar en modo ventana en algunas ocasiones, por lo que colocar las imágenes de referencia a un lado del monitor y el programa escalado en ventana al otro lado no es la mejor solución. Es preferible incorporar las referencias a la escena 3D de ZBrush. Para ello, existen varias maneras de hacerlo, pero la que se ha empleado es cargar las referencias como texturas y añadirlas al “Spotlight” Para ello se va al menú “Texture” en la barra superior de herramientas. Desde el botón “Import” se cargan las imágenes de referencia. Ahora es necesario seleccionar la imagen que se va a cargar a la escena haciéndole click para proceder a darle al botón de “Add to Spotlight”. Este botón no se indica con texto, sino que es un icono de una semicircunferencia con una barra que contiene el signo “+/-”. Se encuentra bajo las texturas cargadas (ver Fig.14 ).

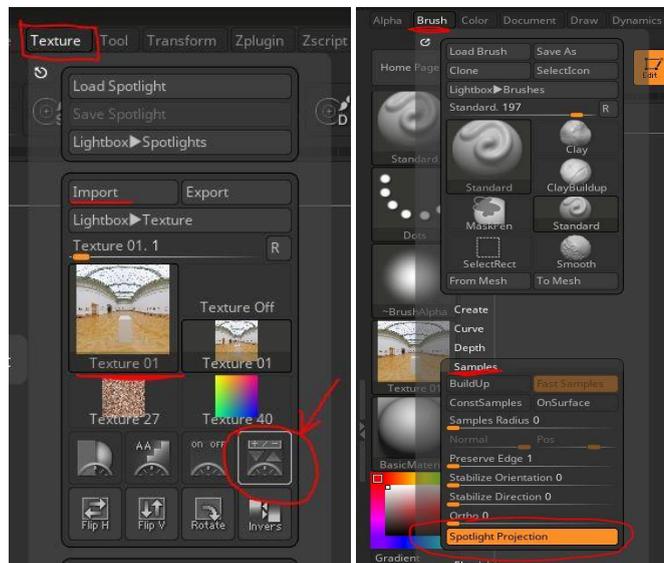


Figura 13. (Izquierda) Añadir textura al spotlight en ZBrush.

Figura 14. (Derecha) Desactivar spotlight projection en ZBrush.

Luego, se desactiva la opción “Spotlight Projection” en “Brush” -> “Samples” desde la barra de herramientas superior (ver Fig.14). De no desactivarse, los pinceles sólo aplicarán modificaciones a las partes del modelo que estén justo debajo de la imagen de referencia. Una vez desactivada esta opción y con la referencia cargada a la escena, se procede a colocarla en un lateral para que no dificulte la visibilidad de la escena. Esto se hace pinchando y arrastrando en el punto rojo central que se genera en la imagen. Luego se escala hasta conseguir el tamaño deseado apretando el botón de escalado (símbolo con dos cuadrados, ver Fig.15). También hay otras opciones como la opacidad o eliminar la imagen (el botón con una X). Una vez la referencia esté colocada y escalada al gusto, se oculta el spotlight para dejar de ver la interfaz de las referencias y poder modelar a gusto. El control del spotlight se activa y desactiva con la tecla Z.

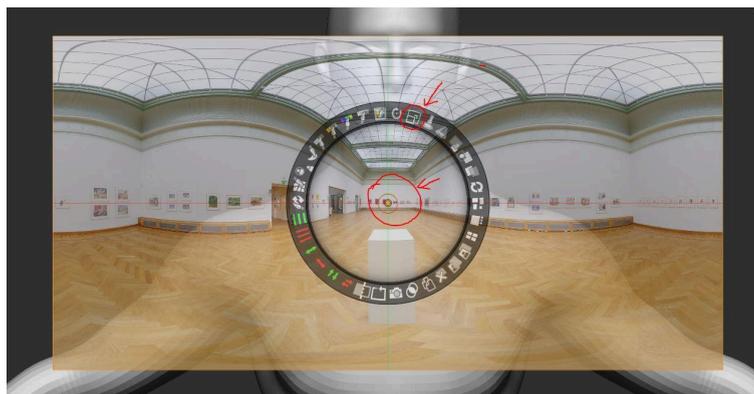


Figura 15. Interfaz del Spotlight de ZBrush.

Resumen conciso de cómo cargar y colocar referencias en ZBrush mediante el spotlight:

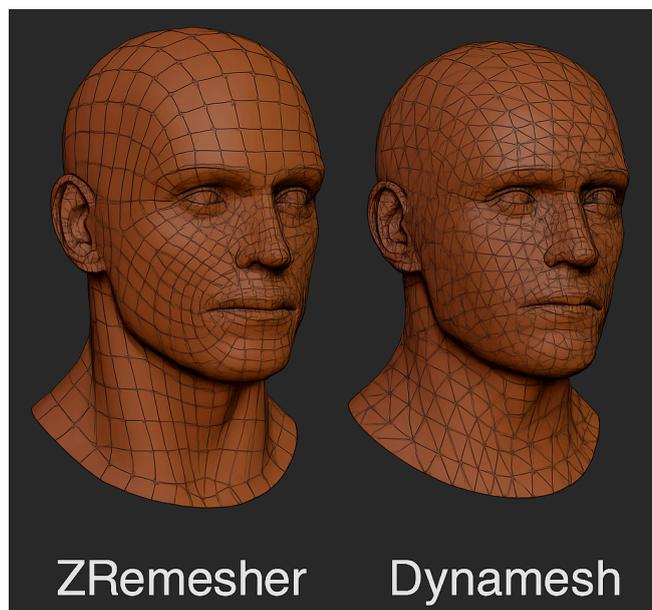
1. Se carga la referencia desde la barra de herramientas superior: Texture -> Import
2. Seleccionar la imagen entre las texturas que aparecen en el menú "Texture" con click izquierdo.
3. Presionar el botón "Add to Spotlight" (ver Fig.13).
4. Desactivar "Spotlight Projection" desde la barra de herramientas superior en: Brush -> Samples (ver Fig.14)
5. Colocar la imagen donde no moleste arrastrando el pivote central (ver Fig.15).
6. Escalar la imagen (ver Fig.15).
7. Ocultar la interfaz del Spotlight con la tecla Z.

## MODELADO PRINCIPAL

Una vez se tiene la malla base deseada y las referencias en su lugar, se activa la simetría para ahorrar tiempo (tecla X) y se procede a tirar de la geometría con el pincel "Move" a tamaño grande, sin miedo de romper la geometría; ya se reestructurará la integridad de la malla posteriormente. Una vez se tiene una silueta parecida a la del concept, se aplica "ZRemesher" para reordenar la malla en la nueva posición y arreglar la geometría "estirada" (más adelante se explica el porqué), con la opción "Same" marcada. Se repite este proceso tantas veces como sea necesario hasta tener una malla coherente y ajustada a la silueta de la referencia. Para ver la toma de decisiones en tiempo real, ver los vídeos del Anexo.

Cuando ya se tienen las proporciones ajustadas a las deseadas y ya no se puede trabajar más con la geometría actual, es cuando se procede a aumentar la geometría marcando "double" en "ZRemesher"; nunca con "Dynamesh" aunque a simple vista pueda parecer que es similar, su funcionamiento es diferente y se utiliza o bien para coser geometría (ver más adelante) o cuando ya hay mucha geometría. ZRemesh es fundamental en etapas tempranas porque alinea los polígonos con direcciones anatómicas o bordes estructurales; Dynamesh solo calcula una malla uniforme.

Figura 16. ZRemesher vs Dynamesh. Cómo recalculan las mallas (ignorar tris en la derecha, ambas dan quads).



### 3.2.3 Posado: Rompiendo la Simetría

Si el modelo ha alcanzado un nivel suficiente de desarrollo bajo simetría —con la estructura general asentada, pero aún tosco y sin muchos detalles—, es el momento idóneo para iniciar el proceso de posado. Al deformar la malla, el detalle excesivo se pierde, por lo que mantener la simetría durante demasiado tiempo solo conllevaría que fuera necesario esculpir de nuevo.

Para ser más eficiente y posar varias Subtools a la vez, se utiliza “Transpose Master”. Esta herramienta permite combinar temporalmente todas las subtools en una única malla de baja resolución, facilitando el posado sin comprometer la estructura individual de cada parte. El procedimiento estándar consiste en crear el "TposeMesh", realizar los ajustes de pose y luego transferir esos cambios de vuelta a las subtools originales mediante la función "Transfer".

Lo primero para realizar un posado es enmascarar correctamente las zonas que han de moverse, con cuidado de afectar a partes colindantes. La máscara se crea directamente manteniendo Ctrl pulsado mientras se pinta sobre el modelo. Para evitar deformaciones bruscas, se recomienda suavizar las máscaras (Ctrl+Clic sobre el modelo) antes de proceder a manipular la malla. Una vez establecida la máscara, se ha de invertir la selección (Ctrl + I), y es que la parte en tono más claro es a la que afectarán las transformaciones. Después, se utilizan las herramientas de Transpose (Move, Rotate, Scale) para rotar o desplazar partes específicas del modelo, valiéndose de colocar antes el pivote en su lugar óptimo para facilitar una deformación anatómica. Este pivote se puede cambiar sin afectar a la pieza si se abre el candado del gizmo de transformación. Al volver a hacer clic en él, se cierra y los cambios vuelven a aplicar a la malla.

Durante el proceso, es habitual que se generen deformaciones excesivas o se pierdan detalles en zonas de flexión. Éstas son los codos, falanges, hombros, etc. Las imperfecciones son prácticamente inevitables y han de corregirse posteriormente utilizando herramientas de esculpido suave (Smooth, Move, Inflate) o reestructurando ligeramente la superficie donde sea necesario. Es por esto que ya se ha incidido varias veces en lo importante que es no esperar demasiado para posar o habrá que repetir trabajo.

Como resumen, el momento óptimo para romper la simetría es cuando el personaje ya tiene cierto peso visual propio, pero antes de que existan detalles demasiado pulidos.

Procesos resumidos:

1. Activar Transpose Master para crear una versión combinada editable.
2. Enmascarar zonas sensibles antes de aplicar movimientos o rotaciones.
3. Realizar el posado utilizando herramientas de Transpose sobre el modelo combinado.
4. Transferir la pose de vuelta a las subtools originales.

5. Corregir deformaciones mediante esculpido leve en áreas afectadas.

### 3.2.4 Ropa y partes duras en ZBrush: Extracts

El modelado de ropa en ZBrush a partir de “extracts” generados sobre el modelo base constituye una de las formas más directas de garantizar que la prenda respete la anatomía subyacente desde el inicio del proyecto. Esta metodología no solo simplifica la integración entre cuerpo y vestimenta, sino que también permitiría, llegado el caso, ahorrar muchos ajustes posteriores.

El proceso comenzaría seleccionando la zona del cuerpo donde se desea generar la prenda, creando una máscara precisa (Ctrl + clic y pintura libre sobre el modelo). En esta fase, lo ideal sería marcar con claridad los contornos que definirían la silueta de la prenda, sin seguir al detalle todos los accidentes anatómicos, ya que en una pieza de ropa real muchos de estos quedarían suavizados por el propio material.

Una vez creada la máscara, se aplicaría la función Extract (menú de la derecha: Tool > Subtool > Extract), ajustando con especial atención el parámetro de Thickness. Aquí, resulta recomendable asegurarse de que el grosor seleccionado sea suficiente como para mantener estabilidad física en caso de impresión o moldeo, pero sin llegar a crear una prenda que se vea pesada o demasiado gruesa respecto al cuerpo.

Tras aceptar la extracción (Accept), se generaría una nueva subtool, aunque en este punto es habitual que la malla presente irregularidades en los bordes o imperfecciones menores en la superficie. Para corregirlas, se aplicaría un ZRemesh, configurado en muchos casos con Keep Groups activado para no perder la separación de áreas que ya viniera dada por el proceso de extracción.

Ahora que se dispone de una base más limpia, se podría empezar a ajustar los bordes, a mover los volúmenes donde fuera necesario y a definir los pliegues principales de la prenda. Herramientas como Move, Inflate o pinceles especializados en tela resultarían muy útiles aquí, especialmente para trabajar tensiones y caídas del material de forma natural. Se pueden sustituir estos pinceles especializados por los viejos y confiables Standard y DamStandard para conseguir las arrugas, aunque el acabado no es tan rápido de obtener.

Para evitar problemas luego en impresión, convendría revisar que no existan zonas con diferencias de grosor demasiado marcadas, ya que en piezas de pequeño tamaño esto podría derivar en roturas o en resultados poco estéticos al pintarlas. Para que se pueda moldear, revisar apartado 3.2.6.

En resumen, trabajar ropa a partir de extracts directamente sobre el modelo original no solo facilita la integración visual, sino que también asegura que las proporciones y los volúmenes de la vestimenta se ajusten de manera natural a la figura, reduciendo así problemas de adaptación en etapas más avanzadas del esculpido.

Procesos resumidos:

1. Enmascarar la zona que va a ocupar la prenda, cuidando que los bordes sigan líneas naturales.
2. Aplicar Extract y ajustar correctamente el grosor para asegurar estabilidad.
3. Aceptar el extract generando una nueva subtool que después debería limpiarse.
4. Realizar ZRemesh para corregir irregularidades y optimizar la malla.
5. Ajustar bordes y volumen antes de iniciar la esculpida de pliegues.
6. Esculpir los pliegues principales adaptándose al flujo de la tela.
7. Evitar cambios bruscos de grosor para no tener problemas en impresión o moldeo.
8. Si se va a moldear, revisar el apartado 3.2.6 del documento. Esto también simplifica las cosas de cara a impresión.



Figura 17. Selección previa al Extract



Figura 18. Pieza nueva creada con Extract

### 3.2.5 Hard Surface: Blender

Las partes duras independientes, aunque ZBrush también tiene un modo para el modelado poligonal clásico (booleans y polygroups), es aconsejable hacerlas en un programa que permita el flujo tradicional de manipular puntos y artistas con el ratón y el teclado, pues por lo general son más rápidos y requieren menos limpieza. Estas partes duras, conocidas en el sector como “hard surface” o “inorgánicas”, son mucho más laboriosas de esculpir a lápiz y tableta porque se tiene muy poco control sobre las líneas rectas y se requiere de recalcularse constantemente la malla para mantenerla limpia o de manipular cantidad de poligrupos<sup>13</sup>. Si bien para algunas piezas que sí dependen mucho de una forma base orgánica no quedaría más remedio que trabajarlas en ZBrush a raíz de hacer extracts a la pieza original, para la mayoría de los casos es mucho mejor idea modelarlas en programas externos de modelado poligonal e importarlas después en ZBrush para terminar de darles detalle e integrarlas en la pieza.

Aunque serviría cualquier software de 3D clásico, se ha escogido Blender por la versatilidad y pequeña curva de entrada que tiene, así como por su gran comunidad online de colaboradores y porque se trata de software gratuito.

Para empezar el modelo, se parte o bien de una pieza primitiva, un cubo o un cilindro en la mayoría de los casos, o bien de un modelo prefabricado de licencia gratuita. Con esta última se puede ahorrar mucho tiempo valioso, pero también es posible perderlo si viene modelado triangularmente en lugar de en base a loops. Para el modelado inorgánico no hay problema con los triángulos, pero si se pretende exportar luego la pieza a ZBrush es muy recomendable que al menos los bordes y las zonas que contribuyan a la silueta estén en quads.

Al partir de una primitiva, se divide esta en dos mitades para posteriormente eliminar la otra y añadir un modificador “mirror”. Así se consigue que al trabajar solo en una de las mitades, se transfieran automáticamente las acciones al resto. En función de las necesidades de la pieza se puede aplicar la simetría a varios ejes, o a ninguno.

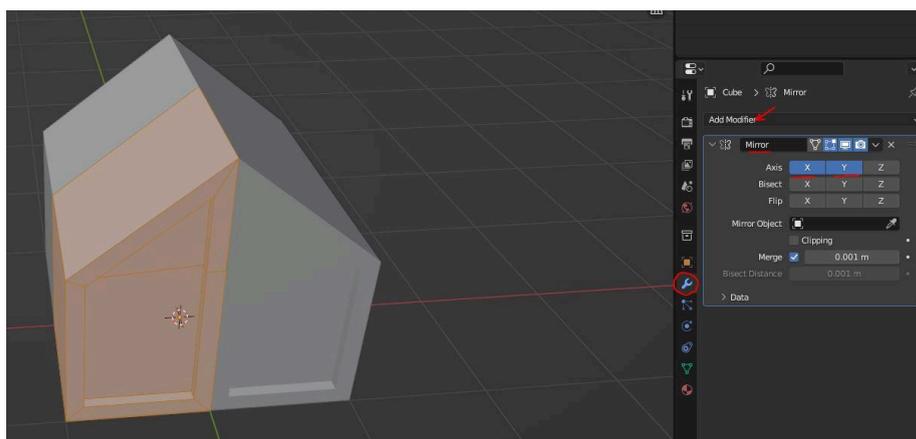


Figura 19. Modificador Mirror en Blender.

<sup>13</sup> Polygroup: cada geometría separada, sin coser, en una misma Subtool en ZBrush constituye uno.

Se van añadiendo cortes o “loops” al modelo con Ctrl+R para tener una guía para las extrusiones pertinentes que van a ir dando forma al modelo. Luego, se van extruyendo hacia dentro o hacia fuera las caras necesarias para ir dando forma a la pieza. A base de ir escalando y colocando puntos y aristas se va perfilando más la silueta del modelo final.

Por último, es necesario preparar la pieza para exportarla a ZBrush. Aunque el programa abra sin problemas una malla de pocos polígonos, esta no se va a poder modificar mucho con pinceles si no se subdivide primero con ZRemesh, Dynamesh o Division para añadirle geometría. Aparte, para añadir detalle a la pieza, hay que subdividirla sí o sí o no habrá geometría suficiente para representarlo. Preparar una pieza para que pueda subdividirse es relativamente sencillo en Blender, aunque puede ser muy laborioso en función de la complejidad del modelo.

Para entender el funcionamiento de una subdivisión, es importante saber lo que ocurre: se calcula una malla de densidad mucho mayor en base a la malla original, mediante la interpolación suavizada de los polígonos previos a su aplicación. Entonces, lo primero es añadir loops de soporte junto a las aristas principales que dan forma al modelo para que no se estas no se redondeen. Esto se hace de forma controlada, colocando los nuevos loops a una mayor distancia de la arista original cuanto más suavizado se pretenda, y a una menor distancia cuanto más dura se quiera la arista resultante.

### **3.2.6 Establecer Ejes de Desmoldeo: Diseño para Inyección**

Para posibilitar la concepción en físico por inyección en molde, es indispensable que no haya geometría opuesta a la dirección de desmoldeo, o se esta se romperá. Entonces es importante esclarecer un eje básico de desmoldeo en función de hacia a dónde apunte la mayoría del modelo. Si una parte grande de la pieza ya apunta en esa dirección, se ahorra trabajo.

Este proceso no deberá hacerse desde el principio del todo porque limitaría mucho la expresión creativa. Es preferible discutirlo algo después, similar al criterio de cuándo se rompe la simetría.

Una vez se sabe cuál es el eje principal, se procede a dilucidar qué partes es mejor adaptar al eje y cuáles directamente se van a moldear por separado. Algunas piezas pueden ser remodeladas o recolocadas para ajustarse al eje sin perder mucha expresividad. En este caso es preferible hacerlo para ahorrar trabajo posterior en seccionamiento y para abaratar los costes del molde. Otras partes será necesario hacerlas a parte, pero aún así, cada una de ellas que va por separado también tendrá su propio eje de desmoldeo que habrá que respetar.

Para no tener voladuras, se estira la geometría que pueda dar problemas con el pincel Move Topological (atajo de teclado B+M+T) hasta juntarla con otra geometría. Si el nuevo espacio estirado es grande y visible, es necesario añadir otros detalles que den vida a la zona, pero ahora respetando el eje de desmoldeo.

Una forma simple pero verdaderamente eficaz de ver bien qué encaja y qué no con la dirección de desmoldeo es hacer que el eje de desmoldeo sea perpendicular a la vista front

ortográfica de ZBrush. Para ello, se agrupan todas las subtools del modelo en una misma carpeta, se le da clic derecho y se aplica la opción “Transpose Set” en el menú de contexto que se abre. Esto permite mover, girar y escalar todas las subtools de la carpeta a la vez, en lugar de una por una. Ahora, mediante el gizmo de mover (tecla W, o botón Move, Scale o Rotate de la barra superior de herramientas) se coloca la pieza exactamente alineada con la dirección intencionada para el desmoldeo. De esta forma se ve rápidamente qué partes del modelo no están debidamente orientadas o qué partes se romperían al ser extraída la pieza del molde.

1. Elegir eje de desmoldeo en base a la dirección mayoritaria de la pieza.
2. Hacer la vista ortográfica front coincidir perpendicularmente con la dirección de desmoldeo. Para ello, agrupar subtools en una carpeta, hacer Transpose Set y colocar con el gizmo. Ahora se tiene una guía visual del eje de desmoldeo.
3. Estirar, mover y recolocar todo lo que quede contrario a la dirección de desmoldeo.

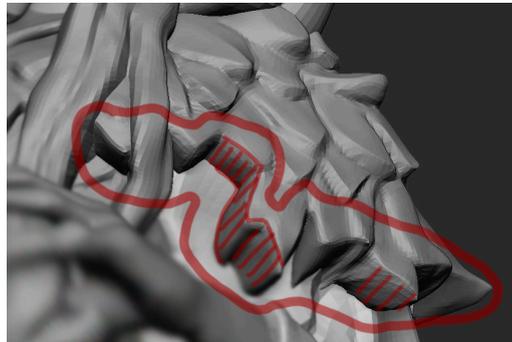


Fig.20. Ejemplo de voladura que se ha solucionado estirando geometría para respetar el eje.

Para ver decisiones técnicas y consejos con ejemplos, ver 3.5 Resultados.

### 3.2.7 Pintabilidad y Proporciones: Diseño para Pintado a Mano

Por lo general, cuando se modelan figuras detalladas se tiende a buscar proporciones y superficies cercanas a la realidad, pero para una miniatura de 28-32 mm (el tamaño objetivo de este proyecto) es necesario adaptarlas, hay que modificar ciertos aspectos tanto del diseño como de la técnica de esculpido. En una escala tan reducida, los detalles que funcionarían bien en un modelo de tamaño natural tienden a perderse o a volverse poco prácticos de pintar, por lo que la forma de trabajar debe ajustarse para ello en concreto.

El primer cambio fundamental se encuentra en las proporciones. Para garantizar que las partes esenciales del modelo conserven su legibilidad tras la impresión y durante el proceso de pintado, es habitual sobredimensionar ligeramente elementos como la cabeza, las manos, los pies y otros detalles que puedan acontecer. Asimismo, los rasgos faciales suelen reforzarse para que entre bien el pincel: se aumenta la nariz, se aumentan los pómulos, también la mandíbula, etc. Esto se hace para que una vez aplicada la imprimación (normalmente en negro o en blanco) y las primeras capas de pintura, las facciones sigan siendo identificables a simple

vista. Esta exageración se aplica de manera controlada para no desvirtuar la silueta general, pero debe ser suficiente como para evitar la pérdida de información visual.

A nivel de superficies, es aconsejable pasar mucho el pincel “Trim Dynamic” para simplificar el modelo en planos claros y definidos. El uso de transiciones duras entre distintas superficies, a pesar de no ser para nada realista, no solo mejora la legibilidad de la escultura en miniatura, sino que además proporciona guías naturales al pintor para trabajar la luz y la sombra (ver Fig.21 y Fig.22). En escalas pequeñas, las transiciones suaves suelen difuminarse o desaparecer, mientras que los cambios de ángulo más pronunciados ayudan a conservar volumen visual y a organizar el trabajo de pintura. También es cierto que un pintor muy experimentado usa un aerógrafo para pintar la dirección de la luz, y entonces ya tiene una guía, pero hay que pensar en todo tipo de pintores: en los novatos también.

El tratamiento del pelo también debe adaptarse a esta lógica: en lugar de esculpir mechones finos o buscar texturas más realistas, se modelan bloques gruesos de cabello (mechones gordos), bien separados entre sí. Esta forma de esculpir facilita la lectura del peinado a distancia y permite al pintor trabajar de forma más clara las luces y sombras dentro del volumen del cabello. Los detalles excesivamente pequeños, además, tienden a perder definición durante el proceso de concepción física, especialmente en el moldeo. Por el contrario, hay impresoras SLA de mucha calidad que podrían llegar a sacar detalles pelo a pelo, pero seguirían siendo casi imposibles de pintar a escala 28mm. Como anécdota, se podrían llegar a pintar correctamente esos microdetalles si la miniatura se imprime a tamaño mucho mayor y se usa la técnica del pincel seco (Priestley, 2008).

Otros elementos, como cinturones, hebillas o emblemas, deben diseñarse, una vez más, con una ligera sobredimensión respecto a su tamaño realista. De este modo se evita que desaparezcan bajo las capas de imprimación y pintura, y se facilita tanto la manipulación como el pintado final de la miniatura.

En resumen, adaptar un modelo a una miniatura de 28 mm implica no solo exagerar proporciones y simplificar planos, sino también modelar teniendo en cuenta cómo se va a pintar y qué elementos deben permanecer visibles y funcionales tras cada fase del proceso.

Una vez aclarados los conceptos, aquí se expone a nivel técnico el proceso:

1. Exagerar proporciones: sobredimensionar cabeza, manos, pies y rasgos faciales mediante el pincel Move o Move Topological, o mediante máscaras y escalados.
2. Simplificar los planos: usar “Trim Dynamic” (atajo de teclado B+T+D) para crear cambios de ángulo duros y definidos (ver Fig.22). Marcar bien las aristas con el pincel “Pinch” (atajo B+P+I) antes de aplicar ZRemesher.

3. Modelar el cabello: agrupar en mechones gruesos y bien separados. Para ello, primero se dibujan las separaciones entre mechones con “Dam Standard” (atajo B+D+M o usar pincel “Standard”+ALT). Después se usa el pincel Trim Dynamic para conseguir mechones definidos y planos, seguido del Standard para obtener cierto relieve en su zona central. Luego, se usa Pinch para marcar dura la arista central.
4. Sobredimensionar detalles ornamentales: asegurar visibilidad y facilidad de pintado.



Figura.21. Mano sin esclarecer superficies pintables.



Figura.22. Mano con cambios grandes de ángulo para pintado.



Figura.23. Ejemplo de pelo en miniaturas.

### 3.2.8 Esculpido de Detalles: Uso de Alphas y Modelado en High

Cuando una escultura digital en ZBrush ya está bastante desarrollada y cuenta con una resolución alta —varios cientos de miles de polígonos o incluso millones si se ha subdividido lo suficiente—, se entra en una fase final de detalle superficial, donde ya no se modifican formas generales sino que se empieza a trabajar sobre la textura visual de la malla, por así decirlo.

En este punto, lo ideal sería que las proporciones ya estuvieran asentadas y que los volúmenes principales, pliegues y cortes grandes ya se hubieran resuelto. Lo que se busca aquí es añadir microdetalle: poros, arañazos, pequeñas imperfecciones, grietas, daño acumulado, texturas propias del material que se quiere simular. Nada de eso tendría sentido hacerlo antes, porque se perdería al cambiar la topología (ZRemesh, Dynamesh, etc) o al mover los volúmenes.

Una de las herramientas más habituales en esta fase son los alphas. Se trata de mapas en escala de grises que funcionan como plantillas de relieve y que se pueden aplicar sobre la superficie con distintos pinceles. Para empezar a aplicarlos será necesario seleccionar el modo de aplicación en el menú lateral izquierdo. El modo se encuentra justo bajo el pincel que está en uso. Por defecto viene el modo Dots, que es el que se aplica a los pinceles estándar (Move, TrimDynamic, Standard, etc). Para aplicar un alpha se recomienda usar DragRect en la mayoría de los casos, ya que permite arrastrar para controlar el tamaño de la “calcomanía” a aplicar. DragDot se usa si no importa el tamaño y se necesita aplicar alphas a velocidad, lo que lo hace ideal para desperfectos pequeños como arañazos o poros. Por último, se puede usar el modo Freehand para llenar zonas grandes y homogéneas, ya que aplica el alpha de forma continua como si fuera un pincel normal y corriente.

El alpha se carga en el mismo menú lateral izquierdo, donde aparece “BrushAlpha”. Por defecto estará un círculo de bordes difusos (Alpha01), que es el que se usa de base para los pinceles estándar. Si desde ese botón se cambia la imagen, el alpha, la base a aplicar pasará a ser la nueva textura. Para cargar un alpha externo es necesario darle al botón “Import” en el menú de contexto que se abre al hacer clic en el botón de BrushAlpha.

También es común combinar los alphas con máscaras para que afecten solo a una zona concreta del modelo. Si se quiere más control, también se puede recurrir al Surface Noise, aunque no siempre da un resultado tan predecible.

Normalmente, en este momento ya se trabaja en subdivisiones altas (pasando el millón de polígonos por pieza), porque de lo contrario los detalles se pixelarían o se verían deformados.

Aparte de los alphas, se suelen usar pinceles como DamStandard, Orb Cracks o incluso versiones personalizadas hechas por uno mismo o compradas en tiendas online (pinceles en base a geometría de cremalleras, trenzas, cuernos, escamas, pelo...). Para materiales duros como piedra o metal desgastado, pinceles como Trim Smooth Border funcionan bien para dar cortes secos o roturas. Si lo que se busca es un acabado orgánico, conviene alternar pinceles de dirección fluida para que el detalle no se vea “pegado encima”, sino que tenga sentido con el flujo de la superficie.

En definitiva, esta etapa final sirve para terminar de vestir el modelo, añadiendo todo el lenguaje superficial que lo va a hacer creíble o visualmente interesante. A diferencia de en escultura digital convencional, sobrecargar detalle no es malo, aunque pierda legibilidad artística la miniatura será más divertida de pintar si todas sus partes tienen detalles y texturas.

Procesos resumidos:

1. Subdividir hasta nivel alto ( $\geq 1$ M polígonos).
2. Cargar alpha (por defecto o personalizado).
3. Elegir pincel: Standard, Layer, DamStandard, Trim, etc.
4. Aplicar alpha con DragRect o DragDot.
5. Máscara (Ctrl + clic) si se requiere zona limitada.
6. Suavizar con Shift, reforzar con Inflate.
7. Revisar con material mate (MatCap Gray).
8. Sobrecargar al gusto: toda la pieza ha de ser divertida de pintar.

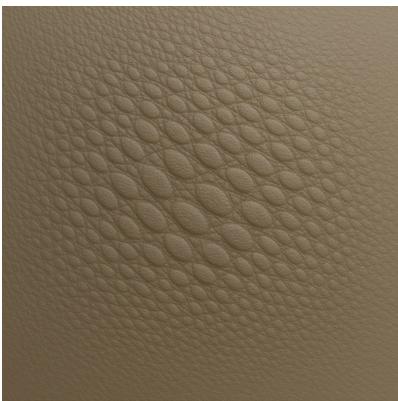


Figura.24. Ejemplo de pincel Alpha aplicado sobre un plano.

### 3.2.9 Preparación para Impresión 3D

Planificar la impresión 3D de una pieza requiere de seis cosas fundamentalmente: seccionar las partes que sea mejor imprimir por separado de la pieza principal, vaciar el interior de las piezas para ahorrar material, arreglar posibles errores en la malla, orientar la pieza de forma óptima para la impresión, diseñar los puntos de drenaje, y hacer una estructura adecuada de soportes para poder imprimir las capas por generación aditiva sin que se vengán abajo.

#### 3.2.9.1 Corrección de malla

La geometría del modelo debe ser “manifold”, es decir, cerrada. Esto implica que toda la pieza deberá tener sus vértices cosidos y no contar con un solo agujero a lo largo de su malla. No puede haber ninguna cara volteada visible desde el exterior.

Lo primero es coser la pieza. En ZBrush se pueden unir geometrías complejas mediante Dynamesh, que a pesar de ser una herramienta de retopología uniforme, también se emplea para coser mallas. Todo subgrupo de la Subtool, o sea, toda geometría separada dentro de la misma pieza, se unifica en una única malla. Entonces, la estrategia es juntar todas las Subtools que conforman la miniatura en una sola mediante la herramienta “Merge” del menú Subtool, para luego hacerle Dynamesh. La opción “Resolution” debe configurarse con un número lo bastante alto como para que tras recalcularse la nueva malla unificada no se pierda detalle. El

valor correcto no está establecido en ningún baremo, dependerá únicamente de la geometría previa. Cuanto más alto, mayor cantidad de detalle prevalecerá, eso sí, también es más probable que aparezcan errores en la malla.

Comúnmente, los problemas más típicos de Dynamesh son los agujeros que se pueden formar sobre las superficies, y los huecos mal cerrados. Lo primero se soluciona juntando mucho la geometría colindante del agujero con el pincel Pinch, para luego usar Inflate, y después volver a emplear Pinch. Después, en un nuevo Dynamesh será más probable que esta superficie aparezca ahora limpia. El segundo problema es el más difícil de percibir y el más engorroso de deshacer si es que se detecta de forma tardía y devolver la pieza a ZBrush ya no es una opción. En ocasiones, Dynamesh trata de unir huecos o cerrar agujeros y no los resuelve bien. En cambio, crea una especie de laberinto cerrado de geometría hacia el interior de la pieza. Estos entramados son pequeños y complicados de detectar porque no aparecen como geometría volteada, además, imposibilitan la posterior impresión porque suelen provocar errores en los Slicers (softwares específicos de impresión). Si se encuentran en el proceso de Dynamesh, su subsanación es la misma que la de los agujeros en la malla.

Una vez la geometría no tiene errores, se procede a suavizar las uniones de las piezas allá donde fuere necesario. Se realizarán tantas iteraciones como se considere adecuado hasta obtener una pieza satisfactoria. No obstante, para evitar pérdidas es recomendable duplicar la pieza entera antes de empezar con el proceso de juntar las Subtools con Dynamesh. De esta forma se tiene una copia de seguridad desde la que proyectar detalle con la herramienta "Project" del menú Subtool en caso de que Dynamesh haga perder excesiva calidad a la pieza. Se puede recuperar el detalle en la Subtool que recibió Dynamesh desde la original. Cuando todo esté correcto, solo queda exportar al software de 3D clásico, donde se terminará de preparar la miniatura de cara a ser cargada en un Slicer. La extensión recomendada es FBX porque mantiene la malla en quads, cosa que permite seleccionar loops. Obj, por el contrario, la triangularizaría.

1. Merge de todas las Subtools que conforman la miniatura.
2. Hacer una copia de seguridad duplicando la Subtool.
3. Dynamesh de alta resolución para no perder detalles.
4. Arreglar errores de agujeros y huecos que escapan al interior.
5. Suavizar las juntas que dejaron las Subtools originales.
6. Proyectar detalle si no se alcanzara suficiente calidad.
7. Exportar en archivo 3D, preferiblemente FBX.



Figura.25. Agujeros característicos de Dynamesh.

### 3.2.9.2 Seccionamiento

Seccionar una escultura de carga poligonal elevada no es tan fácil como pueda parecer. Es inviable hacerlo manualmente debido a la gran cantidad de caras que habría que cortar y a la de vértices que habría que coser, por no hablar de que la escultura orgánica no trabaja con mallas de loops lógicos: tampoco se podrían hacer selecciones inteligentes para definir cortes limpios. La alternativa es automatizar los cortes mediante herramientas valiéndose de operaciones booleanas, que tienden a complicarse si el corte ha de ser orgánico (ver en detalle el proceso más adelante, en la sección 3.2.10).

### 3.2.9.2 Vaciado y análisis de viabilidad

#### VACIADO

Desde algunos softwares especializados en impresión 3D se pueden vaciar las piezas, pero Blender lo permite de forma fácil y gratuita, además de que se trata de uno de los programas estándar en la industria de arte 3D, y por tanto, muchos artistas ya lo conocen bien. Es entonces más sencillo proponer el vaciado en una interfaz ya conocida.

Blender permite el vaciado de una pieza de complejidad media al añadirle el modificador “Solidify”. Para adjuntarlo es necesario ir al menú lateral derecho e ir a la pestaña con el icono de una llave inglesa, que es la pestaña de los modificadores. Una vez ahí, se hará clic en añadir (Add) y se buscará el modificador Solidify en el menú de contexto que se abre. Ahora, el modificador estará añadido al modelo que esté seleccionado en la escena (desde el 3D viewport o desde la jerarquía de objetos). Con el slider “Thickness” se regula el grosor de la pared interna. Dejarlo en 1mm es una opción segura para escala heroica según se ha comprobado. Es recomendable usar un grosor de entre 0.8 y 1.2mm.

Es importante que la opción offset del modificador tenga el valor -1 (en negativo), o de lo contrario el grosor será una extrusión hacia fuera. Para vaciar una pieza el grosor ha de ir hacia dentro. También se recomienda activar las opciones “Even Thickness” (asegura uniformidad), “Fill Rim” (comprueba que la malla esté cerrada) y “High Quality Normals” (evita errores en geometría compleja).

La documentación oficial de Blender asegura que el modo “Complex” suele ofrecer mejores resultados en geometría compleja como la de una miniatura que el modo “Simple”, que es el que viene por defecto.

Se puede ver en tiempo real el grosor interno generado antes de aplicar el modificador si se activa el modo de visualización pass-through (Alt + Z).

Por último, se aplica el modificador para que pase a tener efecto real sobre la malla, pues lo que se ve antes no es más que una previsualización.

Procesos resumidos:

1. Añadir modificador Solidify.
2. Cambiar de modo Simple a modo Complex

3. Especificar un grosor entre 0.8 y 1.2mm en Thickness.
4. Marcar las casillas Even Thickness, Fill Rim y High Quality Normals
5. Aplicar el modificador.
6. Activar el addon 3D Print Toolbox, si no está activado, desde Edit>Preferences>Addons.
7. Abrir el panel lateral con N e ir a la pestaña 3D-Print.
8. Escanear la pieza con Check All.
9. Si hay manifold, usar la herramienta Make Manifold de la pestaña 3D-Print.
10. Si se detectaron problemas de grosor (thickness), volver a aplicar Solidify.
11. Escalar el modelo al tamaño deseado para la impresión con Scale To en la pestaña 3D-Print.
12. Orientar la pieza para ahorrar soportes a futuro y evitar la pérdida de detalles importantes.
13. Exportar a STL u otro formato.

Es difícil calcular un porcentaje genérico exacto porque depende del tamaño de la pieza y del grosor de la pared, pero vaciar las piezas reduce el gasto de resina en bastante más de la mitad. No obstante, las piezas huecas requieren sí o sí de agujeros de succión, puesto que de lo contrario el material se quedaría atrapado dentro y no se curaría en el tratamiento de luz UV posterior a la impresión. El secado irregular puede provocar deformaciones durante la impresión y, ya a largo plazo, la aparición de grietas (Redwood et al., 2017).

Es sencillo crear agujeros de drenaje en Blender. Simplemente se añade un cilindro y se coloca y escala adecuadamente para conseguir que atraviese la malla por completo, y siempre en la base del hueco a vaciar; la resina cae por la fuerza de la gravedad, el agujero deberá estar abajo del todo.

Luego, añadiendo un modificador booleano a la pieza grande (la miniatura) en sus valores por defecto (modo "Difference") se corta la malla por donde estaba el cilindro. Para añadir un modificador se ha de ir al menú lateral derecho y a la pestaña con icono de llave inglesa. Para indicarle al modificador Booleano con qué pieza cortar, se selecciona la "pipeta" del propio modificador y se hace clic en el objeto en cuestión desde la escena 3D; en este caso es el cilindro. Para efectuar el corte se ha de aplicar el modificador (desplegable superior derecho en el propio modificador y estando siempre en el modo "objeto" del Viewport 3D. TAB para alternar entre modo objeto y modo edición).

No obstante, al aplicarse la acción el hueco no aparece vacío, solo cortado. Será necesario, posteriormente, entrar al modo edición de la pieza (TAB) y seleccionar la geometría correspondiente al hueco con la tecla "L", que ahora estará separada del cuerpo general de la pieza. Luego, se separa a otro objeto con "P -> Selection", y por último, se ha de eliminar la nueva pieza que se ha generado. Quedará un corte limpio y cerrado.

Se recomienda vaciar solo las piezas más grandes. También solo aquellas que puedan permitirse tener un agujero de drenaje sin que éste estropee la estética de la pieza. Normalmente se colocan bajo los pies de la miniatura, que es donde no se verían.

Las piezas pequeñas no se deben vaciar porque la succión del material, mucho menor en piezas sólidas, tiende a hacer las paredes del objeto más delgadas. Esto, en una pieza de poca dimensión podría colapsar su estructura. Como en miniaturas la escala ya es pequeña de por sí, es mejor mantener partes pequeñas que han sido separadas del cuerpo, como cuernos, orejas, armas o incluso extremidades, en sólido, sin ahuecar. Si se diera el caso de que una pieza grande incluyera detalles finos como dedos de las manos o pies, lo mejor es no vaciar esas partes, solo el resto.

En caso de que tras verificar los resultados del proyecto vaciar las piezas en software 3D clásico como Blender se estime insuficiente o poco preciso, existe una opción más confiable, que es hacerlo en los Slicers, aunque suele ser una función de pago.

## ANÁLISIS DE MALLA EN BLENDER

Para seguir con la preparación del modelo y garantizar que la malla no contiene errores que impidan su concepción en físico, es buena idea utilizar el addon oficial de Blender para impresión. 3D Print Toolbox ya viene descargado con Blender y se activa buscándolo y marcando su casilla correspondiente en Edit > Preferences > Addons. Este añadido de Blender escanea de forma mucho más precisa las mallas que los softwares de impresión 3D (slicers), que por lo general solo buscan agujeros en la malla. Una vez instalado, su interfaz aparece en el menú lateral (tecla N) bajo la pestaña “3D-Print”. Si se hace clic en “Check All”, Blender escanea automáticamente la pieza entera en busca de errores.

La herramienta encuentra ejes “non-manifold” (bordes que no forman parte de una superficie cerrada), comprueba que el grosor de las paredes es uniforme y suficiente en todas partes, y detecta caras que intersecan entre sí.

Hay opciones para arreglar los errores automáticamente. “Make Manifold” intenta coser los bordes abiertos.

La opción “Scale to” permite escalar el modelo a dimensiones específicas de tamaño. La escala heroica, la más común en miniaturas de wargames, es entre 28 y 32mm.

## ORIENTACIÓN

También es necesario orientar la pieza, es decir, colocarla en la posición óptima para impresión, cosa que tiene un impacto directo en la cantidad y ubicación de soportes necesarios, en el nivel de detalle que se conserva, en el tiempo de impresión y uso de material y en el riesgo de fallos por succión o deformaciones (filament2print, 2023). Esta orientación se puede hacer en el software de 3D, Blender en este caso, pero es preferible hacerla después en el software de impresión para ver en tiempo real cómo afectan los soportes. Los pasos a seguir para una correcta orientación en piezas de resina son:

1. Elevar el objeto ligeramente sobre la plataforma de construcción, que es el suelo de la impresora. Esto reduce el efecto de succión de la resina (no aplicable a termoplásticos en impresión FDM). También evita que ocurran errores de tamaño en las capas de la

pieza, ya que es en las primeras donde se producen la mayoría de inexactitudes porque se está calibrando la impresión.

2. Poner la parte con más detalles finos o con más protagonismo entornada boca arriba o directamente paralela a la plataforma de construcción (el suelo) por dos motivos fundamentales:
  - Reducir drásticamente la cantidad de soportes en esa zona clave, por lo que apenas quedarán marcas después de retirarlos que puedan potencialmente afean la pieza.
  - Evitar el efecto “stair stepping”, que son líneas de capa visibles. Esto aparece de forma evidente en superficies verticales. Al entornar la pieza, es mucho menos evidente.
3. Las partes que se han separado del modelo porque requeriría muchos soportes imprimirlas en conjunto en una sola pieza, deberán ir orientadas verticalmente para ahorrar material y a la vez reducir drásticamente el número de soportes. Esto fomenta la aparición de stair-stepping, pero si se trata de partes poco protagonistas y con menos variación de relieve, no es un problema.

### 3.2.9.3 Procesos en el Slicer

Si bien es posible hacer los soportes en Blender mediante addons no-oficiales como “Auto-Support Generator”, hacerlo no es recomendable ni mucho menos. Ni en Blender ni en ningún software 3D tradicional. Esto conllevaría un trabajo manual arduo y sin la posibilidad de validar de manera automática los ángulos críticos ni las colisiones, como sí que se puede hacer con software especializado. Estos programas específicos para impresión se denominan “Slicers”, y no usarlos, en este caso, implica olvidar zonas que sí que necesitan soporte, por no mencionar que sin la optimización de puntos de contacto, los soportes también podrían destruir detalles importantes de la pieza.

Esto es especialmente crítico para impresiones detalladas como la SLA con material de resina. Usar un Slicer es mandatorio.

El software elegido ha sido Lychee Slicer (7.3.2), que cuenta con una versión gratuita muy potente y una interfaz accesible, con una curva de aprendizaje mucho menor que software industrial complejo.

Si bien los soportes automáticos suelen ser lo suficientemente precisos, tratan casi por igual cualquier zona y no concretan casos específicos, de ahí que sea mejor hacerlo manualmente. Esto es especialmente importante para resina, el material predilecto para miniaturas, puesto que existen complicaciones añadidas: la fuerza de succión y el drenaje.

El orden de procesos en un slicer usando el método manual de colocación de soportes por islas es:

1. **Colocación:** disponer las piezas a lo largo de la placa de forma equilibrada para evitar descompensaciones que provoquen falta de precisión al crear las capas. Como las impresoras SLA suelen imprimir boca abajo, es decir, con las piezas colgando de la placa

para sumergirlas en el tanque, el equilibrio de peso es mucho más importante que en impresoras de termoplásticos por FDM.

Aunque parezca lógico imprimir todas las piezas en el centro de forma escalonada para ahorrar anchura de capa, no es buena idea porque aumenta mucho el número de capas. Han de ir separadas en el eje horizontal. Eso sí, se ha de equilibrar la distribución entre lado izquierdo, derecho, delantero y trasero de la placa base de la impresora o se generará más peso en un lado, imprimiendo mal las capas.

- 2. Orientación:** si bien ya pueden venir orientadas del software de 3D, es mejor hacerlo aquí, ya que se ve en tiempo real dónde estarían los “overhangs” (zonas a soportar).

Como regla general, cuando todo va en una pieza o se trata de un figura compleja que no merece la pena dividir, orientarla 45º tiende a ser una buena opción para equilibrar calidad y gasto de material. En figuras humanoides, este ángulo evita tener que soportar la cara, ya que no se generan overhangs en las cuencas de los ojos o la punta de la nariz. Ante la duda, 45º es una buena solución.

La parte protagonista de una figura casi siempre es la vista frontal, por lo que se deberán orientar las piezas boca arriba como regla general, a no ser que sean piezas poco protagonistas u otro tipo de excepciones.

En resina siempre se ha de dejar una altura vacía inicial para que la succión afecte menos a la pieza. Esto aumenta el gasto de material porque todo ha de llevar un mínimo de soportes, pero evita roturas al tratar de despegar la pieza de la placa.

La cabeza siempre en un ángulo casi paralelo a la base de la impresora para una mejor calidad si es que hay posibilidad técnica de imprimirla por separado. Del todo paralela sería contraproducente porque generaría excesivos defectos en la parte trasera por exceso de soportes.

Buscar un balance entre partes apuntando directamente hacia arriba, que al requerir de menos soportes ahorran material a coste de calidad (efecto stair stepping), y cross sections muy grandes para buscar la máxima calidad, que aumentan mucho el gasto de resina y pueden empeorar la parte trasera de la pieza por exceso de soportes. Un acercamiento equilibrado entre estas dos opciones es lo mejor, a no ser que se disponga de las partes separadas en piezas y se pueda incurrir en casos específicos por necesidad de cada parte.

No se deben poner muchos soportes en partes finas, por lo que armas y similares deberán tener cierta inclinación, nunca constituir un overhang grande. Podrían romperse al retirar tanto soporte porque son zonas débiles por su grosor. Es preferible, entonces, colocar un exceso de soportes en otra zona más robusta aunque se gaste más material, que orientar la mayoría de la pieza sin overhangs, pero con partes muy finas soportadas.

3. **Vaciado:** también es posible hacerlo en un Slicer, aunque tiende a ser una funcionalidad de pago (ver 3.5 Resultados para más detalle acerca del proceso). En esta metodología, ya se ha expuesto cómo hacer el vaciado en Blender.
4. **Drenaje:** lo mismo que ocurre con el vaciado, pasa también con el drenaje (ver 3.5 Resultados).
5. **Identificación de Islas:** existen varios métodos para soportar un modelo en Lychee, entre ellos el automático, que es muy rápido y funciona bastante bien cuando se conocen los principios. Aún así, como el acabado que se pretende alcanzar ha de ser lo más profesional posible, se ha optado por la colocación manual en función del cálculo de islas. De esta manera, se puede hacer una estructuración rápida de los puntos débiles a la hora de imprimir para soportarlos, y además, se pueden colocar manualmente los soportes de forma que se puedan elegir los grosores de éstos en función de la zona afectada. Esto permite un mejor acabado tras la retirada de los soportes, incurriendo en una cantidad minimizada de witness marks en el modelo final impreso.

En Lychee, una vez orientada la pieza, lo primero es ir a la pestaña “Prepare” del menú central superior. Aquí, con la pieza previamente seleccionada, se hará clic en la herramienta “Support” de la barra lateral izquierda. Ahora, será necesario ir a la pestaña “Island” del menú lateral derecho. Una vez aquí, simplemente se hará clic en el botón “Search Selected” para detectar las islas. Luego, aparecerán en la escena una serie de bolas rojas a lo largo de las zonas marcadas en amarillo por constituir un overhang; espaciadas a cierta distancia entre sí.

Esto son las islas. Una isla existe cuando una nueva capa de impresión no tiene material debajo sobre el que construir. Es diferente de un overhang en que éste último no tiene porqué dar error en impresión si hay zonas cerca soportadas, pero toda isla sí que es un overhang; de hecho, es un overhang crítico.

Si se ha seccionado la miniatura en partes para una correcta orientación, el número de islas encontradas será mínimo. En este caso (ver Fig.26), tan solo se han encontrado 9. No obstante, es común encontrarse con varios cientos de islas en esculturas que van en una sola pieza, como es el caso de la mayoría de tutoriales y guías de internet. Para estos casos donde hay mucha isla, se puede recalcular la búsqueda marcando un “area filtering” mayor de 0 en el menú de islas, lo que reducirá la aparición en pantalla de islas superfluas que flaco favor haría soportarlas. Aún así, para un proyecto como este, donde todo está seccionado, no será necesario.

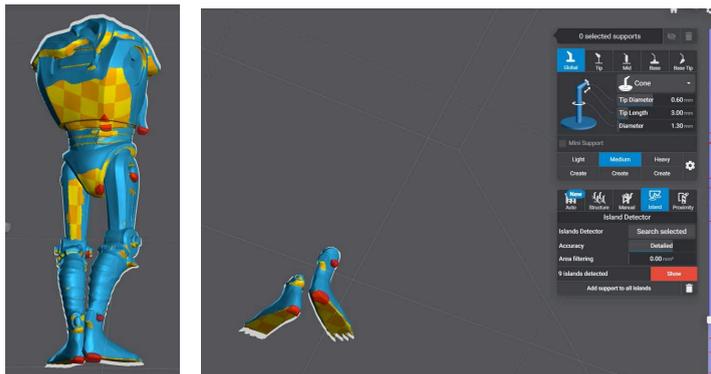


Fig.26. *Cómo identificar islas en un modelo. Lychee Slicer.*

## 6. Colocación de Soportes

Para soportar una isla, se ha de seleccionar el tipo de soporte a usar en el menú lateral derecho (ver Fig.26). Existen tres: el “heavy” o pesado, el “medium” o mediano, y el “light” o ligero. Por lo general, el último tipo se empleará solo en casos muy concretos, ya que soporta muy poco la pieza. Como regla de oro, se recomienda desde la documentación de Lychee colocar tres soportes por isla: uno pesado justo en el centro de la isla y otros dos medianos muy cerca para reforzarlo (casi llegando a intersecar). Mediante la barra espaciadora es posible modificar un soporte. Esto añade una serie de controles y articulaciones controlables para modificar la angulación y la punta; también permite cambiar el tipo de soporte. Muy útil para redistribuir el peso. Analizando la orientación de la pieza se puede inferir de qué dirección es preferible hacer que venga una articulación del soporte para hacer contrapeso a la fuerza de la gravedad. Es importante equilibrar los soportes entre sí.

Una vez la base ya esté robustamente soportada, es recomendable seguir colocando ahora soportes más finos incluso que el preset light, ya que el tamaño reducido de la miniatura lo hace posible. Para ello, se cambiará manualmente el grosor de la punta o “tip diameter” desde el menú lateral derecho donde se eligen los presets.

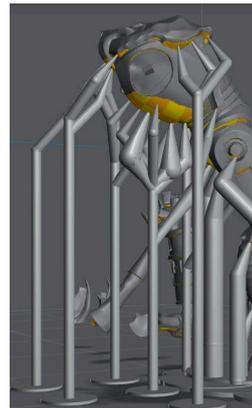


Fig.27. Colocando soportes en Lychee Slicer.

## 7. Estructuración: bracing y raft

Para aumentar la estabilidad estructural de los soportes durante la impresión se añaden “bracings”. Ayudan a que los soportes no se muevan ni vibren con la acción del “peel” (separación de la capa) o por el peso de la pieza. Evitan el “shifting” (pequeños desplazamientos de capa) y las fallas por falta de rigidez, que podrían dejar la pieza colgando o provocar errores parciales.

Visualmente se trata de un andamio que une los soportes entre sí. Incurren en mayor gasto de resina, pero son extremadamente recomendables para adherir bien la pieza a la placa y que no se pierda en el fondo del tanque, donde no se va a seguir imprimiendo.

El “raft” se traduce literalmente como “balsa”, y es precisamente eso, una especie de balsa horizontal que se adhiere a la placa bajo a las piezas para mejorar el agarre. Es una forma de sustituir las bases genéricas de los soportes y los bracings por una versión estructuralmente robusta pero con huecos para ahorrar resina y a la vez evitar que la pieza se desprenda.

Añadir bracings es sencillo en Lychee. Desde la pestaña Prepare de la barra central, se busca en el menú lateral derecho el botón “Add/Update Bracing” y se generará automáticamente un andamio que unirá los soportes existentes en la pieza seleccionada en la escena de forma estructuralmente robusta.

Añadir un “raft” es parecido, pero en el menú lateral izquierdo en su lugar. Una vez seleccionada la ventana “Raft” aparecerán opciones predeterminadas de bracing. Se recomienda encarecidamente la raft “Line Triangle”.

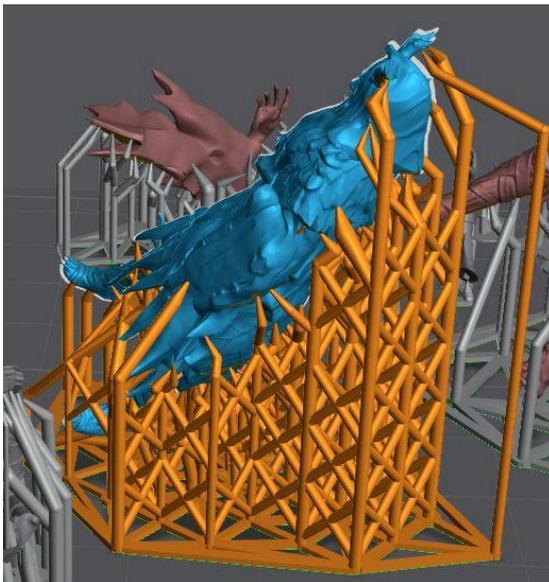


Fig.28. Bracing (naranja) en una miniatura del proyecto.

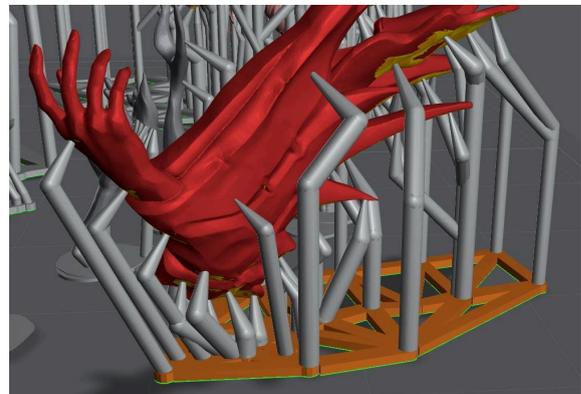


Fig.29. Raft (naranja) en una miniatura del proyecto.

## 8. Exportación

Los slicers permiten seleccionar una impresora objetivo para enviar el proyecto. Por tanto, es posible hacer la exportación en una extensión de archivo específica de la impresora SLA en cuestión, que ocupa menos espacio en disco. No obstante, en caso de error de importación en el software específico de la impresora, es posible exportar la escena como archivo de 3D triangularizado. Las opciones tienden a ser STL u OBJ, que no almacenan quads.

### 3.2.10 Preparación para Moldeo por Inyección

#### 3.2.10.1 Aplicación de ejes de desmoldeo

En ZBrush es posible mover varias subtools a la vez. Para ello, se han de juntar en una carpeta. En el menú Subtool hay un botón “Folder”. Al pulsarse, aparece una nueva que engloba jerárquicamente a la subtool seleccionada antes de ser creada. Luego, el resto de piezas que se pretenda mover en conjunto han de meterse también en ella. Para esto, sencillamente se requiere de hacer clic en la pieza y arrastrarla y soltarla en la carpeta, ya sea en la propia folder o en la línea azul que aparece junto a una subtool que ya estaba previamente en la carpeta. Ahora que todas las piezas a mover en conjunto están bajo la misma jerarquía, se procede a hacer clic derecho en la carpeta y a aplicar “Transpose Set”. Esto

permitirá mover con el gizmo de movimiento todas las piezas incluidas en ella como si fueran una sola. Para mover mediante gizmo se recuerda que está accesible en la barra de herramientas superior, a la izquierda del todo y junto al botón “Draw”.

De cara a facilitar la adaptación del modelo al eje de desmoldeo, es muy recomendable mover la miniatura entera mediante el gizmo y teniendo Transpose Set aplicado a toda la figura, para hacer que la vista frontal ortográfica coincida perpendicularmente, es decir, formando 90º, con el eje de desmoldeo. El eje se dictaminará como aquella dirección hacia la que más caras del modelo apunten.

Una vez hecho esto, se deberá reiniciar el programa para que las piezas se deshagan del “Transpose Set”, que al aplicar un shader al resto de subtools del grupo, es molesto para modelar, por no mencionar que ninguna de ellas se puede mover por separado mientras esté activada esta opción.

Ahora, adaptar la miniatura al eje de desmoldeo es mucho más fácil. Simplemente hace falta colocar la vista en front o frontal (shift + clic o desde el gizmo de vistas de la zona superior derecha) y mover toda geometría que vaya a suponer una voladura. Una vez se ha terminado de ajustar toda la parte delantera de la miniatura se ha de repetir el mismo proceso, pero ahora desde la vista back o posterior.

Es posible esclarecer varios ejes de desmoldeo, pero en miniaturas, atendiendo a ejemplos prácticos reales se puede observar cómo la vasta mayoría de las veces solo se emplea uno por motivo de abaratar costes de producción. Entonces, todo aquello que no vaya a favor del eje y que no sea adaptable, simplemente se corta y se separa de la pieza principal para recolocarla luego en el molde ahora sí de acuerdo al mismo eje de desmoldeo que el resto de la miniatura.

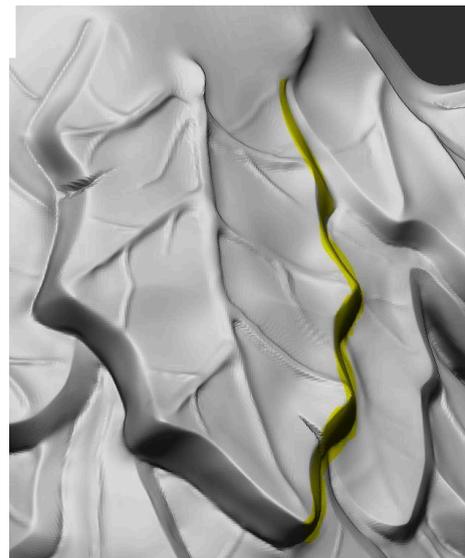
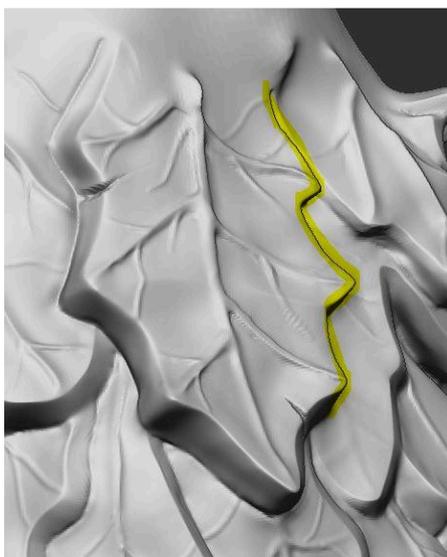


Fig.30. Miniatura del proyecto antes de adaptar a desmoldeo.

Fig.31. Después de adaptar al eje.

### 3.2.10.2 Seccionamiento

Cuando la pieza ya se ha creado en función de un eje de desmoldeo y se han identificado las partes que van en contra, lo único que resta para tener la miniatura lista para moldear es separar en partes ensamblables dichas zonas contrarias al eje de desmoldeo.

Existen dos tipos de corte: los sencillos y los orgánicos. Los primeros, como son totalmente lisos, pueden requerir de pestañas o “keys” para asegurar que la figura se monta en la angulación pretendida por el diseño, y los segundos, al tratarse de superficies de unión irregulares, no. Esto se debe a que no existirían formas de ensamblaje alternativas: solo encajan de una manera.

#### CORTES SENCILLOS

Los cortes se pueden hacer tanto en el propio ZBrush como en software de 3D clásico, pero son mucho más rápidos en el segundo.

La opción más evidente en Blender es la herramienta “Bisect”, que permite dividir un modelo en dos mitades con aristas en loop (seleccionables). El resultado se rellena después con Fill (tecla F una vez se tiene seleccionado el borde). Esta herramienta funciona peor si el corte es complejo, puesto que no se pueden añadir varios puntos de ruta al seccionamiento. No obstante, existe una alternativa muy robusta a Bisect dentro del programa, las operaciones Booleanas (ver más adelante).

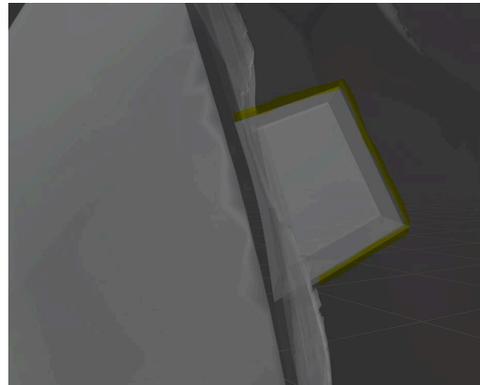
Una vez se ha rellenado el corte, pudiere ser necesario añadir una key para ensamblaje. Normalmente, se considera positivo no incluirlas, ya que ofrece opciones de personalización al cliente o como se conoce en el sector, de realizar “conversiones”. Sin embargo, si la colocación de la pieza con la angulación intencionada en el diseño se considera preferible por motivos de equilibrio estructural de la pieza o de silueta, es plenamente legítimo forzar la unión mediante keys o pestañas de ensamblaje. Es posible que una colocación arbitraria hiciera bascular la miniatura hacia un lado y se cayera por su propio peso, por ejemplo, o que el resto de la miniatura esté diseñada adaptando la anatomía a una pose concreta y que esta se vea mal si el montaje es diferente al intencionado.

Para añadir Keys se sigue la misma estrategia que para hacer agujeros de drenaje en Blender (ver apartado 3.2.9.2), que consiste en añadir un objeto de la forma primitiva más similar a lo que se pretende y añadirla a las figuras de la miniatura mediante operaciones booleanas. En este caso, la mejor opción es partir de un cubo y colocarlo en medio de la unión de las dos piezas. En una de ellas, usualmente en la más pequeña, se crea la pestaña mediante el modificador Boolean en modo “Union”. Una vez unido el cubo a la pieza, se escalará la cara saliente de la pestaña, la que hará contacto con el hueco al ensamblar, para hacerla en torno a un 10% más pequeña que la base de la pestaña. Esto no es obligatorio, pero ayuda a una mejor sujeción del pegamento.

Para hacer el hueco en el que encaja la pestaña, se repiten las mismas acciones, pero ahora con el Boolean en su modo por defecto, que es “Difference”, pero antes de proceder a la operación booleana, hay que dejar un pequeño hueco extra o no se producirá el encaje. Según

Malloy (2015), un 5% extra en el agujero de una pestaña es suficiente. La manera más rápida de hacer esto en Blender es directamente manipular las dimensiones del cubo en su Transform (tecla “N”).

Fig.32. Hueco (en amarillo) que se deja entre una pestaña y su cavidad de acoplamiento.



### CORTES ORGÁNICOS

Para hacer una operación booleana en ZBrush, lo primero es colocar la subtool que va a “restar” geometría de la pieza grande justo debajo de esta. Luego, se cambia la subtool que sustrae del modo “sum”, el que viene por defecto, al modo “subtract”. Estos modos son botones pequeños en forma de esferas entrelazadas que se encuentran en la jerarquía de subtools, dentro de la caja correspondiente a cada una de ellas, junto al icono para activar o desactivar la visibilidad de la subtool.

Para ver en tiempo real y poder corregir el corte, es necesario activar la opción “Live Boolean” en la barra central superior de herramientas. Una vez se está satisfecho con el corte, se aplica en el menú lateral derecho: en el submenú Subtool > Boolean está el botón “Make Boolean Mesh”. Ahora se ha generado una nueva subtool que es la resta de ambas partes, pero no se añade visiblemente a la escena, sino que se queda cargada en el limbo del proyecto. Para materializar la nueva pieza, se procede a añadir una nueva subtool desde el submenú Subtool y el botón Append. Entre las opciones para añadir sale la pieza recortada.

Si se quiere obtener la otra mitad, es necesario hacer la intersección entre las dos piezas, pero ahora la grande es la que se coloca debajo de la pequeña y la que tiene que cambiar su modo a “Intersect”. La pieza pequeña deberá estar en modo “Sum” y colocada arriba en la jerarquía con respecto de la grande. El resto del proceso es el mismo que con el corte anterior.

Procesos Resumidos:

1. Si el corte es sencillo se hace en software clásico de 3D con la herramienta “bisect”.
2. Para hacer un corte complejo con mucha geometría, emplear operaciones booleanas en ZBrush.
3. Para obtener la primera mitad se coloca la pieza que se va a restar de la grande debajo de ella y en modo “Subtract”. La grande encima y en modo “Sum” (por defecto).
4. Se activa Live Boolean en la barra central de herramientas.
5. Se ajusta el corte moviendo la geometría de las subtools en la escena con pinceles como Move o Move Topological.

6. Se aplica el corte desde Subtool > Boolean > Make Boolean Mesh.
7. Se añade la subtool nueva desde el menú de contexto de Subtool > Append.
8. Para obtener la segunda mitad se repite todo el proceso, pero ahora con la pieza grande debajo de la pequeña y en modo "Intersect". La pequeña va colocada encima y en modo "Sum".

### 3.2.11 Materialización en físico

#### IMPRESIÓN 3D

A la hora de imprimir en resina, hace falta reunir una serie de preparativos previos, y es que, a diferencia de en impresión FDM con termoplásticos, se requiere de procesos extra y de tratamientos químicos.

Lo primero y más evidente es contar con la impresora SLA, pero también hace falta una estación de curado ultravioleta (UV) para terminar de solidificar las piezas. Luego, es necesario contar con material para imprimir, en este caso resina, y después, con químicos para terminar de limpiar las piezas.

Al imprimir a escala pequeña, es recomendable obtener una resina algo mejor que la estándar para reducir la probabilidad de fallos estructurales y de rotura al retirar soportes.

Una vez haya terminado la impresión, se procede a retirar la placa, que es donde se encuentran las piezas. Luego, se cierra la impresora para evitar que se seque la resina del tanque, por el momento. Ahora, con mucho cuidado se tratan de retirar las partes de la placa con una espátula o un rascador. Es importante evitar rayar la placa o se podrían comprometer futuras impresiones, puesto que la superficie pasaría a ser irregular. Este proceso puede romper piezas si no se hace con precaución.

Lo siguiente es retirar los soportes. La mayoría salen sin mucho esfuerzo, pero hay que tener especial cuidado de no romper partes pequeñas en el proceso. También puede ocurrir que sea difícil identificar piezas especialmente diminutas y se confundan con soportes, por lo que se aconseja que aquél que retire los soportes conozca bien la figura que se está imprimiendo para que no se descarten por error piezas de la miniatura.

Las partes impresas han de ser sumergidas en una cubeta con alcohol isopropílico. Esto tiene como función eliminar los restos de resina líquida no polimerizada que permanecen adheridos a la superficie de la figura. La pieza sale recubierta de una fina capa de resina que todavía está líquida. Si no se limpia esta capa, la resina impresa puede polimerizarse de forma irregular durante el curado UV, generando manchas, pegotes o texturas no deseadas. También puede quedar pegajosa o frágil, afectando su acabado final y sus propiedades mecánicas. Con un lavado algo superior al minuto es más que suficiente para piezas pequeñas como la escala heroica.

Una vez limpia de resina líquida, la pieza ha de ser curada con luz ultravioleta. Dependerá de la potencia y del tipo de estación de trabajo, pero como norma general no se

han de pasar más de 5 minutos unas miniaturas a escala heroica. Lo mejor es hacer pasadas cortas para ir viendo la cantidad de curado y no sobreexponer las piezas. Este proceso hace las partes impresas más fuertes y resistentes, además de fijar su forma, porque termina el proceso de polimerización de la resina.

Hechos ya los procesos de lavado y curado, solo queda montar la figura. Para ello se emplea pegamento fuerte como el cianocrilato, y en solo una de las mitades a pegar, pues el agarre ya es más que suficiente, y al haber menos volumen de sustancia, el secado es más rápido y se evita la aparición de burbujas.

Por último, cualquier imperfección de la superficie que dificulte la legibilidad de la pieza ha de ser limada, ya sea con papel de lija muy fino o con una lima de modelismo o similar. Los soportes que hayan partido mal y estén adheridos a la miniatura se podrán quitar rascando con el mismo dedo en la mayoría de los casos. Si persisten, es preferible utilizar un cutter con precaución y después limar la superficie.

#### MOLDEO

No se abordará en este proyecto el proceso de creación de moldes para inyección, puesto que los empleados habitualmente en la fabricación de miniaturas son moldes metálicos de notable complejidad, cuya concepción y desarrollo competen al ámbito ingenieril y no al artístico, que constituye precisamente el público al que se dirige este trabajo. Si bien es cierto que podría resultar de interés conocer de manera superficial cómo funcionan dichos moldes, lo cierto es que su elevado coste solo los hace rentables para empresas con un volumen de producción considerable, quedando así fuera del alcance de trabajadores autónomos o pequeños estudios que comercializan sus modelos en internet, enfoque este último que define el propósito central del proyecto. No obstante, sería posible fabricar moldes blandos en un entorno doméstico, aunque este tipo de soluciones dista mucho de representar el estándar industrial para el cual se diseñan normalmente las miniaturas. Y es que, en caso de que un modelador llegase a orientar su labor hacia la producción mediante moldes, lo haría formando parte de la plantilla de una empresa especializada en tales procesos, que trabajan con los de metal.

### 3.2.12 Comercialización: Portales de Venta Online y Posicionamiento de Producto

Solo se tendrán en cuenta para la venta real del producto las plataformas orientadas a la impresión 3D, dado que la inyección en moldes es un modelo de negocio principalmente de empresas grandes de producción de miniaturas, no para freelancers.

Las plataformas de venta a estudiar de cara a la venta de miniaturas en formato STL para impresión 3D, dada su popularidad, son las siguientes. Para ver la opción final escogida, véase 3.5 Resultados.

Plataforma	Comisión	Modelo de negocio	Ventajas
<b>MyMiniFactory</b>	10-15%	Venta directa y suscripciones.	Muy enfocada a miniaturas, tiene integración de campañas, licencias claras.
<b>Cults3D</b>	20%	Venta directa.	Creadores con enfoque en visibilidad.
<b>CGTrader</b>	12-30%	Venta directa y freelance.	Mercado amplio de 3D, posibilidad de vender licencias extendidas.
<b>Etsy</b>	5% + tarifas	Venta de productos digitales.	Vendedores de productos artesanales.
<b>Patreon</b>	5-12%	Suscripción mensual.	Ingresos recurrentes por contenido mensual exclusivo. Gran visibilidad.
<b>Fab</b>	12%	Venta directa.	Gran visibilidad. Aunque es sobre todo para assets de videojuegos por ser la tienda de Epic Games, no deja de ser un merge con la antigua Sketchfab, por lo que se siguen vendiendo sculpts sueltos en STL.

Tabla 3. Plataformas de venta online ideales para miniaturas en STL.

### 3.3 Recursos requeridos

#### RECURSOS MÍNIMOS NECESARIOS PARA REPLICAR EL PROYECTO

- CPU de gama media.
- GPU de gama media.
- Memoria RAM con al menos 4gb.
- Una tableta de dibujo digital con gestión de presión.
- Conexión a Internet.
- Acceso a documentación amplia y referencias.
- Editor de texto y de hojas de cálculo.
- ZBrush.
- Blender.
- Cualquier Slicer.
- Impresora SLA con un mínimo de 50 micrones de precisión.
- Estación de curado UV.
- Resina para impresión.
- Alcohol Isopropílico
- Herramientas de modelismo.
- Pegamento fuerte.

Estos requisitos tienen en cuenta que se trabaja con muchos modelos renderizándose a la vez por escena para mayor comodidad y velocidad, si se trabaja por asset aislado, los requisitos de hardware se reducen en cierta medida.

#### RECURSOS OPCIONALES O CONCRETOS QUE SE HAN UTILIZADO

- Procesador Intel Core i5-13600 KF (20 CPUs), 3.5GHz.
- NVIDIA GeForce RTX 4070 Ti, 12gb VRAM.
- 32gb RAM.
- Internet con 1000 mbps de velocidad de descarga.
- Cuenta de Google (Docs, Sheets, Drive).
- Adobe Photoshop.
- Huion Canvas Pro 13.
- Lychee Slicer Premium (puede sustituirse por Chitubox u otro slicer)
- Anycubic Photon Mono 2.
- Caja de luz UV Deruc Rotary de 405nm.
- Resina Elegoo ABS-Like 3 Pro de 1kg.
- Alcohol Isopropílico en spray (preferible en líquido).
- Herramientas de modelismo Citadel: limas, masilla, cutter.
- Cianocrilato.

### 3.4 Viabilidad e implementación

Este proyecto tiene como finalidad el desarrollo de un set de miniaturas orientado tanto a la impresión 3D como al moldeo por inyección, junto con toda la documentación técnica que recoge el proceso seguido, los criterios aplicados y las distintas soluciones que se han ido adoptando, con la idea de sentar una base que permita, si se diera el caso, trasladar el producto a un entorno industrial con ciertas garantías.

Desde una perspectiva económica, conviene señalar que en esta fase no se han contemplado un análisis detallado de costes ni un estudio exhaustivo de amortización del tiempo invertido, y es que el objetivo principal ha pasado por asegurar la viabilidad técnica del diseño, validar todo el flujo de trabajo y dejar debidamente recogidas las consideraciones necesarias para que, llegado el momento, pudiera plantearse una fabricación en serie con los ajustes pertinentes. Quizá por la propia naturaleza del proyecto, que supone el primer desarrollo de estas características y que, de hecho, ha requerido abordar herramientas y metodologías no conocidas previamente por el autor, el esfuerzo se ha dirigido casi en exclusiva a garantizar un resultado técnicamente solvente antes que a racionalizar recursos o plantear un escenario empresarial con rigor.

Lo cierto es que el producto final cumple con los estándares habituales en cuanto a calidad geométrica y nivel de detalle, por lo que se entiende que reúne las condiciones necesarias para ser fabricado tanto mediante impresión 3D como a través de moldeo por inyección en un contexto profesional que disponga de la infraestructura y del conocimiento especializado para optimizar tiempos y costes de forma efectiva. Y es que, además, la documentación generada aporta un valor añadido relevante, en la medida en que deja recogidos de forma sistemática los fundamentos técnicos y todas esas decisiones que se han ido tomando, lo cual de algún modo facilita —y mucho— el camino para futuras iteraciones o adaptaciones orientadas ya a priorizar la eficiencia económica y la competitividad del producto.

Así pues, puede concluirse que el proyecto demuestra con claridad la viabilidad técnica del set desarrollado, y deja planteado un marco metodológico que serviría, llegado el caso, para abordar su industrialización considerando con mayor precisión los condicionantes económicos que, por la propia naturaleza académica de este trabajo, han quedado en parte fuera de alcance.

Como viabilidad a largo plazo de proyectos como este, cabe destacar que el ámbito de la escultura de miniaturas es, al menos a corto y medio plazo, un terreno en el que poco puede irrumpir la IA. Pese a su ocasional precariedad —especialmente entre profesionales autónomos—, es un espacio considerablemente más seguro y menos propenso al reemplazo que otros, como la creación de assets 3D o la ilustración digital. Y es que, a día de hoy, la capacidad de generar mallas con una geometría impecable, adaptadas para impresión o moldeo, con un nivel de detalle tan preciso y, además, con esa impronta artística y casi

artesanal que exige el hecho de que puedan ser pintadas a mano, sigue quedando muy lejos del alcance actual de la inteligencia artificial.

### **3.5 Resultados del proyecto y análisis**

Aquí se presentan los resultados obtenidos, cosa que también incluye a las metodologías y conceptos teóricos que surgieron durante las fases finales del proceso. Es decir, se incluye todo aquello que, una vez finalizado el producto, pudo identificarse como una opción más adecuada, útil o contextual, incluso si no resulta determinante, pero sí relevante para comprender el desarrollo completo. Como el proyecto ha encontrado diferencias entre las concepciones teóricas y el resultado real obtenido, tiene sentido añadir estas aclaraciones conceptuales también como resultado, no solo el producto en sí.

Se han creado dos temáticas de miniaturas, de las cuales una va orientada a su impresión 3D, y la otra, a su moldeo por inyección. Esto incurre en dos formas bien diferenciadas de diseñar las piezas.

Para impresión se han modelado tres miniaturas, que coincide con el número de ellas necesarias para una escuadra de combate en el juego de mesa para el que se plantean (ver en el apartado Anexos). Cada una encaja en un arquetipo diferente de personaje para dar lugar a una escuadra equilibrada.

Dado que el diseño de una miniatura orientada al moldeo por inyección conlleva restricciones técnicas considerablemente superiores a las que plantea la impresión 3D, se optó por desarrollar una pieza especialmente compleja de forma deliberada, con el objetivo de ilustrar con mayor claridad las particularidades de este proceso. No obstante, únicamente se elaboró una sola miniatura para moldeo, ya que, al no resultar viable en el marco del presente proyecto la producción industrial mediante moldes, se consideró más pertinente enfocar el diseño del resto de las miniaturas directamente hacia la impresión 3D, técnica que sí puede implementarse de manera efectiva en este contexto.

Los presentes resultados se exponen a continuación en esta sección. El análisis y las explicaciones pertinentes se exponen después en otros subapartados.

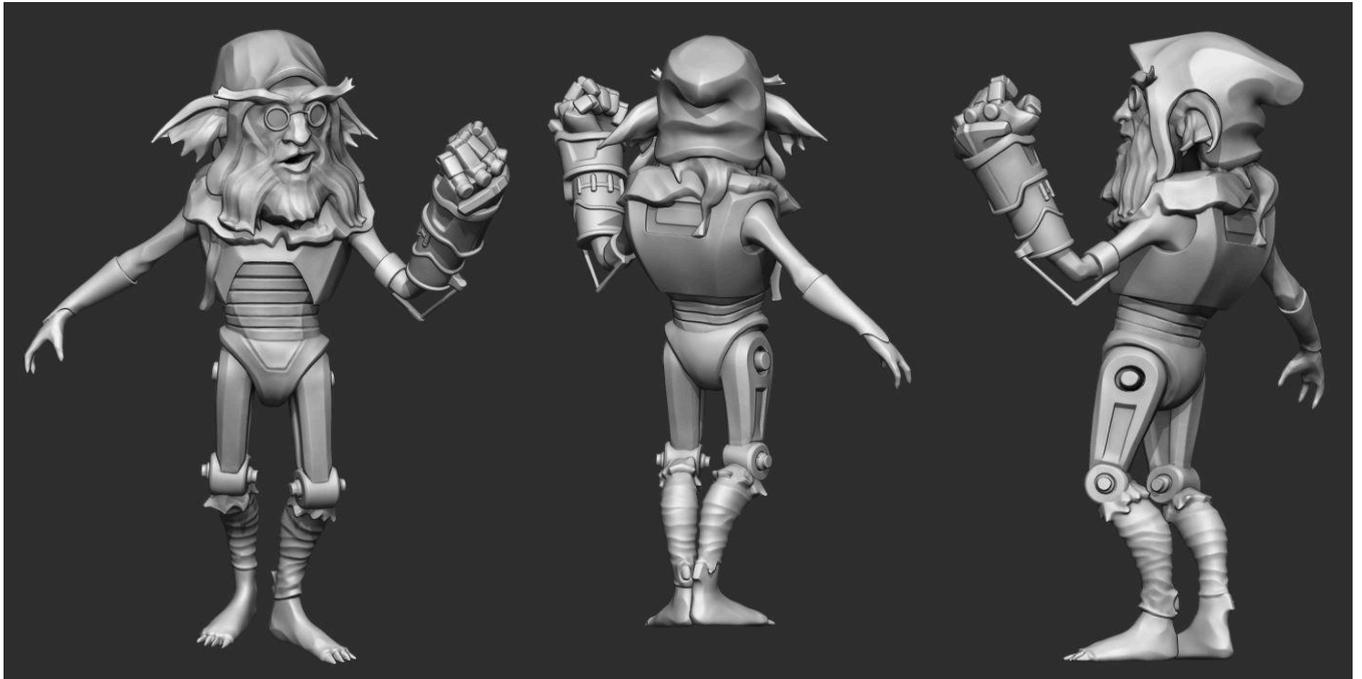


Fig.33. Miniatura para impresión 3D 1: Puño-Vanguardia Yënkul.

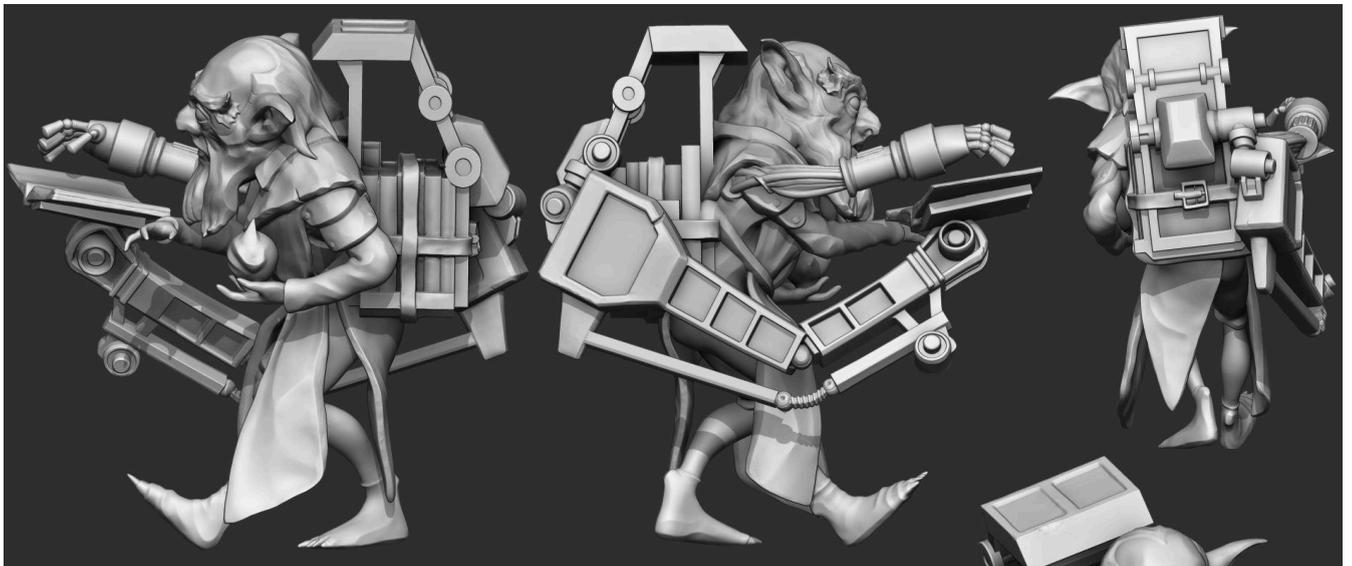


Fig.34. Miniatura para impresión 3D 2: Teknochicero Yënkul.





Fig.35. (Arriba) Miniatura para moldeo: Arboromante Sombranudo Legorn. Vistas front y back colocadas a favor del eje de desmoldeo.



Fig.36. (Derecha) Miniatura para moldeo: Arboromante Sombranudo Legorn. Vista libre lateral izquierda.

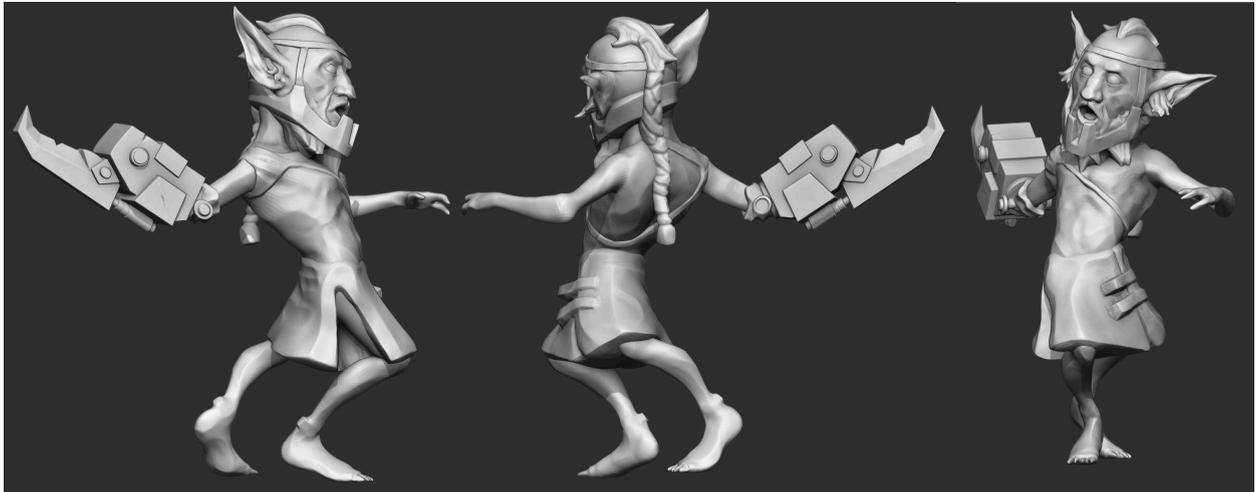


Fig.37. Miniatura para impresión 3D 3: Berserk Yenkul.

### CONCEPCIÓN EN FÍSICO

Las piezas han conseguido imprimirse en resina sin desperfectos, aún las más pequeñas.



Fig.38. Ejemplos de miniaturas impresas tras la retirada de soportes.



Fig.39. Ejemplos de miniaturas impresas ya montadas y listas para ser pintadas.

#### PINTADO

Las piezas son satisfactorias de pintar mediante técnicas tradicionales del hobby de miniaturas. No es necesario recurrir a métodos y herramientas avanzadas como los lavados o el aerógrafo porque todas las superficies están bien definidas de cara a ser alcanzadas y delimitadas por un pincel.



Fig.40. Ejemplos de miniatura del proyecto en proceso de ser pintada.

A continuación, se exponen resultados, no absolutos como los anteriores, sino específicos a partes de desarrollo, y las metodologías alternativas que se juzgaron como más adecuadas, así como imprevistos y cosas relevantes a tener en cuenta. El análisis de objetivos se indica posteriormente en el apartado 4. Conclusiones.

### 3.5.1. Concept Art

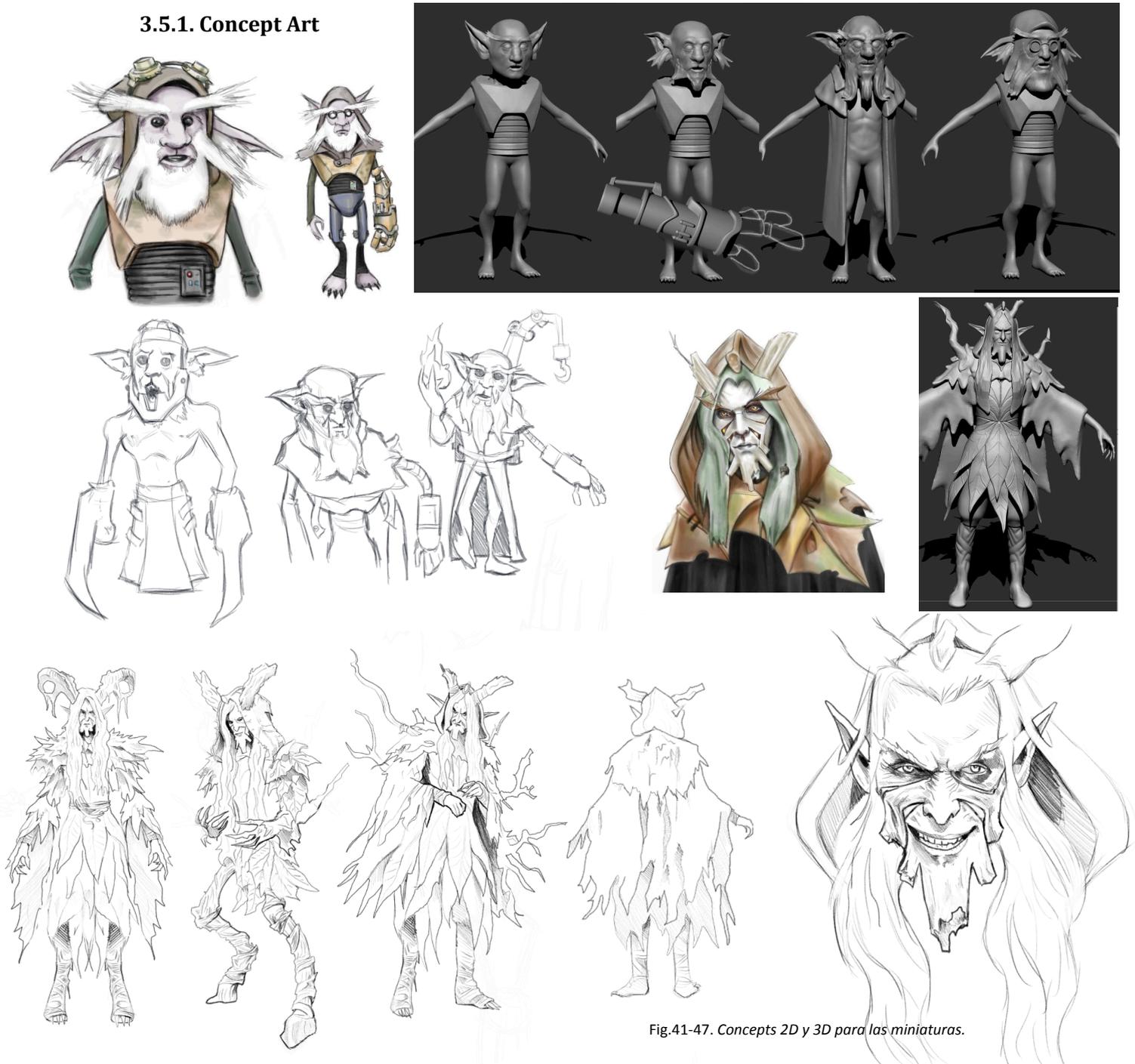


Fig.41-47. Concepts 2D y 3D para las miniaturas.

### 3.5.2. Modelado General

La principal diferencia inesperada que se ha encontrado a la hora de modelar para miniaturas frente a otros ámbitos, ha sido la gestión de un polycount elevado. En videojuegos es muy raro llegar a manejar tanta geometría en una sola pieza, incluso las versiones “high” de los personajes relegan algo de su detalle al proceso posterior de texturizado. Aunque aquí era evidente que ocurriría, no se previó que la diferencia fuera tan acusada. Hay varios aspectos a tener en cuenta, incluso bugs del programa en sí.

#### 3.5.2.1 El límite de ZRemesher

Como ya se ha comentado con anterioridad, la metodología empleada es ir arrastrando el uso del ZRemesher todo lo que sea posible. Para mayor simplicidad, se va a acuñar el término “iteración” para hacer referencia a cada vez que el modelo no admite más detalle con una geometría y requiere de que se le vuelva a calcular la malla a una mayor resolución para poder continuar. Este recálculo puede hacerse con ZRemesh, pero también con Dynamesh y con Division. Cada iteración es mucho más rápida de hacer si la malla está ordenada tal y cómo se pretende, por lo que ZRemesh es la opción obvia.

ZRemesh calcula dónde la malla está más estirada y recalcula los loops ordenándolos en torno a estas deformaciones, que deduce son donde el modelador pretende obtener un refuerzo de geometría; se trata entonces de una herramienta de retopología. Dynamesh solo distribuye la geometría en quads uniformes, similar a una malla de naranjas de supermercado o a una red de pesca (ver Fig.11), por lo que es necesario volver a colocar el detalle prácticamente desde el principio en cada iteración. Division no reordena, solo da más resolución a lo que ya había previamente, por lo que va arrastrando la geometría estirada sin ponerle remedio.

Algunos escultores experimentados dicen ir más rápido si solo usan ZRemesh en etapas tempranas. Prefieren ir saltando entre los tres métodos de cambio de iteración según las necesidades del modelo para mayor control en cada caso específico. También hay que tener en consideración el problema que se explica a continuación.

Cuando el modelo cuenta con una geometría lo bastante alta (en torno a 250K) la herramienta ZRemesher deja de ser efectiva, y es que ya no permite aumentar más el polycount. Una nueva iteración de ZRemesh mantendría la geometría en un número similar, o incluso menor, aunque se le indiquen opciones para aumentarla. No se puede seguir dando detalle.

Si después de trabajar en la última iteración que permite ZRemesh, la malla todavía requiere de algunos ajustes para redistribuir mejor los loops, pasar a subdivisión (tecla D) o seguir dividiendo con Dynamesh (no tiene tope de geometría para funcionar) no es una opción, puesto que solo se conseguirían artefactos a mayor resolución: no redistribuyen la malla de forma natural. Hace falta buscar una solución alternativa.

Aún así, el método preferido en este proyecto es el uso iterativo de ZRemesh hasta llegar a su límite. Alternar entre métodos requiere de muchísima experiencia. El modelador promedio trabaja más deprisa con mallas ordenadas.

Hay dos soluciones a esta encrucijada en la metodología centrada en el esculpido con ZRemesh. Para casos difíciles el procedimiento es hacer uso de sculptris pro en las zonas que estén estiradas para darles más geometría y volver a calcular zremesh indicándole que mantenga mayor geometría en las zonas donde se ha aplicado sculptris pro (polypaint, ver sección 3.2.2). Es muy importante para manejar estas geometrías más altas que el polypaint no consista nunca en “Color Density” bajo (el código de colores para ZRemesh por polypaint, accesible en el slider de ZRemesh automáticamente); se han de usar densidades medias o altas en el las guías de color o se estirará mucho la geometría al recalcularse. Es muy recomendable hacer transiciones suaves entre las diferentes densidades de color. Al usar la polypaint marcando densidad alta en las zonas reforzadas por Sculptris Pro, ZRemesh vuelve a calcular la malla, pero como ya no lo hace uniformemente. Aunque haya llegado a su límite de geometría aparente, ahora mantiene esa geometría extra en las zonas indicadas porque los está restando de las partes que no interesan. Entonces, se obtiene una malla limpia para poder subdividirla con Division y seguir detallando.

Para mallas que alcanzan el máximo de ZRemesher pero que no necesitan de tanta retopología para obtener una malla correcta en la siguiente iteración para poder subdividirse, sirve con tan solo marcar la casilla “Keep Creases” a la hora de hacer ZRemesh. Mantendrá las aristas duras tan importantes en polycounts elevados. Esta solución tan sencilla es la que se aplicará a la mayoría de las mallas. Funciona bien salvo para casos difíciles.

1. Esculpir detalle a base de estirar la geometría para recolocarla donde interesa que se refuercen los loops de la malla.
2. Hacer ZRemesh con polycount objetivo “Same” si no es necesaria más geometría para seguir detallando.
3. Iterar estos pasos hasta que sea necesaria más geometría.
4. Cuando no se pueda aumentar la geometría con ZRemesher (en torno a 250k es el máximo), tratar de hacerlo con la opción Keep Creases marcada.
5. Si Keep Creases no soluciona el problema y la malla sigue necesitando un reordenado mayor que ya no se puede conseguir, pasar al paso 6. Si lo soluciona sin problema, saltar al paso 7 directamente.
6. Esculpir con Sculptris Pro el detalle en los bordes que necesitan de refuerzo. Con polypaint marcar las zonas nuevas en color density 4 (rojo) y el resto en color density medio, nunca en densidad baja.
7. Subdividir el modelo ahora que la malla está ordenada y seguir detallando.

### 3.5.2.2 Los pinceles ya no funcionan igual

Como ya se ha comentado con anterioridad, al haber mucha geometría (varios millones de polígonos) las cosas cambian. Los pinceles también. Algunos de los más utilizados como Standard, DamStandard, ClayBuildup o Move tienden a perder efectividad. Aunque su funcionamiento no se interrumpe, la influencia real sobre la superficie se reduce considerablemente. El trazo requiere más insistencia y el impacto visual es menor, especialmente en áreas detalladas.

Es casi obligatorio lidiar con este problema cuando se subdivide varias veces un modelo, aunque se puede evitar si se trabaja con subdivisión dinámica (Dynamic Subdivision), una opción que aparece en el apartado de Geometry. Se puede trabajar entonces con la versión de menos resolución y el detalle se transfiere al resto de versiones. Este workaround tiene la desventaja de que no permite controlar directamente la versión detallada, ofrece bastante menos control y puede quedar la geometría estirada y sin remedio fácil.

La influencia al pintar con mucha geometría disminuye porque muchos pinceles se basan en un radio de influencia proporcional, que pierde alcance efectivo al aplicarse sobre polígonos extremadamente pequeños. Hay que tener especial cuidado con Move Topological, que no solo pierde influencia, sino que directamente pasa a mover la malla al completo como si se estuviera usando el gizmo de Mover, descolocando la pieza.

Existen varias formas de corregir esta menor influencia de los pinceles:

1. Aumentar el valor de Z Intensity, lo que incrementa la fuerza del pincel sobre la superficie (barra de herramientas superior, zona central).
2. Ampliar el tamaño del pincel o Draw Size (tecla S o slider táctil de la tableta de dibujo), ya que en mallas densas el área efectiva puede ser menor de lo esperado.
3. En algunos pinceles, ajustar el parámetro Brush Modifier dentro del menú *Brush > Samples* permite aumentar la influencia directa.
4. Trabajar en subdivisiones más bajas para realizar modificaciones más amplias, y regresar luego a la subdivisión alta para añadir detalles.

### 3.5.2.3 Crasheos y errores silenciosos de ZBrush en proyectos grandes

Un problema recurrente que se ha encontrado es que ZBrush, en este caso la versión 2023, puede no sobrescribir los cambios aunque se le haya especificado expresamente y la próxima vez que se abra el archivo, los cambios habrán desaparecido. Esto empieza a ocurrir cuanto más grande sea un proyecto y más historial de deshacer tenga almacenado por subtool (la mayoría del espacio en disco lo ocupa el historial). Los usuarios que reportan este problema en internet tienen proyectos de entre 2 y 4 GB. Este error es potencialmente peligroso porque

es silencioso: el problema al guardar no se advierte y parece haber completado la sobrescritura con éxito. Este comportamiento anómalo nace en la versión 2021, pero parece especialmente propenso a ocurrir en la 2023, que es la que más reportes acumula con diferencia (ZbrushCentral, 2024).

Este problema también aparece en discos duros de baja velocidad de escritura o cuando queda poco espacio. Los empleados en el presente proyecto eran SSD de alta velocidad y con decenas de gigas libres de almacenamiento, por lo que no serían la causa. Parece haberlo propiciado el historial de deshacer.

Para vaciar el historial de las subtools se accede a la barra de herramientas superior y se aplica Edit -> DelUH. Se repetirá este proceso por cada una de las subtools antes de guardar el proyecto. Aunque el proyecto ahora pese mucho menos, el error de guardado persiste en varias ocasiones, aunque con menos frecuencia. Por experiencia propia, más de mil cambios almacenados por subtool terminan generando problemas si se olvidan ahí y se pasa a trabajar en nuevas subtools. Una solución rápida es exportar como ZTool el modelo y cargarlo en un proyecto nuevo, el historial de cambios estará borrado en todas las subtools y se borrarán también todos los modelos sobrantes cargados al proyecto, como los que aparecen en el menú de contexto al añadir una subtool con "Append".

Si se decide seguir trabajando con ZProjects en lugar de con ZTools, es recomendable de vez en cuando guardar el proyecto como una versión nueva y alternativa que no sobrescriba al existente, así se evita la corrupción de archivos. Es decir, usando la opción "Save As" en lugar de "Save". Esto también permitirá volver atrás en caso de necesitarse versiones anteriores.

Para recuperar los archivos perdidos por un error silencioso de guardado, habrá que ir a las copias de seguridad que por defecto hace ZBrush cada cuarto de hora. La ruta para encontrarlas, si es que no se ha alterado manualmente, es la siguiente: "Equipo/Usuarios/AccesoPublico/DocumentosPublicos/ZBrushData/QuickSave".

Otro problema muy relacionado con trabajar en un proyecto grande y que ha ocurrido continuamente durante el transcurso del trabajo ha sido el "crasheo por inactividad". Zbrush tiene un bug, también en versiones recientes (2021-23), por el cuál se cierra silenciosamente cuando se deja inactivo o en segundo plano durante varios minutos. Esto se puede deber a errores en el guardado automático cuando el programa está inactivo o a que los drivers de la tableta de dibujo detecten inactividad y ZBrush entre en conflicto (ZBrushCentral, 2024). La solución a este problema es la misma que la del error de guardado.

### 3.5.3. Superficies que se puedan pintar

Además de las predicciones y asunciones que ya se tenían previas al desarrollo del producto, se han encontrado otra serie de eventualidades a tener en cuenta de cara a crear una buena miniatura para ser pintada a mano.

#### 3.5.3.1 Diferencias en lo pintable entre inyección e impresión

Haciendo un estudio en internet, se puede ver cómo varias de las empresas dedicadas a creación de miniaturas para impresión 3D se alejan de la mayoría de consideraciones de cara a figuras fáciles de pintar: se dejan llevar por el hiperrealismo. Estos sculpts, a simple vista, parecen tener una calidad muy superior a la de las compañías más grandes e históricas del mundo de las miniaturas, pero claro, son totalmente imprácticas de pintar en escalas pequeñas. Los detalles finos simplemente desaparecerían tras una imprimación de pintura. Este es el caso, por ejemplo, de Loot Studios, de Clay Cianide Miniatures y de Daybreak Miniatures. Su approach no es malo, solo diferente, más orientado a exposición que a hobby.

Es cierto que las limitaciones técnicas de los moldes obligan en parte a que los modelos tengan superficies gruesas, proporciones más exageradas y en general, menos detalle fino. Además, ocurre que a escala tan pequeña como la heróica (28-32mm), en molde es más difícil captar ornamentos diminutos y que apenas sobresalen. Todo esto es más viable captarlo en impresión SLA, que ofrece una cantidad más grande de resolución, por lo que muchos escultores no se lo piensan dos veces y creen que es mejor aprovechar estas ventajas técnicas para tener miniaturas más realistas y que luzcan mejor de cara a renders y exposiciones. También, algunos escultores vienen directos del mundo del cine o del concept y no tienen experiencia en el mundo del pintado físico. Eso hace que el modelo pueda ser técnicamente impecable, pero poco efectivo a escala y sin jerarquía de formas.

Si Games Workshop, el creador de la propiedad intelectual más famosa en el ámbito (Warhammer) y que es el estándar en la industria, lleva más de 40 años haciendo las miniaturas como las hace, no solo es por decisión artística, es porque funcionan, porque se entiende bien la forma y porque se pueden pintar. Primero, el pincel ha de poder llegar a todos los recovecos de la miniatura. Luego, ha de tenerse en cuenta el grosor mínimo de un pincel de detalle, y es que de poco sirve tener mucha textura esculpida si el pincel más fino ya es más ancho y no lo puede resaltar. Entonces, los detalles han de estar exagerados. Después, a escalas pequeñas y también por el tipo de pintura que se utiliza en miniaturas, es mucho más difícil hacer degradados, y es que por culpa de tener que agarrar bien sobre plásticos, resinas y metales, se seca muy deprisa. La pintura no se mantiene fresca el tiempo suficiente para hacer transiciones fluidas y, entonces, una superficie redondeada no se puede pintar satisfactoriamente, queda plana. Por consiguiente, es necesario tener superficies con aristas definidas y volúmenes muy marcados para que el pintado a base de capa sobre capa (en seco, sin degradados) no quede mal. No obstante, existen formas de captar cierto degradado, como la paleta húmeda y el aerógrafo, pero son técnicas usadas casi exclusivamente por profesionales y hay que encarar el producto al público general.

Algunas empresas orientadas a impresión 3D que sí que tienen claro este approach más accesible para pintado son: Cast n Play, Titan Forge y STL Miniatures. Otras, tienen unos resultados a medio camino entre ambos acercamientos, como Archvillain Games o RNEstudio.

A nivel personal, la conclusión obvia parece alejarse del hiperrealismo en miniaturas y tener en cuenta a los futuros pintores. La excepción será cuando se trate de figuras a escalas grandes, en las cuales ya no resulta un rompecabezas pintarles detalles finos; también es razonable cuando se trata de un reto de pintado o la figura va muy orientada a coleccionismo y exposición. Para el resto de casos, hacer un producto frustrante y poco accesible para la mayoría de pintores, que no son profesionales, reduce el número de posibles compradores. A modo de resumen, dependerá de su caso de uso específico.

En este proyecto se han hecho las miniaturas inicialmente haciendo volúmenes y transiciones de corte realista, porque es la formación que tenía el autor, pero luego se han “cartoonizado” las proporciones y separado los volúmenes de forma definida y con cambios drásticos de ángulo, para facilitar el pintado. Luego, como capa extra y en guiño a las posibilidades nuevas que ofrece la impresión SLA, sí que se han esculpido detalles finos, pero siempre sin entorpecer la legibilidad de la pieza y sin quitarle protagonismo a las formas pintables. Estos detalles últimos son meramente cosméticos y se sobreentiende que a escala heroica se perderían bajo la pintura, pero son un extra positivo en el caso de que el cliente quiera imprimir versiones a mayor tamaño o de que sea un pintor más experimentado.

### ***3.5.3.2 Estructuración de formas para facilitar el pintado***

### **3.5.4. Miniaturas para moldeo por inyección**

#### ***3.5.4.1 Esculpir atendiendo a ejes de desmoldeo***

Dado que el diseño de una miniatura orientada al moldeo por inyección conlleva restricciones técnicas considerablemente superiores a las que plantea la impresión 3D, se optó por desarrollar una pieza especialmente compleja de forma deliberada, con el objetivo de ilustrar con mayor claridad las particularidades de este proceso.

Fig.48 y 49. (Debajo) La pieza principal resultante para moldeo, con todas las partes contrarias al eje separadas.



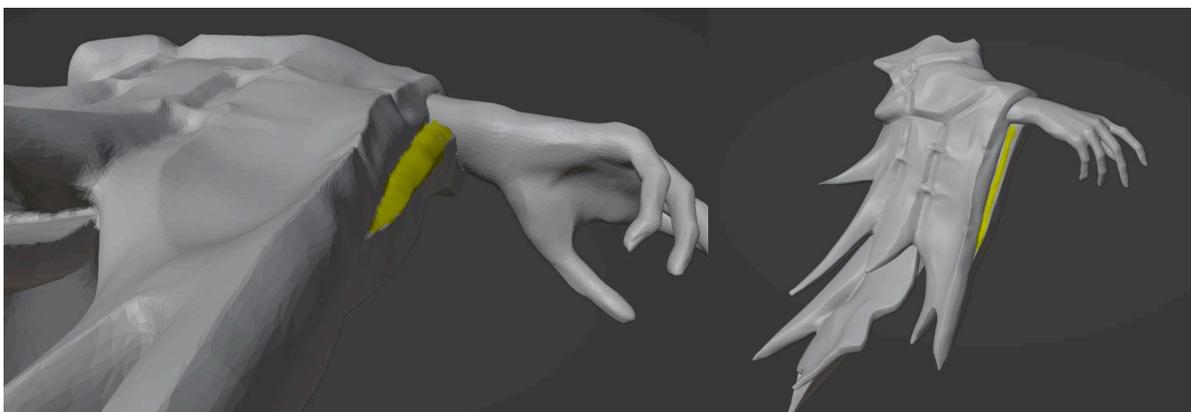


Fig.50 La miniatura original sin tener en cuenta el eje de desmoldeo.

Como puede observarse en la Fig.50, había muchas voladuras y problemas a subsanar de cara a la producción de la miniatura en moldes, por lo que hubo que hacerle numerosos ajustes. Primero, se pegó el brazo que menos aportaba a la silueta al cuerpo (ver Fig.48). De esta manera no era necesario sacarlo a partes. Luego, se adaptaron las mangas de la túnica de hojas para que no incurrieran en huecos. Una técnica es simular la cavidad estirando uno de los salientes y dejando el otro plano (ver Figs.50 y 51). Luego, se procedió a hacer cuadrar toda voladura pequeña con el pincel Move Topological y algo de ayuda del Trim Dynamic. Al tener la miniatura ya colocada con respecto al eje de desmoldeo en su vista ortográfica, como se discutió en la metodología, fue mucho más sencillo adaptar cada zona al eje.

Por último, es necesario seccionar las partes no adaptables, como el otro brazo, los cuernos, la mano, una de las piernas, y la parte trasera de la túnica. El procedimiento se explica a continuación.

Fig.51 Voladura evitada en manga.



### 3.5.4.1 Seccionamiento en partes

#### SECCIONAMIENTO

Tras experimentación se descubrió que hacer cortes orgánicos es sustancialmente más preciso y rápido en Blender que en ZBrush. A pesar de que en este último se puede previsualizar el corte aplicado sobre la marcha y editarlo a placer viendo en todo momento cómo quedará, requiere de más limpieza y es menos fácil de controlar con precisión. En cambio, en Blender, es posible usar herramientas típicas de retopología para generar una pieza de corte ajustada exactamente a la superficie de la malla de la miniatura.

El procedimiento consiste en crear un objeto nuevo con un único punto por geometría. Para esto se crea una forma primitiva, ya sea un cubo, una esfera, etc. Luego, se entra en modo edición (TAB), se selecciona toda la geometría (tecla "A") y se fusiona al centro ("M" -> "Merge at Center"). Esto resulta en un único vértice en todo el objeto. Ahora, hay que moverlo hasta la parte a cortar. Después, se añade el modificador "Shrinkwrap" al objeto del vértice y con la pipeta del propio modificador se hace clic sobre la miniatura. Esto hará que cualquier nuevo vértice esté pegado a la malla de la figura por el exterior. Luego solo queda activar el "Snap" en la barra de herramientas central y ya se podrá empezar a dibujar el corte. Snap se encuentra en la barra de herramientas central superior con el icono de un imán. En su desplegable se ha de activar el modo "Face Project" y bajo "Affect" activar los tres tipos de Transform a la vez (Move, Rotate y Scale).

Ahora, mediante extruir el vértice original con la tecla "E" es posible ir dibujando el corte. Cada nuevo vértice podrá moverse con la tecla "G" e irá pegado a la malla de la miniatura. Una vez completada la línea de corte se une el primer vértice con el último gracias a la tecla "F" con ambos vértices seleccionados (shift + clic).

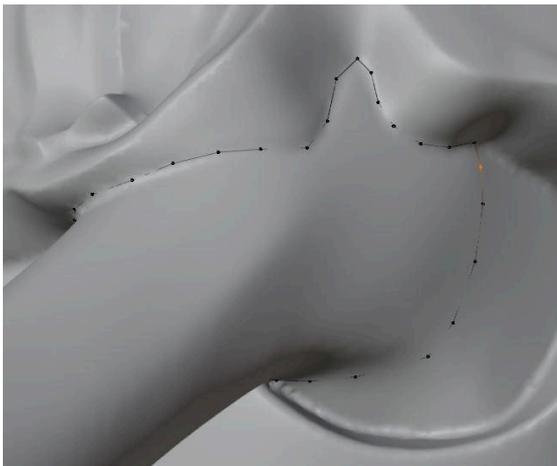


Fig.52. Definiendo el corte mediante extrusión de vértices.

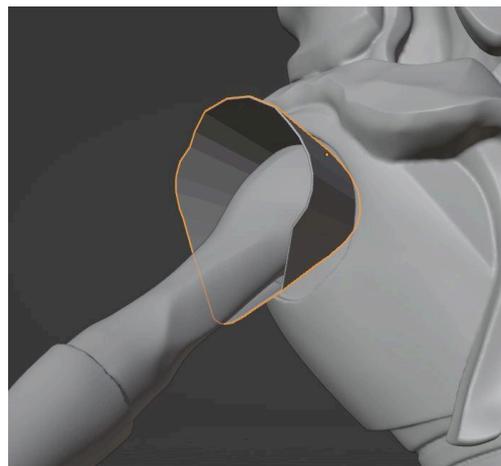


Fig.53. Pieza de corte terminada.

Luego, con todo el loop seleccionado (atajo shift + clic en modo aristas) se cierra la circunferencia para generar geometría con la tecla "F". Ahora, la pieza es sólida, pero es un ngon enorme. Es necesario rellenarla de geometría utilizable. Para ello, se ha concluido tras

prueba y error que la mejor forma es seleccionar el ngon y hacer un “Inset” con la tecla “I”. Esto creará un nuevo loop interno, pero con la misma geometría. Habrá que comprobar que el inset no genere caras superpuestas, por lo que es recomendable tener la opción de visualización “Face Orientation” activada en los Gizmos de “Show Overlays” del Viewport (arriba en el centro-derecha, icono de dos esferas concéntricas). Después se va juntando vértices para ir reduciendo la geometría y se van iterando nuevos insets. Para cerrar el centro se borra el ngon central, se selecciona el loop más cercano al centro, el que queda de frontera con el hueco, y se va al menú Face, para luego aplicar “Grid Fill”, que rellena el hueco automáticamente usando solo quads. Si el proceso da error, es posible juntar vértices del loop hasta contar con un número par de ellos, cosa que es más fácil para calcular Grid Fill. Si sigue sin funcionar, se deberá cerrar manualmente mediante la unión de aristas contrarias entre sí con “F”.

Después, una vez conseguido el corte cerrado, es necesario suavizar la superficie. Para ello se hace uso de la herramienta “Smooth” que tiene Blender en la barra de herramientas lateral izquierda del modo Edit (TAB para abrir modo edición). Se seleccionan todos los vértices por zonas, no es buena idea seleccionarlo todo si el corte es muy complejo, y se tira del gizmo de la herramienta Smooth. Eso sí, se deberá evitar seleccionar los vértices externos de la superficie del corte, ya que de lo contrario se moverían de su lugar al suavizarse la superficie y, entonces, el corte ya no aplicaría a la zona intencionada. Con seleccionar todos los vértices a excepción del loop más externo es suficiente.

Para terminar de definir bien el corte, se deberá extruir el loop más externo hacia afuera de la pieza que se pretende cortar (ver Fig.53) de forma que quede similar a un cono. Se deberá tener especial cuidado de que la figura empleada para cortar la miniatura no interseque con dos superficies a la vez, es decir, que cada cara poligonal no atraviese la pieza en más de un punto, solo una vez por cara. De lo contrario, el corte se calculará mal.

Por último, es necesario solidificar la pieza de corte, ya que la operación no funciona con planos. Para ello, se usa el modificador solidify. Una vez aplicado, se deberá volver a revisar que no haya caras cortando dos veces a la miniatura. Después, es recomendable añadir una subdivisión a la pieza de corte. Para ello existe el atajo Ctrl + 2, pero es posible encontrar el modificador Subdivision Surface en la lista de modificadores. Antes de aplicarlo, es recomendable añadir loops de soporte a los bordes de la pieza, tanto por la parte delantera como por la trasera. De no reforzarse, el corte se vería desplazado, puesto que las subdivisiones tienden a reducir el área de una pieza, lo que desplazaría la línea de corte hacia adentro si esta no está previamente soportada.

Solo resta aplicar la operación booleana para formalizar el corte, cosa que ya se ha explicado en detalle con anterioridad. Aún así, es posible que el modificador Boolean falle. El error más probable es que la pieza de corte se vea añadida a la miniatura, a pesar de estar en modo Difference y no en Union. Esto se debe o bien a la presencia de caras volteadas en la pieza de corte, o bien a que haya caras de ésta intersectando dos veces con la miniatura. Se trata de arreglos que escalan en dificultad de detección con la complejidad de la pieza, por lo

que requiere de cierta práctica solucionarlos. Para una explicación visual y más clara existen vídeos creados específicamente para ilustrar este proceso con miniaturas del proyecto en el apartado Anexos.

#### CONCLUSIONES

Este último método para llevar a cabo cortes orgánicos es el más robusto. No es tan lento de hacer como pudiere parecer a primera vista una vez se realiza varias veces. Es una forma de corte más precisa incluso que las que ofrecen los Slicers.

Las pestañas o keys para ensamblaje son superfluas a escala heroica a no ser que la superficie de corte sea muy amplia en proporción. En zonas como brazos o detalles más pequeños, es preferible forzar un corte orgánico para asegurar el correcto posicionamiento del acople que realizar uno simple con pestaña. Los huecos muy pequeños para introducir pestañas siempre tienden a verse reducidos una vez materializados en físico, y la única forma de ensamblaje pasa por terminar lijando la pestaña para hacerla desaparecer; cosa que ha ocurrido repetidamente en el desarrollo del proyecto. Es mejor, entonces, relegar el método de corte con pestaña a piezas más grandes o aumentar el tamaño de la pestaña y su hueco de encaje todo lo posible.

##### **3.5.4.1 Análisis de Pieza**

Es posible analizar la miniatura con software de ingeniería. SolidWorks tiende a ser la opción comercial más extendida, pero, al igual que el resto de programas de esta índole, se trata de software de pago con licencias industriales, por lo que se puede entender como fuera de alcance para el modelador autónomo hacia el que va enfocado el proyecto.

Existen unas limitaciones importantes a considerar cuando el modelo a analizar en SolidWorks es una miniatura. Lo primero es que se prefieren extensiones de archivos que fueren la triangularización, especialmente STL, por lo que se deben evitar formatos como FBX. La segunda consideración es el polycount, que para análisis en equipos domésticos no se recomiendan más de 10 mil polígonos, llegando a ser tolerables hasta 20 mil. Esto conlleva un fuerte diezmado de la miniatura, por lo que podría no analizar bien todas las voladuras. Las grandes empresas del sector de las miniaturas usan ordenadores especiales para esto, además de una combinación compleja de varios softwares, entre ellos algunos propios y privados internos a la organización.

Una vez se tiene una versión lo suficientemente diezmada del modelo (ver 3.5.3.1) y en formato triangularizado, se importará a SolidWorks marcando la opción de “Cuerpo Sólido” si aparece disponible y el programa es capaz de convertirlo. Luego, desde Herramientas-> Evaluar-> Análisis de Desmoldeo se analiza la pieza. Es necesario indicar el eje establecido como “arriba”, que normalmente es Z. Se ajusta el ángulo de desmoldeo, que por lo general es de 2 o 3º en plásticos. Así se verían que partes quedarían atrapadas o se romperían.

### 3.5.5. Miniaturas para impresión 3D

#### 3.5.3.1 El Polycount

Tras la investigación, ha resultado cuanto menos sorprendente constatar que las miniaturas comercializadas para impresión 3D no corresponden, en realidad, a los modelos high poly que suelen exhibirse en los renders promocionales de las páginas web de venta, y es que dichas representaciones gráficas sí que se elaboran a partir de versiones extremadamente detalladas (en torno a 10 millones de polígonos), pero serían totalmente inviables para su manipulación directa en la mayoría de equipos domésticos. Si bien podría pensarse que un archivo STL ya preparado solventaría cualquier problema, lo cierto es que un modelo con tal densidad poligonal supone un desafío incluso para ordenadores de prestaciones medias, los cuales bien podrían no ser capaces de procesar el archivo en el slicer, experimentar crasheos<sup>14</sup>, o bien incurrir en tiempos de cálculo desproporcionados. Entonces, la carga poligonal no supone un problema para la impresión en sí, tal y como se pensaba, pero sí que lo crea a la hora de generar las órdenes de impresión en equipos más modestos.

No obstante, conviene recordar que lo que efectivamente se comercializa son archivos STL, no archivos de impresión específicos de cada impresora —circunstancia que, por otro lado, resultaría imposible dada la multiplicidad de máquinas existentes en el mercado, cada una con su propio formato propietario—. Y es que, para garantizar la compatibilidad con el mayor número posible de usuarios, los modelos suelen ofrecerse decimados, reducidos a un rango que oscila habitualmente entre el medio millón y el millón de polígonos. De este modo, se obtiene un fichero perfectamente manejable para cualquier tipo de ordenador que pudiera disponer el cliente, sin comprometer en exceso el nivel de detalle visible en la impresión final. Así, puede concluirse que ni siquiera los servicios profesionales especializados en la venta de miniaturas entregan los denominados super high polys empleados en sus renders comerciales; dichos archivos quedan reservados exclusivamente para la fase de exhibición visual, mientras que el producto destinado a impresión se ajusta deliberadamente a un estándar técnico mucho más pragmático.

Entonces, el polycount sí que influye en escultura para impresión 3D, cosa que es contraria a la suposición previa al desarrollo. Sin embargo, no supone ningún problema grave, simplemente se procede a realizar el modelo en su versión súper high poly tal y como se preveía, y ya después, se usan las herramientas de diezmado de ZBrush en ZPlugin -> Decimation Master. Primero se ha de precalcular la malla a reducir desde el botón “Pre-Process Current” que aparece en el menú de contexto, y luego ya sí es posible aplicar el diezmado con el botón “Decimate Current”. El polycount objetivo será en torno al medio millón, o ligeramente por debajo si es que la pieza lo permite sin llegar a dejar visibles los bordes duros de los polígonos.

---

<sup>14</sup> **Crasheo:** cierre abrupto o fallo repentino de un programa que provoca la interrupción inmediata de su funcionamiento.

### 3.5.3.2 Vaciado y limpieza de malla

#### VACIADO EN BLENDER Y LIMPIEZA INTERNA

El vaciado mediante el modificador Solidify de Blender ha resultado ser poco eficaz para mallas complejas. Funciona muy bien con formas simples, pero rompe la geometría por completo cuando hay cambios de ángulo pronunciados junto a mucha geometría, incluso en modo Complex. Por tanto, se ha buscado una solución más precisa para polycounts mayores.

La vía encontrada es el modificador “Displace” en el subgrupo de Deform. Si se duplica el modelo, se puede tener una versión desplazada hacia adentro gracias a esta herramienta, y otra manteniendo la forma original. Después, se anexionan ambos con Ctrl + J.

Esta solución permite usar Vertex Groups para enmascarar zonas del modelo que no convenga ahuecar, como los dedos o cualquier detalle pequeño que sobresalga por sí solo, especialmente si acaba en punta. Para ello, se seleccionan los vértices que se quieren añadir a la versión hueca y se añaden a un nuevo Vertex Group (ver Fig.54). La selección se hace más rápido en modo wireframe, y luego, para las zonas fronterizas con lo que no se quiere añadir, usando la selección circular en modo de visualización sólido (lo contrario a wireframe).

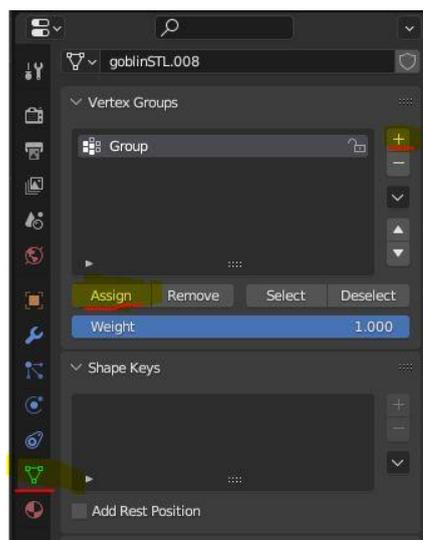
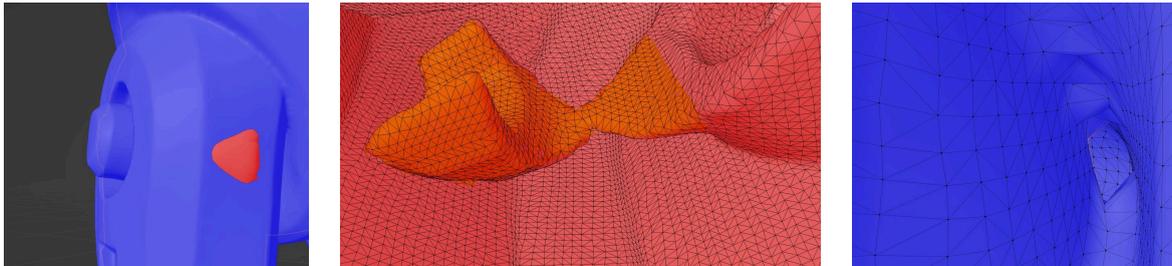


Figura 54. Añadir selección a Vertex Group.



Esta forma de vaciado mediante Displace se ha visto muy eficaz en modelos orgánicos, pero muy poco efectiva en figuras que contenían hard surface. Al estar la geometría muy junta por culpa de un uso extensivo del pincel Pinch de ZBrush, se rompe la geometría al aplicar Displace. Como toda la geometría de una miniatura preparada para pintado tiene bordes duros, incluso en su zonas más orgánicas, porque ayuda a separar visualmente las zonas pintables, este método de vaciado no es el más adecuado para miniaturas con cierta cantidad de detalle.

Aún así, se trata de una forma muy útil de encontrar errores internos de la malla, ya que al empujar la geometría, se detecta fácilmente si hay cavidades internas no detectadas durante el proceso de escultura. Es algo mucho más común de lo que podría parecer. Al activar el modo Face Orientation de Blender en los Gizmos, se marcan en rojo las caras internas, por lo que es sencillo ver los errores.



Figuras 55-57. Error detectado gracias a Displace (izquierda), formas internas que genera un mal Dynamesh (centro), y agujero por el que se ha colado al interior (derecha).

Una vez detectada una zona mal cerrada desde el exterior y que se ha metido hacia adentro al hacer Dynamesh en ZBrush, se puede proceder a eliminar la geometría errónea en Blender mediante la selección inteligente de las caras. Se recomienda encarecidamente no usar el modo wireframe para ello, o se seleccionará todo menos lo que se pretende. Se trata de un proceso que puede resultar ciertamente tedioso, pero de alto valor de cara a producir una miniatura a estándares profesionales. De no solucionarse, podría dar error al importarse al slicer porque no se detecta bien qué constituye la cara externa de la pieza. Además, contar con geometría interna dificulta el vaciado.

Una vez eliminada la geometría sobrante, se ha de cerrar el agujero de entrada, que ahora, al haberse eliminado la geometría que había pasado al interior de la malla, constituye un agujero en la malla que no podría imprimirse; no sería una pieza “manifold” o cerrada.

Si hay exceso de caras internas, es una buena práctica hacer operaciones booleanas mediante el modificador Boolean de Blender con figuras auxiliares colocadas manualmente sobre las zonas afectadas. Esto es mucho más rápido que la retirada por selección artesanal.

#### VACIADO EN SLICERS

El vaciado en un Slicer, Lychee en este caso, es más inteligente que el de Blender por mucho, además de permitir configurarlo con grosores de tamaño en unidades físicas en lugar de proporcionales. Aquí no hay problemas de geometría que interseca por normales muy juntas porque las caras internas son una versión muy simplificada del exterior, que además se genera en base a predicciones, unificando la cavidad en una malla uniforme.

Para proceder a vaciar es necesario ir a la pestaña “Prepare” en el menú central superior. Una vez ahí, se selecciona en la barra lateral izquierda la opción “Hollow”. Al haber hecho esto, aparece un nuevo menú en la zona lateral derecha donde se configura el vaciado. Desde la pestaña “Hollowing 3D” se selecciona el grosor intencionado de la pieza desde “Thickness” y la precisión con la que se hace la geometría interna desde “Quality”. Un buen

estándar para Quality es el valor numérico 2. En cuanto al grosor, es un tema peliagudo por el tamaño de la pieza, que se trata de una miniatura. La solución es mantenerlo al mínimo posible, incluso un poco por debajo de cuando salta una advertencia del programa por grosor insuficiente. El punto dulce está en torno a 0.9. El grosor ha de ser así de bajo porque de lo contrario, no se vaciaría casi nada de la pieza, creándose el hueco solo en la parte más gruesa, lo que dificulta colocar agujeros de drenaje, puesto que un agujero en el pecho de la figura es muy visible y estropea la estética de la pieza. Sin embargo, el grosor mínimo no debe ser ignorado porque no es tan proporcional al tamaño como se esperaría, se trata más de un tema estructural absoluto del material, por lo que depende más del tipo de resina. Una buena práctica es reducir la velocidad de levantado de la pieza (lifting speed) a un valor en torno a 40 mm/s para asegurar y utilizar una resina resistente como la ABS-Like 3.0 Pro de Elegoo o su equivalente en otras marcas. Incluso una anchura de muros de 0.8 es técnicamente posible con resinas de este tipo si la figura es pequeña y no colapsa por su peso.

Para visualizar el recorte del vaciado, se usa la barra vertical del extremo derecho de la interfaz, que al moverla se va actualizando la altura del corte en el modelo.

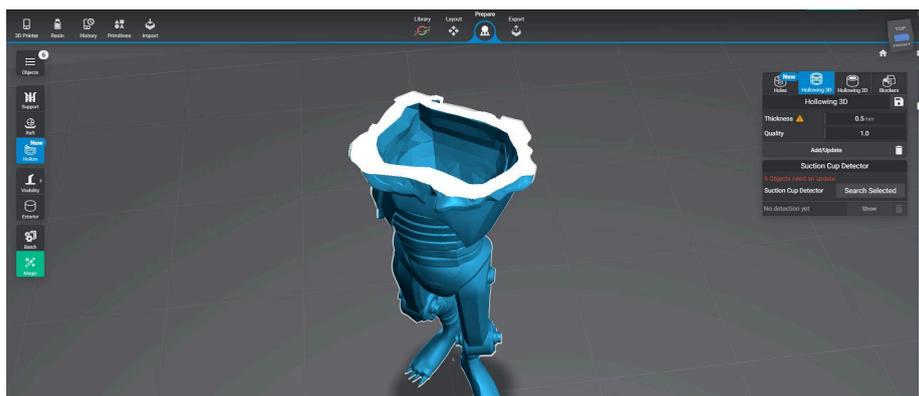


Figura 58. Interfaz de Vaciado de Lychee Slicer.

Debido al tamaño tan pequeño de una miniatura a escala heroica, es más que probable que el vaciado, que tiene un grosor mínimo recomendado, no llegue hasta los pies, que es el sitio idóneo para el agujero de drenaje. El lugar donde no se vería. Aquí es cuando surge un dilema importante, y es que hay que sopesar si merece la pena hacer el vaciado para ahorrar resina o no, puesto que tener que hacer de forma obligatoria un agujero en una zona importante y visible de la miniatura puede no ser una opción.

Si bien es cierto que se puede rellenar el hueco sin mucho problema después de la impresión con masilla de modelismo, el material que Games Workshop recomienda en sus guías para hacer conversiones y rellenar huecos. A nivel personal se recomienda usar arcilla espumosa flexible soluble en agua, que se conoce en el hobby del cosplay como Foam Clay. Este material permite un acople muy cerca de la perfección al diluirse si se le aplica agua en los bordes, permitiendo rellenar todas las juntas. Luego, endurece, y tras el pintado no se nota que haya existido un hueco.

No obstante, como se trata de modelos comercializables, obligar al cliente a tapar huecos, que no deja de ser un proceso extra que consume tiempo, puede no ser viable, a pesar de que al hacer esto se esté ahorrando resina en la impresión, porque también se incurre en costes de masilla o similares.

Por último, es necesario añadir agujeros de drenaje para permitir que la resina atrapada en el interior de una pieza hueca salga al exterior, de lo contrario se secaría a ritmo diferente y comprometería la integridad estructural del objeto. Lychee permite colocar y controlar agujeros desde la pestaña Prepare. Además, cuenta con una función para calcular las “suction cups” para ver si podría haber resina atrapada en un interior. De haberla, el agujero de drenaje no está bien colocado o no es lo suficientemente grande o profundo.

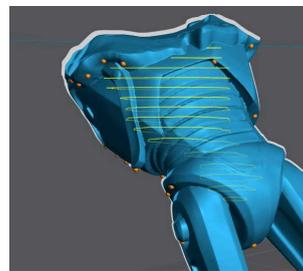


Figura 59. Suction Cup (círculos amarillos) no resuelto en un modelo del proyecto vaciado en Lychee.

#### CONCLUSIONES A POSTERIORI SOBRE VACIADO

En casos prácticos, la escala heroica de miniaturas incurre en un gasto tan anecdótico de resina por pieza, que a veces no es necesario vaciar la pieza para ahorrar material. De hecho, se suele perder más del doble de la resina en el fondo del propio tanque por la propia evaporación y por la dificultad de apurar todas y cada una de las gotas para devolverlas al bote de resina. Si hay prisa o se sospecha de colapso por paredes finas, no sale a cuenta invertir en hacer agujeros de drenaje. El gasto subiría de entorno a 1.5ml de resina de media por miniatura a unos 2ml. Además, los drenajes conllevan una serie de problemas que se comentan a continuación..

Se ha comprobado mediante varios ensayos que un agujero de drenaje colindante a otras piezas puede despegarlas de los soportes al arrastrarlos consigo el propio material en su flujo hacia el exterior. En este caso, había dos agujeros bajo la capa de la miniatura que hicieron colapsar las piernas, a pesar de que estaban igual de bien soportadas que el resto de la pieza. Entonces, es necesario reforzar los soportes de las piezas adyacentes a los drenajes con un extra de grosor. Tanto en la punta como en el tallo y la base.

Otra cosa a tener en cuenta es que un agujero repercute gravemente en la integridad estructural de la pared. Entonces, si la pared es muy fina, cosa inevitable en escala heroica de miniatura por su tamaño tan reducido, en muchas ocasiones el muro termina por ceder a pesar de que esté debidamente soportado.

Un error común y poco comentado aún en la documentación oficial es que no sirve solo con crear agujeros de drenaje en la zona lógica de salida, también hay que añadir uno en la zona opuesta para permitir salir el aire. Si solo hay agujeros para extraer resina, esta no saldrá porque no existe flujo de aire que la empuje. Este caso concreto se tardó tres

impresiones en detectar y fue fundamental para decidir no vaciar una de las piezas, ya que el agujero extra para el aire comprometía una zona protagonista.

Con todo esto en mente, se concluye que vaciar miniaturas a escala heroica es redundante y conlleva más problemas que beneficios aporta. En cambio, si la impresión es a mayor escala, donde los fallos estructurales son mucho menos probables, sí que se deberá tener en cuenta, ya que puede reducir a más de la mitad el gasto de resina.

### **3.5.3.3 Orientación y Soportes en Lychee Slicer**

Tras llevar a cabo el proyecto, se han identificado una serie de eventualidades diferentes no esperadas. Aquí, se recogen los nuevos conocimientos adquiridos tras haber empleado Lychee Slicer intensivamente, y después de haber llevado a cabo la impresión en físico y detectado problemas. También se exponen los conceptos aplicados a la práctica con ejemplos del producto final obtenido.

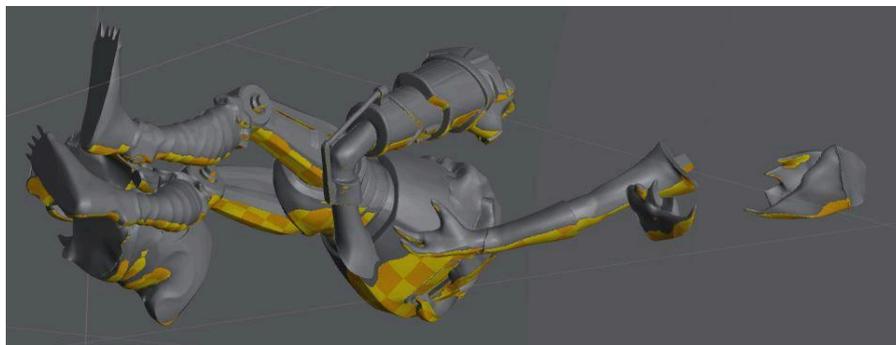
#### **CONSEJOS**

- Se imprime más deprisa si en lugar de llenar la impresora con las piezas de una única miniatura se llena con las piezas de tamaño similar de varias miniaturas. De esta forma se pueden imprimir solo las pequeñas, que terminarán muy deprisa, y juntar todas las grandes en la misma impresión, cosa que aprovechará mejor el tiempo. Lo que se tarda en imprimir tiene más que ver con la altura máxima, es decir, con el número de capas, que con la anchura de la capa. Es por esto que imprimir una pieza grande con otras pequeñas no aprovecha bien el tiempo. Conocer esto es especialmente útil si se están realizando pruebas de impresión a diferentes tamaños para ver qué cambios aplicar de cara a un producto final lo más transversal posible para cualquier impresora que pueda tener el cliente.
- Lychee proyecta una sombra vertical bajo los modelos, cosa que sirve para medir si una pieza y sus soportes van a intersectar o no. Es mejor mantenerlos separados, aunque si los puentes de soportes se tocan, luego se extrae todo a la vez y es más fácil limpiar la placa, pero claro, una pieza muy pequeña podría romperse de esta forma.
- A la hora de hacer soportes, es preferible ocultar el resto de piezas en las que no se esté trabajando porque el programa podría hacer que los soportes interactuaran con otra pieza diferente.
- No es buena idea colocar nada por debajo de los 2mm de altura. Aunque hubiere cierta distancia con la placa, la fuerza de succión es demasiado fuerte en capas tan bajas y podría desprenderse la pieza entera.

## EJEMPLO PRÁCTICO

En la Fig.60 se observa cómo vienen por defecto colocados los archivos 3D al ser importados en Lychee. Esta orientación totalmente horizontal es lo mejor para máxima calidad en la parte frontal de la miniatura, pero incurre en gasto abusivo de material porque la cross section es enorme. Además, aunque la parte trasera sea menos importante no se ha de descuidar tanto como para colocar la grandísima mayoría de soportes en ella. Esta repartición tan desproporcionada de los overhangs haría aparecer witness marks de forma concentrada, destruyendo la legibilidad de la pieza en su parte posterior. Es preferible buscar un balance en función de las necesidades específicas de cada pieza.

Figura 60. *Overhangs en Lychee. Se representan en amarillo.*



En los siguientes ejemplos (figuras 61 y 62) puede observarse el mismo brazo colocado perfectamente vertical para ahorrar material en soportes frente a una orientación alternativa que consumiría ligeramente más resina. Nótese que en la versión puramente vertical aparecen overhangs, las zonas amarillas, bajo los dedos, que son partes de muy poco grosor y además terminan en punta. La versión ligeramente entornada, por el contrario, consigue evitar overhangs en las zonas frágiles ya mencionadas. Entonces, es preferible esta última. Luego, la Fig.63 es un caso extremo de esto mismo. Aquí aparece una parte particularmente fina, que de llevar soporte, por fino que fuere, muy probablemente se terminaría por romper la pieza al retirarlo. Tal y cómo está orientado en la imagen, se evitaría incurrir en ese brete. Aún así, esta zona en concreto podría sufrir pequeñas deformaciones en saltos de capa por exceso de estrechez. Se trata de una concesión momentánea de diseño por motivos meramente estéticos, pero es mejor evitarla en medida de lo posible.

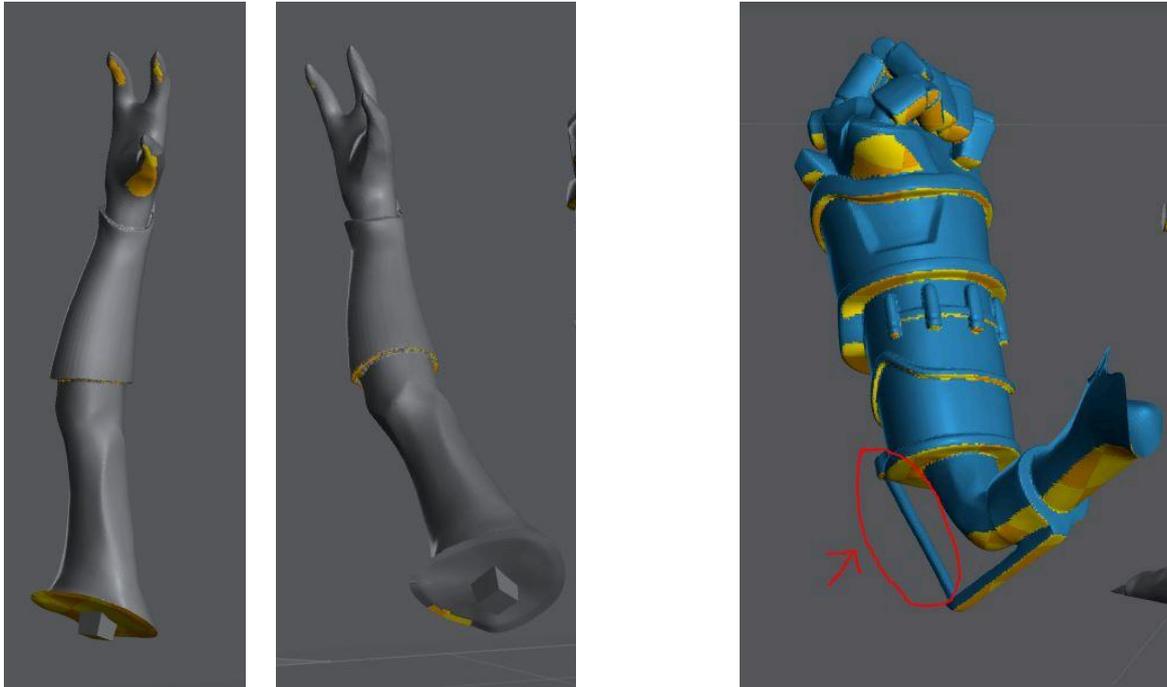


Figura 61 (Izquierda). *Pieza completamente vertical*

Figura 62 (Centro). *Misma pieza, ahora algo entornada para evitar soportes en los dedos.*

Figura 63 (Derecha). *Pieza no vertical, pero evita soportar una zona crítica que rompería al retirar soportes.*



Figura64. *Ejemplo de orientación final de una miniatura del proyecto.*

La orientación final para esta miniatura se puede ver en la Fig.64 Las piezas pequeñas están colocadas a mayor altura porque tienden a desprenderse de la placa si no. Tras tres impresiones se probó que la “peel force” que sufrían era demasiado para su tamaño. Se ha buscado un balance entre calidad y ahorro de material, evitando siempre que se rompan las partes finas. El proceso mental tras esta distribución, de forma resumida, sería el siguiente:

- El torso constituye el centro de la placa. La cabeza, que es otra pieza grande, se ha colocado a la izquierda, por lo que las piezas más pequeñas se han colocado juntas a la derecha para compensar pesos en la impresión.
- La cabeza está casi por completo paralela a la placa porque es la pieza más protagonista de la miniatura. Así se evita al máximo la aparición de stair stepping en el rostro, así como witness marks de retirar soportes. No está colocada completamente horizontal porque de esa manera habría que soportar mucho más el gorro, que es una zona visible de la figura. En cambio, al tener cierta inclinación hacia arriba, el grueso de soportes recae en la parte interna del corte de la pieza (el cuello), que como es una junta de unión va a ir pegada a otra pieza y no se va a ver ningún desperfecto.
- El cuerpo está orientado bastante más vertical que la cabeza para ahorrar material, ya que la perfección de la impresión no es tan importante aquí como lo es en la cabeza, y además se trata de una pieza muy grande en la que rentabiliza ahorrar soportes. Aún así, tiene una orientación de 60º y no de 90º. Esto evita la aparición fuerte de stair stepping sin incurrir mucho en gasto de soportes.
- Los brazos y las orejas, que son poco protagonistas y por tanto, se puede ahorrar material en ellas a costa de calidad, se han colocado de la forma más vertical posible. Siempre evitando soportes en zonas extremadamente finas, de ahí que alguna pieza esté ligeramente rotada. Esto ayuda también con que no aparezca excesivo stair stepping, aunque en este caso es esperable que aparezca algo, pero puede limarse después sin mucho problema con papel de lija de baja abrasión o limas de modelismo.

## SOPORTES

En base a experiencia propia, los soportes pesados son desproporcionadamente grandes para imprimir a escala heroica una miniatura y hace falta un lijado contundente después que hace perder detalle, y eso cuando no se rompe directamente.

Entonces, en miniaturas es mejor limitarse solo a soportes medium y light. También incluso solo a light, aunque en este último caso haría falta colocarlos conformando una mayor densidad de normal. Si se separan aproximadamente 2mm entre sí, suele ser suficiente para que aguante la pieza. También hay que calibrar la lifting speed y la lifting distance en una prueba de impresión para que la miniatura aguante bien con esa cantidad de soportes. Todo esto, por supuesto, es recomendable dejarlo por escrito en la documentación asociada al producto. Eso, y la escala a la que está previsto que se imprima, ya que a mayor tamaño, menor efectividad de las sujeciones finas.

La contrapartida es que las primeras capas son cruciales para sujetar el peso de la miniatura, ya que no hay espacio físico para colocar entramados de puentes que distribuyan el

peso. Entonces, es obligatorio recurrir a, al menos, algún soporte pesado aunque dejen una witness mark grande. Bajo el pie es un buen lugar, evitando siempre que coincidan con una frontera entre zonas pintable. También es necesario soporte grueso en el centro de gravedad.

Un consejo técnico avanzado es aumentar el tallo del soporte cuando se prevea riesgo de colapso en un soporte que sí o sí ha de ser ligero porque de lo contrario estropearía una parte importante de la miniatura.

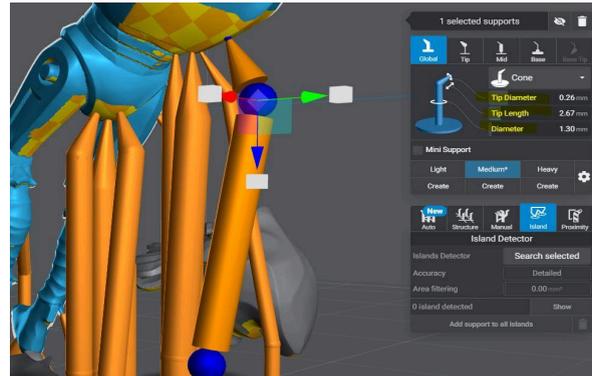


Figura 65. Edición avanzada de soportes.

Los valores habituales para los grosores de los soportes tienden a ser bastante más elevados de lo determinado a continuación porque la tendencia es imprimir figuras a mayor tamaño. Sin embargo, comparando proporcionalmente los grosores recomendados de la documentación de Lychee con la escala heroica de 28 mm, y tras las pruebas de impresión, se estima que el grosor adecuado para la punta del soporte más pesado es de 0.25 mm; de uno ligero, en torno a 0.13. Los valores serán ligeramente mayores para escala 32 mm. Los diámetros de los tallos pueden dejarse en 1mm, pero se intuye seguro reducirlos incluso hasta un 40% para ahorrar resina siempre y cuando no constituyan parte de las primeras capas; entiéndase como aproximadamente por encima ya de las rodillas de la escultura.

Escala Heroica	Punta Soporte Pesado	Punta Soporte Ligero
28 mm	0.25 mm	0.13 mm
32 mm	0.3 mm	0.2 mm

Tabla 4. Grosos de soportes recomendados para escala heroica.

Estos grosores, aún así, no son universales. Es preferible ponerlos más gruesos en las partes más bajas de la pieza para compensar la peel force y evitar que se desprenda la pieza. Otra medida de seguridad en partes bajas es asegurarse de que son del todo verticales.

Luego, para los detalles pequeños o para soportar huecos pequeños, es totalmente posible emplear soportes aún más finos. Lychee permite añadir micro-supports, que son piezas muy simples y delgadas sin articulación.

Una vez colocados los soportes, es posible juntarlos en rejilla para ahorrar material. Según la documentación de Lychee, aquellos más altos que 10 mm ya compensa estructurarlos en “grid”. Esta agrupación inteligente también ayuda a repartir mejor el peso, puesto que calcula el centro de gravedad de la pieza y redistribuye los soportes en consecuencia. Eso sí, es redundante para soportes muy cortos, que es preferible dejarlos verticales.

Tras experimentación práctica, se ha visto que los soportes no afectan tanto al gasto de resina como cabría suponer, además, quedarse corto en sujeción aunque sea solo en un punto, puede destrozar la pieza entera. Es preferible ser conservador con el número de soportes e incluso añadir alguno extra donde no hay overhangs si se considera que hay una zona vertical larga sin soportar. Esto último se debe a que no solo hay fuerzas verticales en la impresión, sino que también las hay horizontales. Es por esto que es preferible poner algún soporte extra aquí y allá para mayor seguridad y que no termine por ceder la pieza por uno de sus laterales aunque teóricamente no hiciera falta reforzar esa zona. Eso sí, tampoco es buena idea llevar este consejo al extremo: un exceso de soportes dificulta la legibilidad de la pieza por las marcas que deja, además de dificultar innecesariamente la extracción, pudiendo conllevar rotura.

Por último, se ha experimentado que no importa el grosor de los soportes y su número si la pieza es plana y paralela a la placa. Similar a un tejado sin inclinación cuando llueve mucho, termina por ceder bajo la enorme presión que se genera. Entonces, las bases para las miniaturas han de ir verticales y con una ligera inclinación para evitar stair stepping, aunque esto conlleve un gasto de soportes mayor que una colocación plana.

### **3.5.5. Venta Online**

El modelador particular, por lo general, no pretende montar su propio marketplace, por lo que prefiere aprovechar plataformas ya consolidadas, cosa que no requiere inversiones iniciales ni riesgos, solo una comisión por ingresos de venta.

Tras un análisis comparativo donde se han ido descartando otras opciones viables como Etsy (más orientado a producto físico que a STL), se concluye que las mejores opciones son Cults3D y MyMiniFactory.

Para un autónomo con pocas referencias, que quiere exponer sus STL online y venderlos sin muchas complicaciones, lo óptimo es abrir primero en Cults3D (por facilidad inmediata) y en paralelo preparar un perfil en MyMiniFactory, que tarda un poco más en montarse por la revisión manual, pero ofrece mejor visibilidad a nicho de miniaturas y es, por tanto, más escalable.

La tendencia más habitual de éxito en estos portales consiste en intercalar publicaciones de miniaturas singulares de mayor complejidad (héroes o personajes especiales) con unidades de combate completas por temática, donde se incluirían varias miniaturas diferentes, pero de la misma ambientación; normalmente entre 4 y 12 unidades.

## Capítulo 4. CONCLUSIONES

### 4.1 Conclusiones del trabajo

#### 4.1.1. Adecuación a los Objetivos

A continuación se listan uno por uno los objetivos inicialmente planteados y se expone su interpretación posterior a la obtención de los resultados, coincidiendo en número y en orden con los planteados en el apartado 1.3.2 Objetivos Específicos. Para una explicación detallada de las nuevas metodologías adaptadas tras concluir el proyecto, véase 3.5 Resultados.

1. Las técnicas de modelado empleadas para obtener miniaturas satisfactorias de cara a su producción física han coincidido con las previstas, a excepción de unos matices, que fueron, la imposibilidad de continuar aplicando retopología limpia a la pieza cuando el polycount excede aproximadamente los 250k, y la pérdida de efectividad de algunos pinceles conforme asciende el polycount. Todo esto se resume en un manejo de geometría aún más densa de lo estimado. Explicaciones detalladas al respecto se muestran en la sección 3.5.2.
2. El producto obtenido sí es satisfactorio para pintado, especialmente en cuanto a cambios de ángulos drásticos y superficies planas alargadas que ayudan a definir zonas pintables. En lo referente a la exageración de proporciones, el ajuste podría argumentarse que no está del todo calibrado de cara a pintado para alguna de las piezas, por lo que se benefician más de escalas ligeramente superiores a la heroica para incurrir bien en el pintado de detalles intrincados. Aún así, son plenamente pintables a 28 y 32 mm. El principal contratiempo a esta escala, que para nada es incapacitante, viene por otro lado que se indica más adelante.
3. Los resultados cumplen con siluetas y formas interesantes como para aguantar visionados de cerca y también de lejos. El posado y la exageración de proporciones han resultado ser pertinentes en este aspecto.
4. Estudiar cuáles son las prácticas de cara a un buen diseño de pieza que permita su correcta impresión y moldeo, y que a la vez mantenga la integridad de su estructura limitando la aparición de zonas endebles y no uniformes.
5. El procedimiento y la preparación de las piezas para impresión ha sido adecuado. Tras cinco intentos se terminaron de calibrar las necesidades de soportes, orientación, vaciado y drenaje de la escala heroica. La fabricación en moldes no ha llegado a producirse en la práctica por logística, pero se ha modificado la miniatura correspondiente para cumplir las necesidades. También se ha escaneado su viabilidad en moldes mediante un programa ingenieril de piezas, aunque el polycount permitido era muy bajo y, entonces, la pieza analizada no constituye un análisis estrictamente certero por tratarse de una versión diezmada.

6. El plan de suscripción mensual es adecuado, pero más restrictivo y va orientado a empresas de varios integrantes. Debido a la flexibilidad extra, muchos vendedores particulares prefieren sacar temáticas a precio variable de acuerdo a su calidad específica y a intervalos de tiempo que ellos mismos definen.
7. Se ha concluido que Cults3D y MyMiniFactory son los portales más adecuados para este tipo de proyecto y para el tipo de artista al que va dirigido. Existen explicaciones más detalladas al respecto en 3.5.5 Venta Online.

#### **4.1.1. Conclusiones de viabilidad**

El producto ha dado lugar a miniaturas que se pueden concebir en físico y que después pueden ser ensambladas de la forma intencionada por el diseño. Además, permiten su pintado mediante técnicas tradicionales del hobby, sin necesidad de recurrir a técnicas avanzadas por una mala planificación de las superficies pintables y sus detalles.

La evidenciación práctica del proceso para moldeo no ha sido posible por los motivos logísticos mencionados, pero sí se ha obtenido un modelo que a nivel teórico cumple con las buenas prácticas y consideraciones de cara a un diseño orientado a inyección en molde. No requeriría de muchos ajustes por parte del ingeniero.

Las miniaturas concebidas para impresión han salido enteras y sin desperfectos del proceso de impresión tras cinco procedimientos iterativos de ajustes y correcciones. El seccionamiento en partes ha sido funcional.

Otro factor determinante en la viabilidad de un producto es el tiempo de desarrollo, que no ha resultado competitivo a estándares profesionales por el factor académico y formativo de este proyecto, pero como ya se ha explicado en el apartado 3.4, era algo previsto. Tras la asimilación iterativa de todos los procesos de diseño, modelado y preparación para impresión, se calcula que el tiempo por miniatura podría reducirse del baremo aproximado de 40-50 h a tan solo unas 15 h.

Por último, queda incurrir en el factor costes. Al contar ya con acceso a una impresora SLA, ordenador con prestaciones suficientes y licencias de programa, los gastos suponen solo el material para la concepción física, que son el alcohol isopropílico (7€) y la resina ABS-Like 3 Pro de Elegoo (20€). El alcohol se ha terminado, pero el gasto de resina ha sido inferior al 15% del producto comprado, por lo que hay margen más que suficiente para fabricar muchas miniaturas más.

## **4.2 Conclusiones personales**

Desde una perspectiva personal, el desarrollo de este proyecto ha resultado especialmente relevante al posibilitar la creación de miniaturas que han podido materializarse físicamente mediante técnicas de impresión 3D. Esta circunstancia adquiere un valor añadido considerando el interés sostenido que mantengo por este ámbito desde hace años.

Si bien el proyecto no alcanzó la etapa de fabricación mediante moldes, debido a restricciones logísticas y a la necesidad de equipamiento pesado específico (como compresores industriales), la experiencia ha permitido aproximarse de manera práctica a la viabilidad técnica del modelado para producción.

Las miniaturas diseñadas han pasado a formar parte de una colección personal, la cual se prevé continuar ampliando tanto a nivel individual como potencialmente en el marco de futuras oportunidades profesionales vinculadas a este sector.

## Capítulo 5. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Aunque en el presente documento se exponen la mayoría de consideraciones a tener en cuenta desde el punto de vista del artista modelador para miniaturas, se pueden plantear posibles futuras líneas de trabajo desde otros puntos de vista, que son el ámbito ingenieril y el del usuario final.

Desde el ángulo de la ingeniería las posibles vías de investigación son muchas. Algunos ejemplos más evidentes son:

- Indagar acerca de viabilidades para moldeo de mallas triangularizadas complejas.
- Estudios exhaustivos de costes por material.
- Evaluación del coste por unidad de miniaturas en tiradas cortas (solo impresión 3D), medias (moldeo de resina) y largas (moldeo por inyección).
- Estudios de escalabilidad de diseño modular en miniaturas (como sistemas de armas intercambiables).
- Evaluación de la reciclabilidad de soportes y coladas de ambos procesos.

Desde el punto de vista del usuario algunas líneas futuras de trabajo son:

- Estudios de preferencias visuales y hápticas según material o método.
- Estudios de diseño de coladas para mejor retirada de piezas.
- Evaluaciones de los diferentes tipos de pestaña de ensamblaje en función de preferencias de entusiastas del hobby de miniaturas.

## Capítulo 6. REFERENCIAS

### 6.1. Libros y artículos de investigación

- Click, M. A. et al. (2018). *The Routledge Companion to Media Fandom*. Routledge. ISBN 978-1-138-63892-1
- Dorca Bis, A. (2008). *El hobby de los soldados en miniatura: el Wargame, el rol, el modelismo y el coleccionismo*. Biblioteca Nacional d'Andorra. ISBN 978-9-9920-1701-2
- Garret, B., Redwood, B., & Schöffner, F. (2017). *The 3D Printing Handbook*. 3D HUBs. ISBN 978-9-0827-4850-5
- Gahan, A. (2011). *3dsMax Modelling for Games: Insider's Guide to Game Character, Vehicle, and Environment Modeling*. Elsevier. ISBN 978-0-240-81582-4
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies*. Springer. ISBN 978-1-4939-2112-6
- Malloy, R.A. (2010). *Plastic Part Design for Injection Molding*. Hanser Publishers. ISBN 978-1-56990-436-7
- O.Kazmer, D. (2007). *Injection Mold Design Engineering*. Hanser Publishers. ISBN 978-3-446-41266-8
- Osipa, J. (2010). *Stop Staring: Facial Modelling and Animation Done Right*. Wiley Publishing. ISBN 978-0-470-60990-3
- Priestley, R. (2008). *Cómo Pintar Miniaturas Citadel*. Games Workshop. ISBN 978-1841548715
- Rehak, B. (2018). From Model Building to 3D printing: Star Trek and Build Code across the Analog/Digital Divide. En M. A. Click & S. Scott (Eds.), *The Routledge Companion to Media Fandom* (pp. 114–122). Routledge. ISBN 978-1-138-63892-1
- Spencer, S. (2011). *ZBrush Character Creation, Advanced Digital Sculpting*. Wiley Publishing. ISBN 978-0-470-57257-3

### 6.2. Otras fuentes referenciadas

#### Cursos

- FlippedNormals Exclusives (2022). *Introduction to Sculpting* [Curso online]. Flipped Normals. <https://flippednormals.com/product/introduction-to-sculpting-4846>
- Nexttut Education (2022). *Zbrush to 3D Printing: Bring your 3D models to Life* [Curso online]. Flipped Normals. <https://flippednormals.com/product/zbrush-to-3d-printing-bring-your-3d-models-to-life-19060>
- Wiesen, Logan (2024). *Character Sculpting Masterclass* [Curso online]. Flipped Normals. <https://flippednormals.com/product/character-sculpting-masterclass-42600>

### Artículos

- Autodesk (n.d.). *Retopology: Unlocking new horizons in 3D artistry*. Autodesk.com. <https://www.autodesk.com/solutions/retopology#:~:text=Retopology%20is%20the%20process%20of,time%20rendering%2C%20or%203D%20printing.>
- Daan Meysman (2019). *Keeping your games 'optimized': Part 1 - Triangles*. ArtStation. <https://www.artstation.com/blogs/daanmeysman/7goy/keeping-your-games-optimize-d-part-1-triangles>
- Impresoras3D.com (2023, 9 de febrero). *Breve historia de la impresión 3D*. Impresoras 3D Everything to Create. <https://www.impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresion-3d/>
- Moldblade (n.d.). *Fases del ciclo de inyección*. Recuperado el 14 de diciembre de 2024 de <https://moldblade.com/fases-del-ciclo-de-inyeccion/>
- Protolabs (n.d.). *7 Mistakes to Avoid when Designing 3D Printed Parts*. Recuperado el 9 de diciembre de 2024 de <https://www.protolabs.com/resources/design-tips/7-mistakes-to-avoid-when-designing-3d-printed-parts/>
- Protolabs (n.d.). *How to Design STL Files for 3D Printing in your CAD Program*. Recuperado el 9 de diciembre de 2024 de <https://www.protolabs.com/resources/design-tips/how-to-design-stl-files-for-3d-printing-in-your-cad-program/>
- Verified Market Reports (2025, marzo). *Insights del Mercado de Modelado 3D*. Recuperado el 15 de marzo de 2025 de [https://www.verifiedmarketreports.com/es/product/3d-modeling-market/?utm\\_source=chatgpt.com/](https://www.verifiedmarketreports.com/es/product/3d-modeling-market/?utm_source=chatgpt.com/)

### Vídeos

- Emil Nyström [Squidmar Miniatures] (2022, 1 de noviembre). *Ultimate guide to painting your first miniature - everything you need to know* [Archivo de Vídeo]. Youtube. [https://www.youtube.com/watch?v=S7-At4qVC84&list=PLOGMASWJqvBsjSjZyxW\\_LxqWi9cyNq16G](https://www.youtube.com/watch?v=S7-At4qVC84&list=PLOGMASWJqvBsjSjZyxW_LxqWi9cyNq16G)
- Emil Nyström [Squidmar Miniatures] (2024, 24 de abril). *Ultimate Guide to painting Freehands on Warhammer - beginner guide* [Archivo de Vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=AUyghniU2U8>
- Epics'N'Stuffs (2020, 28 de marzo). *Supports for 3D Printing Miniatures* [Archivo de Vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=yC4wJmo8A7M>

- Goobertown Hobbies (2022, 23 de octubre). *How Models are Made: Injection Molding Hard Plastic Sprues - HIPS Polystyrene Minis* [Archivo de Vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=jKMSLoAsNbk>
- Goobertown Hobbies (2024, 21 de noviembre). *How Models and Minis are Made (ALL 4 Types!) Factory Behind the Scenes Manufacturing Miniatures* [Archivo de Vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=wDlbH3T91Nk>
- iPaintSmallThings (2021, 25 de junio). *How to split models in Blender | Bisect tool* [Archivo de Vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=PflOxnRXNSo>
- MCDM (2019, 4 de abril). *Casting Resin Minis with Trenchworx | MCDM Garage* [Archivo de Vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=3TmdV38WEoQ>
- Miniac (2023, 23 de agosto). *How Miniatures Are Made | Factory Tour - Molding, Casting, Laser Cutting and More!* [Archivo de Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=im3l0HVA1vl&t=81s>
- MS\_Paints (2023, 8 de octubre). *How PLASTIC MINIATURES Are Made - Full Factory Process* [Archivo de Vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=pp7o5tqE4Xg&t=10s>
- Print That Thing (2021, 1 de septiembre). *Hollow Out Any #3DPrint Design | Blender for 3D Printing* [Archivo de Vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=A56g5VkznUA>

#### Plataformas

- 3Dprinting Sub-Reddit (primera publicación 2010, 4 de marzo ). *3Dprinting*. Reddit. Recuperado el 9 de diciembre de 2024 de <https://www.reddit.com/r/3Dprinting/>
- Lychee Documentation (s.f.). *Mango3D*. Recuperado el 7 de julio de 2025 de <https://doc.mango3d.io/>
- The Miniatures Page (s.f.). Recuperado el 9 de diciembre de 2024 de <http://theminaturespacer/3Dprinting.com/>

### 6.3. Imágenes

Todas las imágenes que aparecen a lo largo de este documento han sido elaboradas por el autor, ya sea mediante herramientas de creación manual, fotografías propias, capturas de pantalla o con el apoyo de inteligencia artificial de pago, en cuyo último caso se dispone de los correspondientes derechos de uso para fines académicos. De este modo, se garantiza que no se infringen derechos de terceros. La IA generativa empleada ha sido DALL.E 3.

## Capítulo 7. ANEXOS

### Capturas en Vídeo de Cómo se ha hecho el Producto

Al tratarse de un proyecto de carácter práctico, muchos de los procesos pueden resultar difíciles de entender tan solo por escrito. Es por esto que se han realizado grabaciones de partes concretas del desarrollo para ampliar información y clarificar con ejemplos reales. Algunos de estos vídeos son timelapse, es decir, procesos largos acelerados a cámara rápida, y otros son tutoriales paso a paso con aclaraciones en voz.

- Modelado General, toma de decisiones para una malla base de gnomo:  
<https://youtu.be/aW4ZXBREvy0>
- Ejemplo de cómo se hicieron partes duras y ropa en ZBrush a partir de “extracts”:  
<https://youtu.be/TBbRzbaGuUc>
- Cómo empezar a detallar (Trim Dynamic, Pinch, Dam Standard):  
<https://youtu.be/XMhZjA9Xsi0>
- Cómo cortar una pieza de forma orgánica:  
<https://www.youtube.com/watch?v=ld8qQuFQFXk>

### Juego de Mesa

#### INTRODUCCIÓN

La venta de miniaturas siempre es más atractiva cuando va orientada a juegos de mesa, ya que es otro aliciente extra además del pintado. También ayuda a aumentar el número de ventas gracias al factor coleccionismo, que tiene mayor peso si se describe a la miniatura como una parte de un todo. Se fomenta así la venta por la necesidad de compleción que se genera en algunas personas. Si una miniatura no resulta atractiva a un cliente particular, es más probable que la compre si de esa manera completa la temática a la que pertenece. Entonces, aportar un worldbuilding y reglas de juego es una buena estrategia de venta.

El trasfondo del mundo en el que se ambientan las miniaturas hechas para este producto ya había sido creado con anterioridad en conjunto con otros dos alumnos para la asignatura de Narrativa y Guión de Videojuegos. Ambos han dado su consentimiento para compartir el trabajo en cuestión, que puede leerse aquí:

<https://drive.google.com/file/d/153tHSjkrCcBG-eaPMgQJM8SxTejQhmSc/view?usp=sharing>

Puede observarse que los conceptos originales, aunque también son de autoría propia, ya venían de entonces.

## REGLAS

### 1. Objetivo del juego

El objetivo principal del juego es incapacitar al equipo rival, logrando que el adversario quede imposibilitado de continuar el enfrentamiento según las reglas de despliegue. La victoria se alcanza cuando:

- Todas las miniaturas del rival han sido eliminadas (incluyendo reservas), o
- Tras un turno completo de ataques del adversario, el jugador queda sin miniaturas activas en el campo y no dispone de reservas para reconstituir su formación.

### 2. Composición inicial del equipo y despliegue

- Cada jugador conforma su equipo con cinco miniaturas, sujetas al límite máximo de dos del mismo rol.
- Al comenzar la partida, cada jugador debe desplegar exactamente tres miniaturas sobre el campo, alineadas en formación lineal frente a las tres miniaturas rivales.
- Las dos miniaturas restantes permanecen en reserva, para ser empleadas mediante los mecanismos de sustitución.

### 3. Formación y restricciones de objetivo

#### Posición fija

Las miniaturas se mantienen estáticas durante toda la partida, ubicadas en una línea frente a la del oponente.

#### Alcance y limitación de ataque

- La miniatura central puede atacar libremente a cualquiera de las tres miniaturas rivales.
- Las miniaturas situadas en los flancos solo pueden atacar a:
  - La miniatura que tienen directamente frente a ellas, o
  - La miniatura central del adversario.

Para impactar a la miniatura del flanco opuesto, deben disponer de armas o habilidades explícitamente indicadas como de alcance que les permitan ignorar dichas restricciones.

#### 4. Mecánica de turnos y puntos de acción (PA)

##### Turnos

El juego se desarrolla en turnos alternos.

Cada jugador dispone en su turno de 4 puntos de acción (PA), los cuales puede distribuir entre sus miniaturas activas a voluntad.

##### Costes

- Ataque básico: 1 PA.
- Uso de habilidad especial: 2 o 3 PA, según lo indicado en la ficha.
- Uso de objeto o artefacto: 1 o 2 PA.
- Preparar (concentrarse): 1 PA.

#### 5. Sistema de daño basado en dados poliédricos

Cada ataque posee:

- Un daño base fijo, derivado de las estadísticas de la miniatura y del arma empleada.
- Además, incluye una tirada de dado poliédrico (p.ej., +1d3, +1d4, +1d6, etc.), reflejando el componente variable del impacto, análogo al sistema empleado en juegos como *Dungeons & Dragons*.

El cálculo del daño previo a resistencias es:

Daño infligido = daño base + tirada del dado asociado al arma/habilidad

Posteriormente se aplican las reducciones por resistencias según el tipo (AP, RM o BT).

## 6. Acción de concentración revisada

Preparar ataque (concentración)

- Gastar 1 PA en concentrarse otorga a la miniatura un estado temporal que afecta únicamente a su próximo ataque (ya sea básico o especial, siempre que sea un ataque dirigido).
- En ese próximo ataque, el jugador tirará un dado adicional del mismo tipo (por ejemplo, si el ataque incluye **+1 d6**, lanzará 2d6 en vez de 1d6) y escogerá el resultado más alto.

Esto no incrementa el daño fijo, sino que únicamente mejora la expectativa del dado variable, representando el foco y preparación en el golpe.

## 7. Sustituciones tras bajas y cambios voluntarios

- Cada jugador dispone de hasta dos cambios voluntarios por partida, que puede realizar gastando 1 PA en su turno, retirando una miniatura activa para desplegar una de la reserva.
- Adicionalmente, tras la eliminación de una miniatura durante el turno del adversario, el jugador está obligado al inicio de su propio turno a sustituirla inmediatamente por una miniatura de reserva, sin consumir PA ni computarse como cambio voluntario.

## 8. Condición de derrota

Un jugador será derrotado automáticamente si:

1. No dispone de ninguna miniatura viva (en campo ni en reserva), o bien
2. Tras un turno completo del adversario, sus tres miniaturas activas son eliminadas simultáneamente, sin posibilidad reglamentaria de desplegar una sustitución inmediata por falta de reservas.

Así, se permite continuar la partida con menos de tres miniaturas activas si ello ocurre por la imposibilidad de reemplazo inmediato y no por un descuido táctico que conlleve la eliminación absoluta tras un único turno adversario.

## 9. Tipos de daño y resistencias

- Físico: reducido por Armadura Física (AP).
- Mágico: reducido por Resistencia Mágica (RM).
- Tecnológico: reducido por Blindaje Tecnológico (BT).

El cálculo final es:

Daño recibido = máximo (0, daño total - resistencia aplicable)

## 10. Habilidades, cooldowns y estados alterados

Cada miniatura dispone de:

- Un ataque básico, sin límite de uso.
- Dos habilidades especiales, sujetas a un tiempo de recarga (cooldown) de 2 o 3 turnos.

Los ataques y habilidades pueden además inducir:

- Quemado: +1 de daño al inicio del turno.
- Congelado: pierde la ventaja de concentración y sufre -1 a resistencias hasta el próximo turno.
- Aturdido: pierde su próxima acción principal.

## 11. Ejemplo de ficha técnica

Nombre	Rol	HP	AP	RM	BT	Ataque Básico	Habilidad 1 (CD)	Habilidad 2 (CD)
Yënkul Vanguardia Puño	Tanque	20	5	1	0	3 +1d4 físico	Golpe Escudo (2)	Provocar (3)
Arboromante Sombranudo Legorn	Soporte	14	1	4	1	2 +1d6 mágico	Curar 1d8 (2)	Bosque Pútrido (3)
Yënkul Artill.	Especial	16	2	1	4	1 +1d8 tecno	Granada (2)	Trampa Mina (3)

## 12. Observaciones finales

Este sistema mantiene el componente estratégico del wargame por escuadras, integrando la incertidumbre de los dados poliédricos, así como una mecánica de concentración que premia la toma de riesgos calculados mediante la maximización del dado más alto. Así se logra un equilibrio entre gestión táctica, aleatoriedad controlada y fluidez de juego.

[PÁGINA EN BLANCO]