



Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Artes
Departamento de Design

Felipe Rodrigues Pasmadjian

**PROCEDIMENTO DE MODELAGEM DE MINIATURAS ADEQUADAS PARA
IMPRESSÃO 3D EM MODELAGEM DE DEPOSIÇÃO FUNDIDA**

BRASÍLIA, DF
2023

Felipe Rodrigues Pasmadjian

**PROCEDIMENTO DE MODELAGEM DE MINIATURAS ADEQUADAS PARA
IMPRESSÃO 3D EM MODELAGEM DE DEPOSIÇÃO FUNDIDA**

Monografia de Conclusão de Curso com
habilitação em Programação Visual do
curso de Design ministrado na
Universidade de Brasília.

Orientação: Professor Gabriel Lyra Chaves

BRASÍLIA, DF
2023

RESUMO

Este projeto analisa o contexto atual da produção de peças para modelismo, o cenário de produção por manufatura aditiva e procedimentos de modelagem 3D para investigar se a aplicação de práticas de modelagem para impressão 3D no processo comum de modelagem digital contribui para os resultados alcançados com maior fidelidade na impressão de miniaturas com Modelagem de Deposição Fundida (FDM). Para isto, propõe um método estruturado em fluxograma. Este método foi organizado, implementado e aprimorado, resultando em uma sequência de etapas úteis a quem pretende modelar um arquivo com a finalidade de ser impresso em um sistema FDM.

Palavras-chave: Impressão 3D, Modelagem para Manufatura Aditiva, Miniatura, Modelismo, Modelagem de Deposição Fundida, Modelagem 3D.

ABSTRACT

This work analyzes the current context of the *miniaturizing* scene, the additive manufacturing work process and 3D character modeling procedures to investigate if applying modeling practices for filament printing to a common digital modeling workflow contributes to a higher level of fidelity in miniature prints with the Fused Deposition Modeling (FDM) process. For such a case, a procedure is proposed in the form of flowchart. This method has been organized, implemented and improved upon, resulting in a sequence of useful steps for those interested in modeling a file for printing in filament on a FDM machine.

Keywords: 3D Printing, Modeling for Additive Manufacturing, Miniatures, Miniaturizing, Fused Deposition Modeling, 3D Modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração explicativa de ilhas em impressão 3D	13
Figura 2 - Ilustração de overhangs de impressão 3D	13
Figura 3 - Ilustração de pontes de impressão 3D	1
Figura 4 - Variação do perímetro interno.	2
Figura 5 -Validador de dimensões	4
Figura 6 - Aplicação do validador de dimensões	5
Figura 7 - Método de Lima e Meurer	6
Figura 8 - Framework de produção	8
Figura 9 - Capitão Adalbert Steiner - personagem de Final Fantasy IX	11
Figura 10 - Referências visuais do personagem	12
Figura 11 - Desenhos de poses para a modelagem	13
Figura 12 - Modelagem em baixa definição (Low poly) do personagem	14
Figura 13 - Identificação de ilhas de impressão usando o validador	14
Figura 14 - Avaliação de ângulos através do validador.	15
Figura 15 - Resultado da etapa de estética	16
Figura 16 - Análise do modelo no fatiador Cura	17
Figura 16 - Partes incompletas do modelo e correção	17
Figura 17 - Partes do modelo após correção	18
Figura 18 - Resultados da Prusa MK3S de bico 0.4 (esquerda) e Ender 3 de Bico 0.4	19
Figura 19 - Correção do modelo após experimento	20
Figura 20 - Resultados do modelo 2 na Ender 3 de Bico 0.4	20
Figura 21 - Testes de impressão.	21
Figura 22 - Resultado da Impressão com escalímetro e moeda para escala	22
Figura 23 - Nave Vudu, do jogo Starcraft 2	23
Figura 24 - Referências visuais da nave	24
Figura 25 - Desenhos para a modelagem	25
Figura 26 - Modelagem low poly da nave	26
Figura 27 - Conferência de ângulos com validador.	26
Figura 28 - Resultado da etapa de estética	27
Figura 29 - Avaliação da etapa com o validador.	27
Figura 30 - Fatiamento de cada parte separada para impressão.	28
Figura 31 - Resultado da impressão das turbinas vista frontal e lateral	29
Figura 32 - Resultado da impressão das hélices traseiras	29
Figura 33 - Resultado da impressão das asas traseiras.	30
Figura 34 - Resultado da impressão das hélices.	30
Figura 35 - Junção do modelo da hélice e corpo em um só.	30
Figura 36 - Correção da espessura da asa da turbina verificando com validador.	31
Figura 37 - Fatiamento e impressão das partes ajustadas.	31
Figura 38 - Resultado da impressão das partes ajustadas	32
Figura 39 - Resultado da montagem das peças impressas com escalímetro e moeda para escala.	32

Figura 40 - Dragão-dos-alpes do sistema de RPG Ryuutama	33
Figura 41 - Referências visuais da criatura	34
Figura 42 - Ilustrações para orientação da modelagem da criatura	35
Figura 43 - Modelagem em baixa definição (Low poly) da criatura	35
Figura 44 - Avaliação de ângulos através do validador.	36
Figura 45- Verificação e correção da espessura do chifre	36
Figura 46 - Modelagem da criatura depois da etapa de estética.	37
Figura 47 - Avaliação de ângulos através do validador.	38
Figura 48 - Modelo desalinhado a mesa de impressão	39
Figura 49 - Modelo alinhado a mesa de impressão	39
Figura 50 - Vista frontal e lateral da impressão da criatura.	40
Figura 51 - Verificação no fatiador da falha na boca	40
Figura 52 - Correção do modelo e verificação no fatiador.	41
Figura 53 - Vista lateral do resultado impresso com escalímetro e moeda para escala.	41
Figura 54 - Fluxograma adaptado	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVOS.....	10
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	11
3.1. Modelismo, jogos de RPG e escalas.....	11
3.2. Impressão 3D de miniaturas.....	13
3.3 Processo de modelagem para impressão FDM.....	14
3.4 Processo de modelagem, adaptações e validador.....	4
4. METODOLOGIA.....	6
4.1. Modelagem, Projeto e Metaprojeto.....	6
4.2. Framework de criação.....	7
5. IMPLEMENTAÇÃO.....	10
5.1 Personagem humano.....	10
5.1.1 Estratégia.....	11
5.1.2 Escopo.....	11
5.1.3 Esqueleto.....	12
5.1.4 Pré-Estética.....	13
5.1.5 Estética.....	15
5.1.6 Experimento.....	17
5.2 Veículo de ficção-científica.....	23
5.2.1 Estratégia.....	23
5.2.2 Escopo.....	24
5.2.3 Esqueleto.....	25
5.2.4 Pré-Estética.....	25
5.2.5 Estética.....	26
5.2.6 Experimento.....	28
5.3 Criatura de cenário de fantasia.....	32
5.3.1 Estratégia.....	33
5.3.2 Escopo.....	33
5.3.3 Esqueleto.....	34
5.3.4 Pré-Estética.....	35
5.3.5 Estética.....	37
5.3.6 Experimento.....	38
6. RESULTADOS.....	41
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
8. REFERÊNCIAS.....	46

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os processos de fabricação digital por impressão 3D tornaram-se mais conhecidos, menos complexos e com custos mais acessíveis para o público geral, quebrando o anterior monopólio da indústria produtiva. Isso impulsionou o processo de manufatura aditiva e sua popularização, aumentando o uso doméstico e permitindo que comunidades ofereçam serviços para casos mais específicos de modelagem e criação de produtos personalizados. Plataformas de compartilhamento e venda digital de modelos para impressão, como Printables, Thingiverse e Cults 3D, oferecem modelos e cursos para a operação destas impressoras.

Esta mudança de cenário beneficiou nichos específicos, como os de projeto e venda de jogos de tabuleiro, RPGs, *wargames* e modelismo. Estas atividades dependiam de produtos importados e caros, além de envolverem situações que baixa tiragem ou falhas logísticas poderiam impedir a conclusão de um projeto comercializado em etapas. Isso se tornava um obstáculo para estes nichos. Atualmente, é possível encontrar nas plataformas digitais modelos voltados para usuários experientes ou para iniciantes, gratuitos ou com preços variados. Também surgem fornecedores locais, equipados com máquinas de manufatura aditiva, que podem fazer e vender tais peças.

Apesar disso, percebe-se que boa parte dos modelos de miniaturas disponíveis foram feitos considerando impressão 3D do tipo Estereolitografia (SLA), um processo que exige máquinas específicas que usam resinas para fabricação e oferecem mais detalhes para peças pequenas. Apesar destas vantagens, impressoras SLA geram resíduos tóxicos e são mais perigosas de manusear que a alternativa mais comum e barata para impressão 3D, a Modelagem por Deposição Fundida (FDM), que utiliza filamentos de plástico aquecidos. Os modelos digitais geralmente têm formas extenuantes para impressoras de filamento, gerando resultados finais indesejáveis como superfícies com acabamento irregular, em casos triviais, ou mesmo objetos impossíveis de serem impressos, dada sua complexidade.

Em que pesem as relações entre modelagem e impressão FDM, julgamos útil compilar, complementar e disseminar critérios de modelagem que facilitem a impressão de objetos. Entendemos que a divulgação de boas práticas de modelagem cria uma maior capilaridade para modelos que apresentarão bons resultados quando impressos. E, para além disso, percebemos que a adoção destes critérios no campo dos jogos digitais pode contribuir para mobilizar ou consolidar uma base de usuários interessados em possuir ou produzir miniaturas. Sendo assim, um processo de modelagem que considere a impressão em filamento e, com isso, os critérios que levam a uma boa qualidade de acabamento neste meio, pode oferecer mais opções de modelos e aumentar o público, alcançando tanto modelador quanto vendedores de peças impressas e usuários que possuam suas próprias impressoras.

Para levantar e compartilhar estes critérios, foi realizada uma pesquisa exploratória, a partir da qual se levantou um grupo de autores-chave para tratar do tema, articulado em dois eixos: boas práticas de impressão FDM e boas práticas de modelagem 3D. Uma vez que a pesquisa bibliográfica foi concluída, notou-se a existência de lacunas, endereçadas e compartilhadas neste texto. A partir deste esforço, desenhou-se um fluxo de trabalho ou framework que auxilia os processos de produção, verificação e mesmo redesign de modelos 3D voltados à impressão FDM.

Este trabalho propõe investigar se a adaptação do processo de modelagem de esculturas digitais para miniaturas aplicando critérios para identificação e redução de pontos de dificuldade de impressão durante a modelagem resultaria em um nível de acabamento mais fiel à peça projetada após a produção em impressoras FDM.

Para isso, serão levantados critérios de modelagem que facilitam a produção da peça na literatura já existente sobre impressão FDM e quais melhor se aplicam para o contexto.

Em seguida, será adaptado o procedimento de modelagem digital para incluir esses pontos levantados, que constituirá o procedimento que será aplicado em modelos de testes, estruturando o procedimento em um fluxo de trabalho para ser aplicado em prática.

Para testar a implementação, três miniaturas de cenários diferentes serão modelados utilizando o procedimento elaborado anteriormente, verificando a

integração dos critérios ao processo, o nível de fidelidade entre o modelo projetado e o resultado final e se houve alguma diferença notável entre as peças resultantes.

2. REVISÃO DE LITERATURA

§ 2.1. Modelismo, jogos de RPG e escalas

O interesse por modelismo vai além de jogos geralmente associados a miniaturas. Meriläinen et al. (2022, tradução nossa) definem a atividade de *Miniaturizing* como “formado por um núcleo duplo de atividades organizadas ao redor de artesanato (pintura e modificações) e jogo, apesar de storytelling, colecionar, socializar e apreciar também estarem presentes” (Meriläinen et al., 2011, p.83).

Sua popularidade se relaciona à de outras atividades que introduziram a ideia de miniaturas para representar cenários e personagens reais, históricos ou fictícios. Maquetes e dioramas, por exemplo, criam cenários realistas em escalas reduzidas para fins industriais, artísticos ou educativos. *Wargames* utilizam miniaturas de personagens para representarem tropas de soldados a serem posicionadas em um campo de batalha para simular combate, recriando momentos históricos ou encenando eventos fictícios. A partir destes surgiu a inspiração para os jogos de RPG, que substituíram os exércitos por representações dos personagens, criando uma conexão entre a história narrada e o espaço material (Tresca, 2011, p.47).

Esta representação acontece em diferentes escalas, dependendo do cenário e objeto representado conforme demonstrado na Tabela 1. Cenários que envolvem naves, aviões ou veículos costumam usar uma escala de redução maior para poupar espaço e facilitar conversões. Objetos de ferromodelismo usam de escalas entre 1:160 e 1:48. Já personagens para jogos de RPG costumam usar uma escala relativa “absoluta”, onde o modelador cria as miniaturas dentro de um tamanho pré-estabelecido, como 30 mm, mas que pode ser mapeado para a escala de um humano de uma certa altura, como na escala 1:56, na qual uma pessoa de 1,80 m seria representada com altura de 32 mm.

Tabela 1 - Tamanho e escala de miniaturas: Conversão para escala relativa de miniaturas de escalas absolutas

Altura (cm)	Tamanho Humano	Ponto de medida	1:72 (mm)	1:64 (mm)	1:61 (mm)	1:58 (mm)	1:56 (mm)	1:50 (mm)	1:48 (mm)	1:35 (mm)	1:32 (mm)
210	Humano alto (WH40K <i>space marine</i>)	Topo da cabeça	29.1	32.8	34.4	36.2	37.5	42	43.8	60	65.6

Fonte: KADMON. The complete guide to miniature size and miniature scale. Disponível em: <<https://alkony.enerla.net/english/the-nexus/miniatures-nexus/miniature-hobby/miniature-size-miniatur-e-scale>> Acesso em 11 jun. 2024

Apesar da sua ligação com outras atividades, o modelismo se desenvolve independente de uma finalidade prática, como jogos ou maquetes. Um entusiasta pode se interessar simplesmente pelo processo de montagem, alteração e pintura de seus modelos, nunca os utilizando em contexto de jogo. Pode, ainda, combinar modelos de diferentes fabricantes ou até criar seus próprios modelos. Tresca (2011, p.55) indica que a atividade de customização e pintura de figuras serve também para demonstrar as habilidades artísticas do praticante.

No entanto, quanto mais dependente das peças, mais cara a atividade se torna. Wargames que dependem de dezenas de unidades em jogo, como do cenário

Warhammer, alcançam preços exorbitantes se adquiridos por meio de conjuntos oficiais, principalmente em países com poucas ou nenhuma loja oficial. Comparativamente, os jogos de RPG conseguiram se difundir mais facilmente por não dependerem de miniaturas, sendo papel e caneta suficientes para criar as representações usadas em jogo, o que se consolidou em uma forma mais simples e comum de se jogar.

Com a maior popularização da impressão 3D e com a criação de comunidades de compartilhamento de modelos na internet, fãs perceberam a oportunidade de modelar suas próprias peças e compartilhar com outros entusiastas, permitindo que quem tiver acesso a uma impressora 3D, por meio de espaços maker, universidades, empresas prestadoras de serviço de impressão ou possuir equipamento próprio, também possa imprimir ou criar seu próprio jogo e conjuntos de miniaturas.

§ 2.2. Impressão 3D de miniaturas

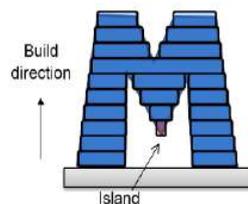
O acesso a impressoras 3D facilita o desenvolvimento e distribuição de jogos de tabuleiro e sistemas de RPG pela internet. Desenvolvedores como Ill Gotten Games e Fat Dragon Games lançam regularmente jogos e suplementos online, disponibilizando regras e arquivos para impressão, ganhando independência de parques industriais ou rede logística de distribuição. O site Hero Forge permite criar miniaturas de personagens de RPG customizadas, com opção de encomendar o modelo físico ou comprar o arquivo digital para impressão.

Victor Araújo de Paula (2021) e José Francisco Ferrari Filho (2022) publicaram trabalhos sobre modelagem para impressão 3D. O primeiro seguiu o processo de criação de personagens e testou modelos em sistemas de impressão SLA e FDM, enquanto o segundo adaptou o processo de modelagem para jogos digitais de Alessandro Lima e Heli Meurer (2011) para impressão SLA. Ambos os processos ainda partem da transição da escultura digital para a impressão, o que pode não resultar em modelos ideais para impressoras FDM. Isso se dá porque tanto as técnicas de escultura digital quanto os softwares de modelagem permitem adicionar detalhes que desaparecerão na escala reduzida do modelo, exigindo impressoras de alta resolução, como SLA, e tornando os modelos inviáveis para impressoras FDM.

2.3. Processo de modelagem para impressão FDM

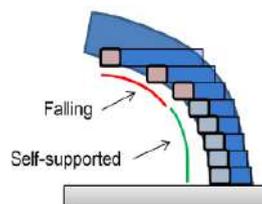
Considerar as características de modelos 3D que facilitam ou dificultam o processo de impressão FDM durante o processo de modelagem pode levar a resultados com maior nível de acabamento e mais próximos ao modelo desejado, como indicaram Livesu et al. (2017). Estes autores listam problemas que são geralmente encontrados no processo de impressão e nas diversas características que são buscadas quando se imprime um modelo 3D. Dependendo de seu propósito e de como atingi-lo, os autores indicam que, “em muitos casos, a mudança no próprio projeto faria uma grande diferença em termos de Manufatura Aditiva” (Livesu et al., 2017, p.20). O principal ponto para peças deste caso seria a “fidelidade”, que pode ser perdida por causa de deformações na peça ou pela incapacidade do sistema de impressão em capturar e realizar os detalhes presentes no modelo.

Figura 1 - Ilustração explicativa de ilhas em impressão 3D



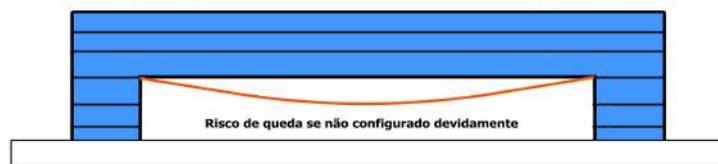
Fonte: Livesu et al., 2017

Figura 2 - Ilustração de *overhangs* de impressão 3D



Fonte: Livesu et al., 2017

Figura 3 - Ilustração de pontes de impressão 3D



Fonte: Livesu et al., 2017.

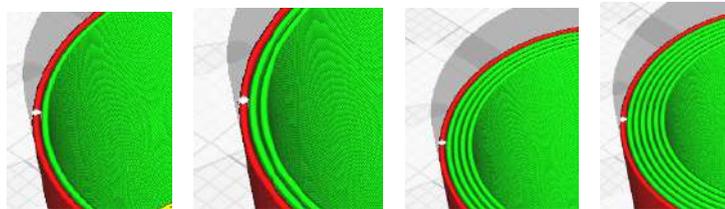
Situações comuns – como *overhangs*, ilhas e pontes –, se não forem consideradas, podem causar deformações na superfície com maior frequência. Chamamos (i) ilhas ao que acontece quando, ao chegar em uma certa camada do processo de impressão, o bico da extrusora não teria contato com nenhuma outra parte já impressa da peça ou com a mesa de impressão, efetivamente imprimindo aquela parte no ar (Figura 1). (ii) *Overhangs* são partes que se estendem em ângulo oblíquo ao eixo vertical de impressão. Quanto mais oblíquo for o ângulo, menor será o apoio que sustenta este volume (Figura 2), aumentando as chances de queda do filamento derretido. (iii) Pontes se referem a superfícies suspensas, que estão conectadas em dois ou mais pontos de suas extremidades. Com parte destas superfícies está suspensa no ar, incorre-se no risco de deformação das mesmas, sendo necessários testes de temperatura e resfriamento para que o filamento não caia durante a passagem (Figura 3).

Falhas nesses pontos são geralmente evitadas aplicando estruturas extras, chamadas “suportes”: colunas de filamento de baixa espessura e resistência, destinadas a sustentar temporária a superfície durante sua impressão e à posterior remoção. Embora esse recurso permita contornar problemas de ilha, *overhang* e ponte, as superfícies diretamente acima dos suportes sofrem perda de qualidade pois estes, quando removidos, deixarão imperfeições. Quanto menos suporte uma impressão precisar, melhor será o acabamento, com a peça idealmente sendo impressa sem suporte algum (Livesu et al, 2017).

Além disso, para poder imprimir o projeto em uma impressora FDM, o modelador deve se atentar ao diâmetro de extrusão da máquina. As impressoras Ender-3 da fabricante *Creality*, por padrão, utilizam bicos com abertura de 0.4 mm, podendo ser trocados por tamanhos menores (como 0.3 e 0.2 mm) ou maiores (como 0.6 ou 0.8 mm). Isso determina o diâmetro mínimo de filamento que a impressora irá depositar. Modelos que tenham detalhes menores que esta abertura dificilmente resultaram em uma impressão consistente.

Em sua documentação, a fabricante de impressoras *Prusa* recomenda que o tamanho mínimo das impressões em FDM seja composto com pelo menos 1 perímetro, mas recomenda-se 2 perímetros para evitar fragilidade. Perímetros se referem às paredes externas do modelo, que podem ser finas ou grossas, dependendo da quantidade de camadas de perímetro que forem configuradas na impressora e das dimensões do modelo (Figura 4). A espessura de cada perímetro está relacionada ao tamanho do bico da impressora, então uma impressora de bico com abertura de 0.4 mm imprime um perímetro de aproximadamente 0.4 milímetros de espessura. Assim, se o modelo tiver uma parte na qual a espessura for de 0.1mm, essa parte não será impressa adequadamente.

Figura 4 - Variação do perímetro interno.



Da esquerda para a direita: A) dois perímetros. B) três perímetros. C) cinco perímetros. D) sete perímetros.

Fonte: Autoria própria

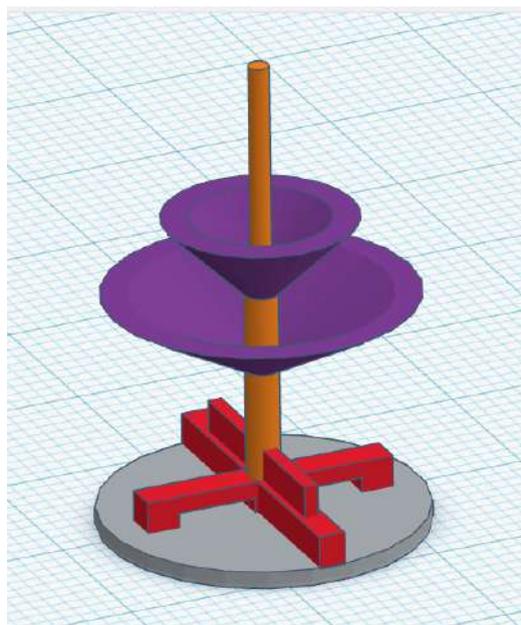
2.4. Processo de modelagem, adaptações e validador

O procedimento original de Lima e Meurer (2011) se destina a conceituação e modelagem de personagens para jogos digitais, sugerindo sua aplicação também para prototipagem rápida, e consiste em três etapas principais e algumas subdivisões: (i) Estratégia; (ii) Pré-Produção, subdividida em (ii.a) escopo e (ii.b) esqueleto; e (iii) Produção, subdividida em (iii.a) pré-estética, (iii.b) estética e (iii.c) experimento. As duas primeiras etapas lidam com a parte conceitual e criativa do processo, permanecendo praticamente inalteradas. O foco das adaptações do *framework* proposto se concentra principalmente nas etapas de (ii.b) esqueleto, (iii.a) pré-estética, (iii.b) estética e (iii.c) experimento, momentos em que propomos incorporar considerações sobre o equipamento de saída, avaliando seu alinhamento com as recomendações propostas em Livesu et. al. (2017). Esta árvore de critérios, detalhada a seguir, será chamada de Critérios de Livesu:

- *Checar e adaptar geometria para fabricação:* limitar ângulos oblíquos a 60°, preferindo de 45° ou menos para evitar *overhangs*.
- *Criar estruturas de suporte:* utilizar partes do próprio modelo ou incluir elementos de cena para apoiar partes que estariam de outra forma suspensas no ar, para evitar Ilhas.
- *Direção de impressão:* pontos com *overhang* extremo ou ilhas que não podem ser reposicionados para se enquadrar nos critérios anteriores podem ser considerados como pontos onde a peça deve ser separada em duas para reposicionamento, sendo unidas após a impressão.
- *Checagem da espessura:* evitar pontos onde a espessura ficaria menor que um perímetro de impressão, preferindo dois perímetros.
- *Adaptação para fatiador:* criar modelos com malha sem faces desconectadas, redundantes, internas ou com furos na malha, para que sejam lidos corretamente pelo programa de fatiamento.

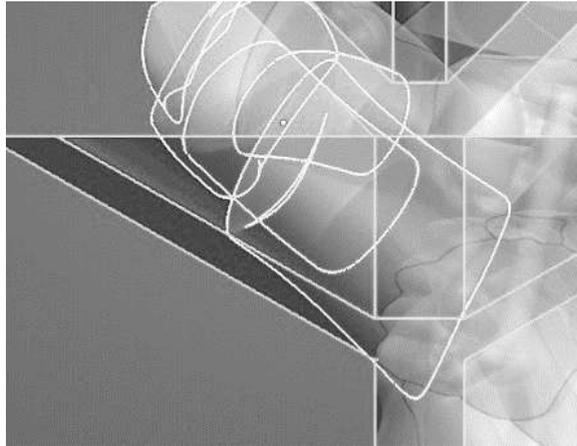
Para facilitar a verificação destes critérios diretamente no software de modelagem criamos um validador, um modelo STL que incorpora os Critérios de Livesu. Sendo um arquivo em formato .OBJ, modelado com precisão em um programa CAD, essa ferramenta pode servir de referência para comparar as medidas durante o processo de modelagem, bastando que seja importada para o arquivo do projetista. O validador conta com (i) base de 20 mm de diâmetro para identificar ilhas; (ii) medidores de bases de largura 1,6 mm e 0,8 mm para identificar paredes com menos de dois e um perímetro respectivamente; (iii) hastes cilíndricas de 1,2 mm e 2 mm de diâmetro para identificar pontos de fragilidade e hastes finas demais para impressão; (iv) altura total de 30 mm de referência para altura de miniatura; e (v) cones com ângulos de 45° e 60°, usados para verificar limites de *overhang*.

Figura 5 –Validador de dimensões



Fonte: Autoria própria

Figura 6 – Aplicação do validador de dimensões



Fonte: Autoria própria

Para utilizá-lo, o validador é importado diretamente no arquivo. O Critério de Livesu adequado é posicionado junto à área a ser avaliada do objeto. Por exemplo, se o objetivo é conferir o ângulo de *overhang*, um dos cones é posicionado onde inicia o ângulo da peça. Se não passar da parede externa do cone, o ângulo está dentro dos parâmetros recomendados.

3. METODOLOGIA

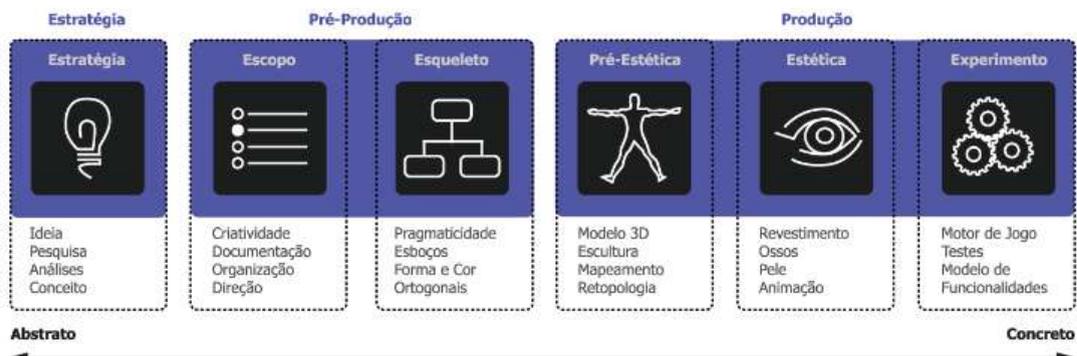
3.1. Modelagem, Projeto e Metaprojeto

Um método de modelagem pode ser adequado à proposta considerando a capacidade de impressão do modelo projetado durante as etapas de modelagem, avaliando se estão de acordo com o procedimento proposto em Livesu et. al. (2017), criando um fluxo de trabalho adaptável a modelagem para FDM que pode ser usado para modelar miniaturas.

O processo construído tem como base o procedimento de Lima e Meurer (2011), que apresenta uma sequência para a modelagem para jogos digitais, e adapta suas etapas para permitir incorporar os pontos de avaliação para a fabricação por manufatura aditiva em FDM ao longo de sua produção.

O procedimento original de Lima e Meurer (2011) se destina a conceituação e modelagem de personagens para jogos digitais, sugerindo sua aplicação também para prototipagem rápida e consiste em três etapas principais: *Estratégia*, *Pré-Produção* e *Produção* (Figura 9). As duas últimas são divididas em cinco etapas menores: *Escopo* e *Esqueleto* (da Pré-Produção) e *Pré-Estética*, *Estética* e *Experimento* (da Produção). As duas primeiras etapas lidam com a parte conceitual e criativa do processo, sendo pouco alteradas. Com isso o foco das adaptações se concentra principalmente nas etapas de *Esqueleto*, *Pré-Estética*, *Estética* e *Experimento*.

Figura 7 - Método de Lima e Meurer



Fonte: Lima e Meurer, 2011

Destaca-se que este método e suas subdivisões, enquanto abordagem estruturada de um problema, podem ser lidos enquanto determinações metaprojetuais, definida por Caio Vassão como iniciativas “que possam operar a transposição de princípios do projeto de contexto a outro, e que possam superar as diferenças entre casos específicos em função de uma operação genérica” (VASSÃO, 2010) e que sua adaptação para o contexto específico desta pesquisa pode cumprir uma função importante de orientação.

3.2. *Framework* de criação

O *framework* a seguir permite incorporar pontos de avaliação, buscando garantir uma impressão em FDM que atenda às boas práticas do campo (Figura 8). Para permitir melhor compreensão do processo, detalhamos as etapas de produção:

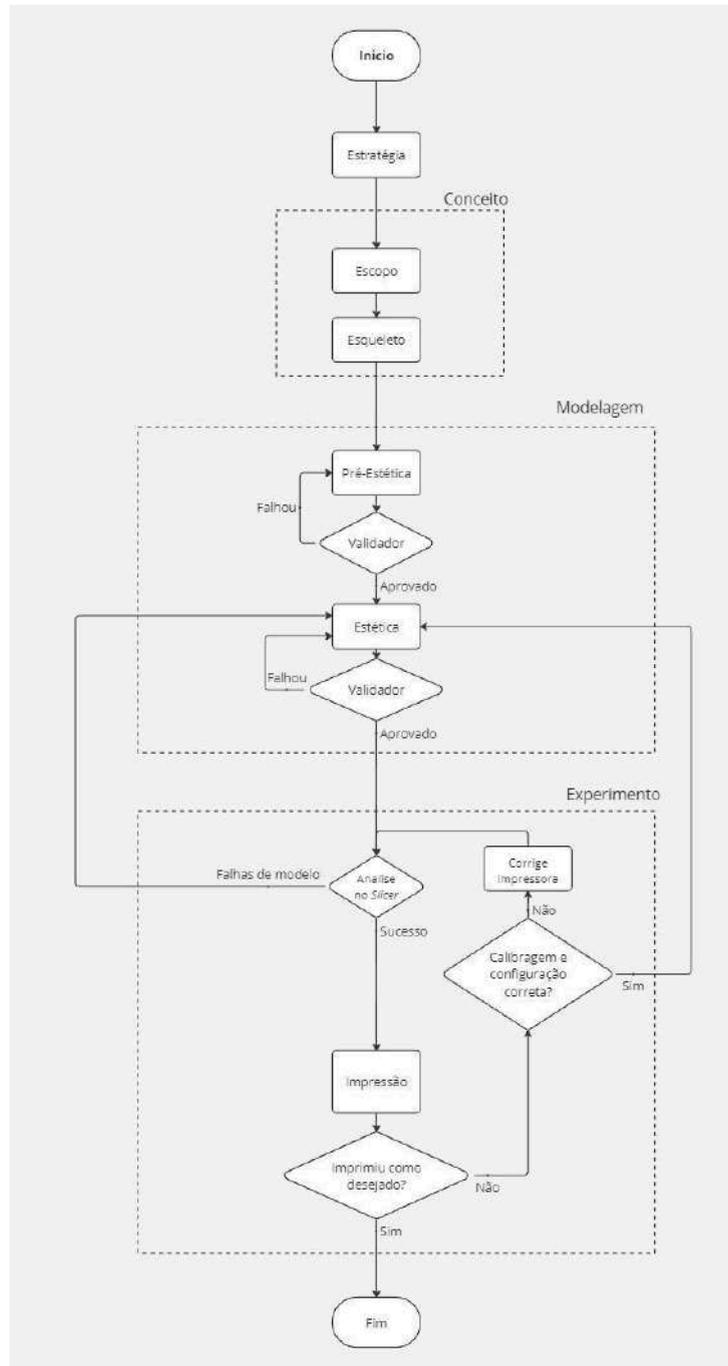
Estratégia: trata do planejamento geral e lida com as características gerais do projeto. Contempla a ideação inicial do objeto a ser modelado, seu contexto e referências iniciais (Lima e Meurer, 2011). Neste tipo de aplicação para impressão 3D, deve-se considerar que o produto final seja uma peça física representativa do modelo a ser projetado ao invés de um personagem digital, como no processo original. Desde esta etapa, a árvore de Critérios de Livesu deve ser considerada.

Escopo: inicia a parte conceitual para o planejamento e forma do modelo. Contempla a organização de referências visuais mais diretas, relacionadas ao objeto, visando auxiliar as etapas seguintes, garantindo sua coesão e orientando a criação do modelo (Lima e Meurer, 2011). A etapa abriga referências, alternativas visuais, esboços e material para guiar a construção da aparência final.

Esqueleto: desenvolve os esboços e conclui na criação da referência para ser modelada. Concentra-se na criação do modelo proposto na arte conceitual (Lima e Meurer 2011). Por se tratar de um projeto em que a forma modelada se tornará a forma impressa, constituindo um modelo estático, esta etapa deve incluir também considerações de silhueta, poses, expressões e cenários, organizados para fortalecer as respostas estéticas. Assim, o objetivo desta etapa, além de finalizar o conceito do modelo, é buscar por silhuetas distintas dos modelos, adotar formas e poses que minimizem a possibilidade de erros de impressão e identificar

previamente onde serão possíveis pontos de separação, caso não seja possível imprimir toda a miniatura numa única peça.

Figura 8 – *Framework* de produção



Fonte: Autoria própria

Pré-estética: envolve o primeiro esforço de modelagem tridimensional em baixa fidelidade (low-poly) usando softwares como Blender ou Zbrush. Na estrutura de Lima e Meurer (2011), esta etapa inclui mapeamento – definição de superfícies com diferentes texturas – e retopologia – construção de modelos de baixa contagem poligonal para recuperar detalhes do modelo esculpido. O objetivo é construir as formas iniciais do modelo, validando parâmetros e contemplando a estrutura planejada em baixa-fidelidade. As dimensões finais do modelo são definidas para estimar os tamanhos da impressão final e identificar volumes pequenos demais para impressão FDM. Com o validador, analisar ângulos, espessuras e dimensões da peça, ajustando problemas potenciais antes de avançar para a próxima etapa.

Estética: refina e detalha o modelo anterior para maior fidelidade. Em Lima e Meurer (2011), essa fase inclui revestimento, ossos, pele e animação, usando ferramentas do software para aplicar efeitos de profundidade sem distorcer a malha. Nesta pesquisa, estes critérios são substituídos pelo detalhamento e acabamento das formas primárias, modeladas anteriormente. Ao contrário da modelagem digital, todos os detalhes necessários devem ser modelados na malha do objeto. Detalhes secundários, como rostos, mãos, painéis de relevo, dentes e garras grandes devem ser inseridos, enquanto detalhes menores, como poros de pele ou pêlos são retirados. Detalhes como costuras de roupa ou texturas são exagerados para permitir sua impressão. Partes identificadas para impressão separada são conferidas uma a uma, garantindo que as malhas estejam limpas e vedadas (watertight). Com o validador, verificar se as estruturas estão de acordo com as indicações de impressão FDM, adaptando-as se necessário.

Experimento: utiliza o modelo exportado da fase anterior em formato .STL ou .OBJ para inseri-lo em um programa de fatiamento, testando a impressão FDM. Em Lima e Meurer (2011), testes do modelo são realizados no motor de jogo. Aqui, o modelo é avaliado para impressão, verificando erros de malha e se a geometria é completamente imprimível. O arquivo em formato GCODE é testado em uma impressora FDM, observando problemas como descolamento da mesa, impressões no ar, quebra da peça ou impressão incompleta. Se houver falhas devido a calibração ou configuração do fatiador, o teste é repetido com novas configurações. Problemas no modelo, como partes finas demais, devolvem o projeto à fase estética para ajustes. A última verificação avalia o acabamento da superfície impressa, observando irregularidades causadas por angulação, largura ou temperatura.

4. IMPLEMENTAÇÃO

A aplicação do *framework* foi documentada, buscando permitir a reprodutibilidade do experimento e a verificação de sua efetividade. De antemão, recomenda-se a calibragem e o ajuste das configurações do equipamento destinado à impressão destes ou de outros modelos criados com esta finalidade.

4.1 Personagem humano

Para o teste, foi escolhido Adalbert Steiner (Figura 8), do jogo eletrônico de RPG Final Fantasy IX desenvolvido e publicado pela SquareSoft, um personagem de forma humana. Sendo uma propriedade intelectual já existente, foi selecionado para evitar temas relativos aos métodos de criação de personagens, discussão alheia ao escopo deste trabalho. Foi selecionado para demonstrar a modelagem da forma humana, incluindo considerações sobre roupas e poses que caracterizariam o personagem.

Figura 9 - Capitão Adalbert Steiner - personagem de Final Fantasy IX



Fonte: SquareSoft, 2000

4.1.1 Estratégia

Foi definida a escala 1:56 (também conhecida como 28mm), estabelecendo que a altura dos olhos de um humano de 1,70 metros equivale a altura aproximada de 28mm na miniatura. Esta escala é comumente usada em miniaturas para jogos de RPG como Dungeons & Dragons e jogos de tabuleiro como Warhammer 40k, e o tamanho final permite analisar o nível de reprodução do modelo e o detalhamento que a impressão em FDM é capaz de entregar.

Dentre essas considerações, será utilizado as seguintes configurações iniciais para a impressão em uma impressora Ender-3 de bico de tamanho 0.4, para conseguir o máximo de detalhes permitido:

- Layer height (Altura de camada): 0.12mm
- Line width (Largura de camada): 0.4mm
- Wall lines (Linhas de parede): 4
- Infill density (Densidade de preenchimento): 15%
- Infill pattern (Padrão de preenchimento): ZigZag
- Printing temp (Temperatura de impressão): 190°C
- Build plate temp (Temperatura da base de impressão): 60°C
- Print Speed (Velocidade de Impressão): 30mm/s
- Travel speed (Velocidade de deslocamento): 250mm/s
- Build plate adhesion (Adesão a base de impressão): Brim

Ainda sim, ao longo da etapa de experimento, os parâmetros serão avaliados e possivelmente ajustados de acordo com os resultados obtidos.

4.1.2 Escopo

Nesta etapa, referências relacionadas à aparência física do personagem foram recolhidas em um quadro para guiar a construção da pose, identificar os elementos principais da aparência do personagem e como caracterizá-lo na modelagem 3D (Figura 10).

Figura 10 - Referências visuais do personagem



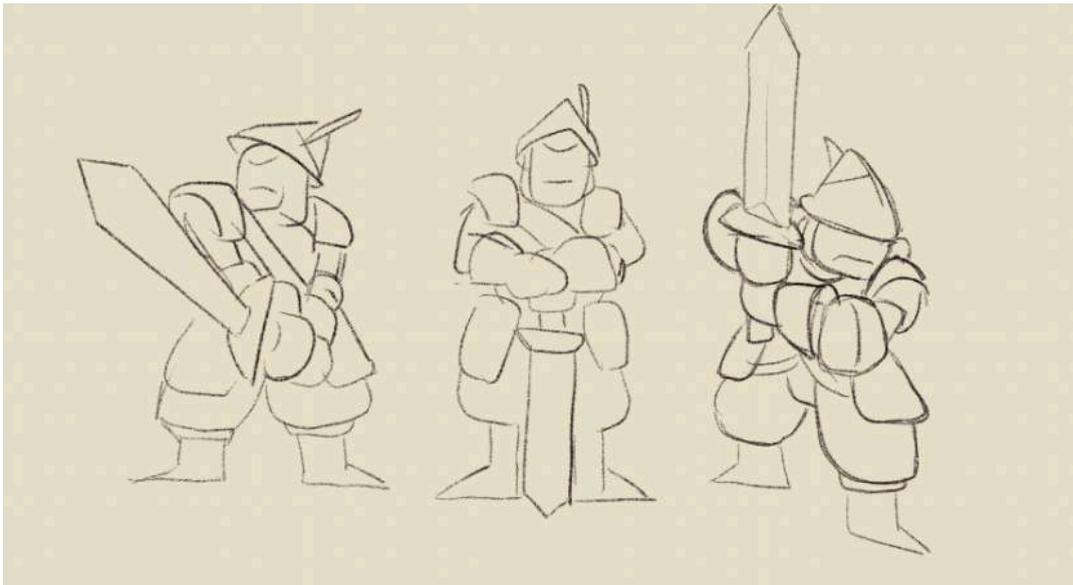
Fonte: Compilação do autor.

4.1.3 Esqueleto

Como a Arte Conceitual do personagem já existe, nesta etapa consideramos diferentes poses que possam não só passar características de personalidade, mas que também facilitem a impressão em FDM.

Assim, foram feitos três esboços de poses diferentes, tendo em mente os Critérios de Livesu (Figura 11). Optamos pela terceira pose, inspirada na animação de ataque do personagem dentro do jogo, por ser dinâmica e manter a angulação do braço e da espada próximas aos limites, assim como pela posição das pernas, que criam uma base estável para impressão.

Figura 11 - Desenhos de poses para a modelagem

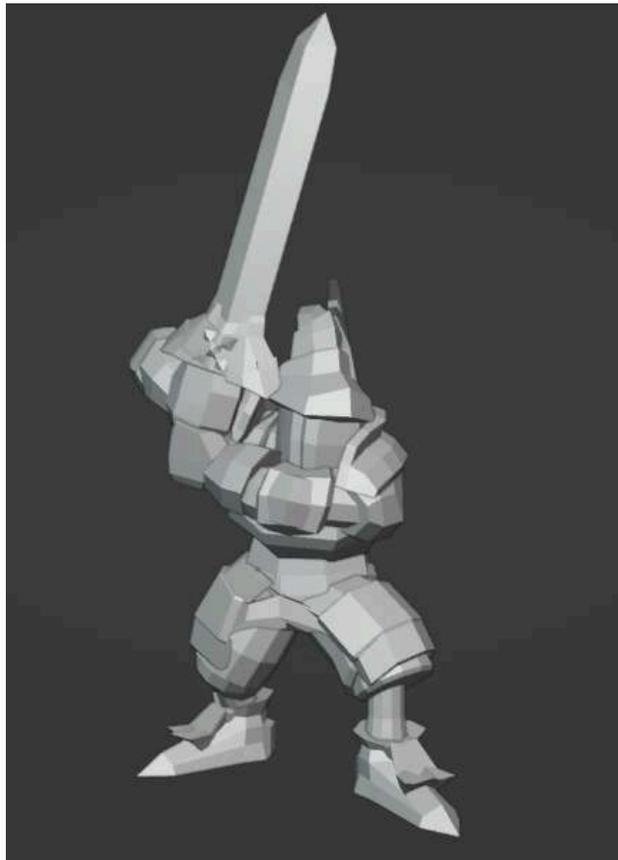


Fonte: autoria própria

4.1.4 Pré-Estética

Com a parte conceitual finalizada, o processo avança para a modelagem no software Blender. Esta etapa, parte do processo de modelagem, foca em construir as formas principais do modelo e da pose do personagem, inicialmente seguindo as referências da arte conceitual para definir proporção e dimensões dos membros do corpo e da espada e depois posicionando-os para a pose desenhada na etapa anterior (Figura 12).

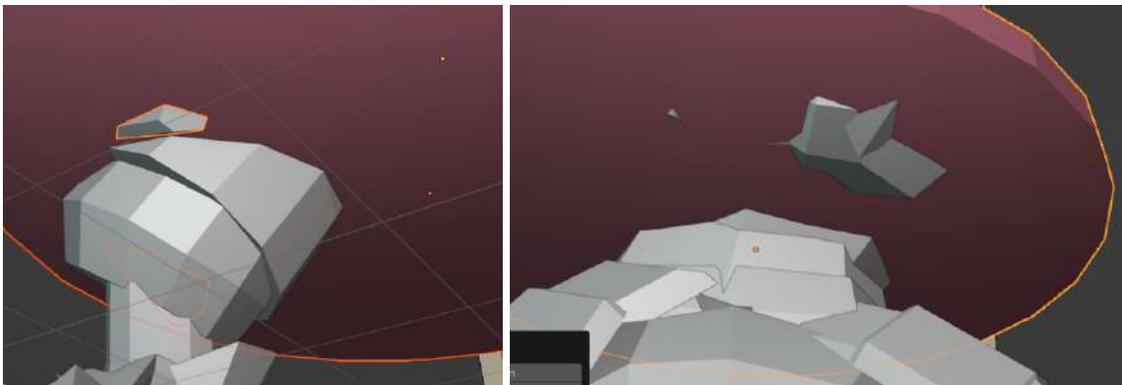
Figura 12 - Modelagem em baixa definição (Low poly) do personagem

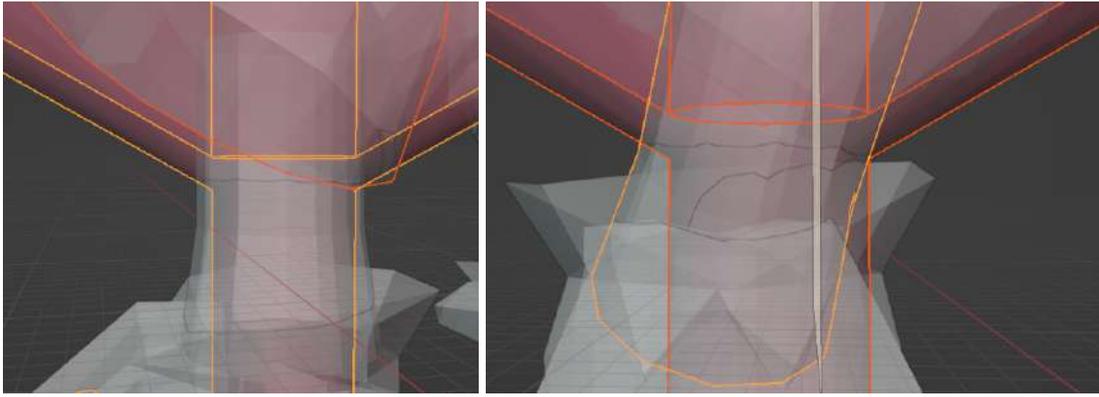


Fonte: autoria própria

Após a modelagem, o validador foi aplicado em áreas que poderiam apresentar problemas de impressão, considerando as recomendações da seção 3.4, tais como ilhas de impressão, espessura e angulação das pernas e calças (Figura 13).

Figura 13 - Identificação de ilhas de impressão usando o validador





Da esquerda para a direita, de cima para baixo:

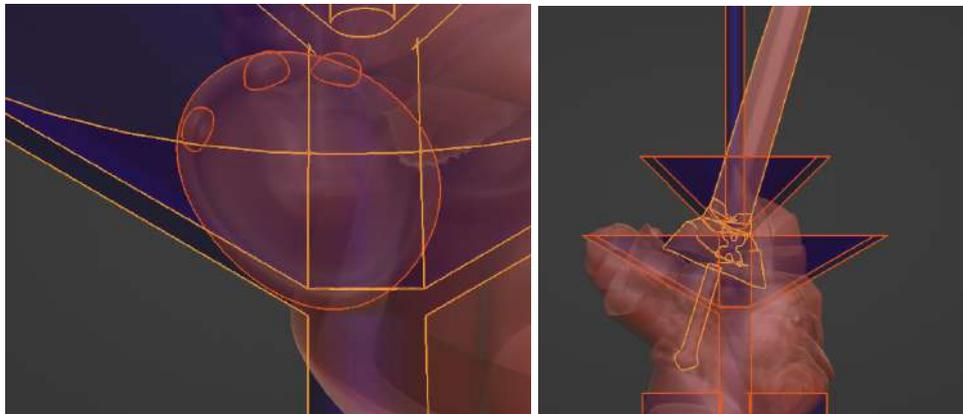
- A) Identificação de ilha no braço. B) Identificação de ilha nas pernas.
- C) verificação da espessura do calcanhar adequada. D) angulação do calcanhar adequada.

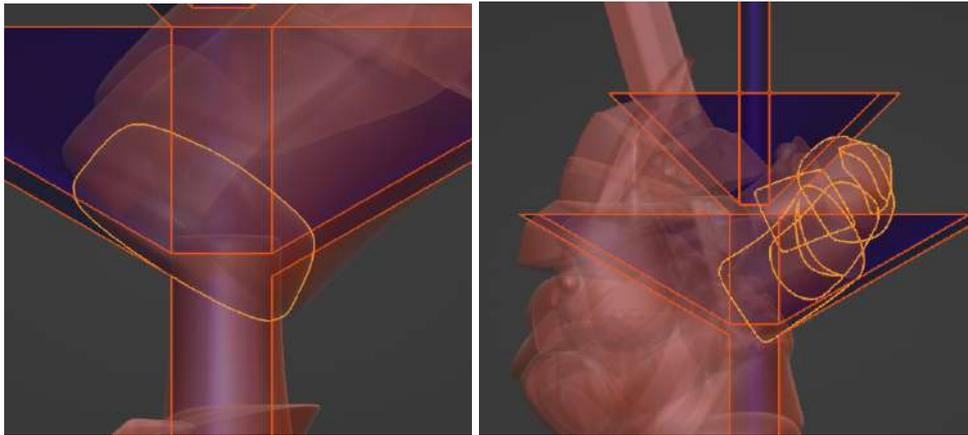
Fonte: autoria própria

4.1.5 Estética

Nesta etapa, as superfícies foram suavizadas e detalhes da armadura, mãos, rosto e espada foram acrescentados. A validação foi refeita, demandando ajustes nos braços e cotovelo para ficarem dentro do ângulo máximo (Figura 14), resultando no modelo da Figura 15.

Figura 14 - Avaliação de ângulos através do validador.





Da esquerda para a direita, de cima para baixo:

- A) Verificação do ângulo do braço anterior.
- B) Verificação do ângulo da espada.
- C) Verificação do ângulo da perna.
- D) Verificação do ângulo do braço posterior.

Fonte: autoria própria

Depois de verificado, o modelo foi combinado e sua malha foi reestruturada para remover faces internas e deixá-la sem furos (*watertight*) para exportá-la em formato .STL para o fatiador *Cura*, na etapa seguinte.

Figura 15 - Resultado da etapa de estética

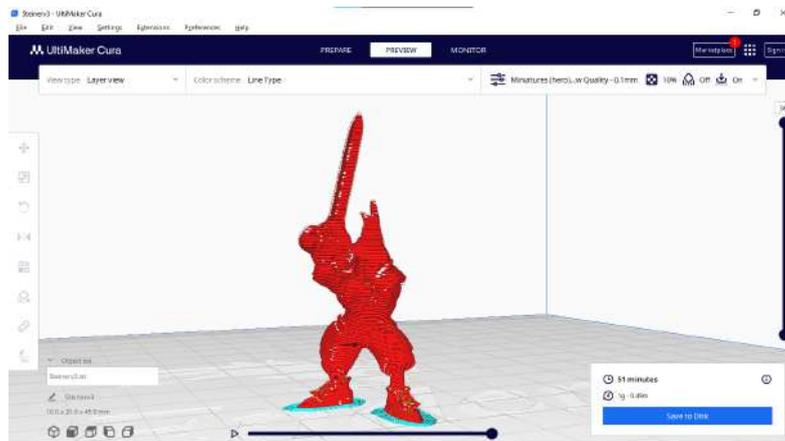


Fonte: autoria própria

4.1.6 Experimento

Em seguida, o modelo foi importado no software *Ultimaker Cura* (versão 5.4.0) para realizar o processo de fatiamento e converter o arquivo em formato STL em GCode (Figura 16).

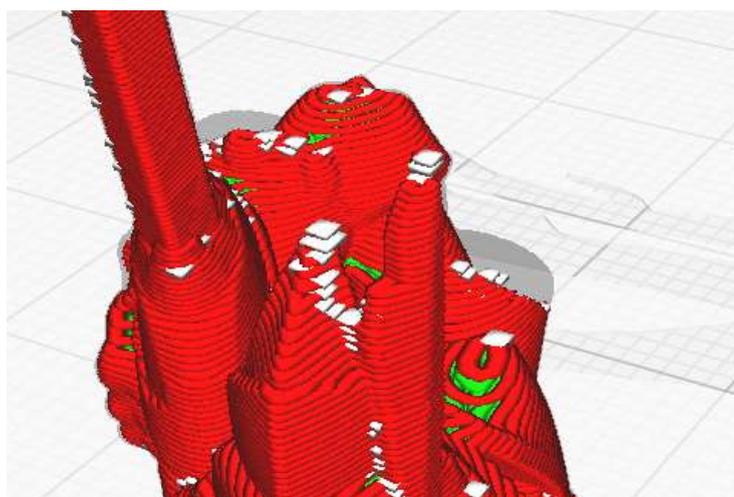
Figura 16 - Análise do modelo no fatiador Cura



Fonte: autoria própria

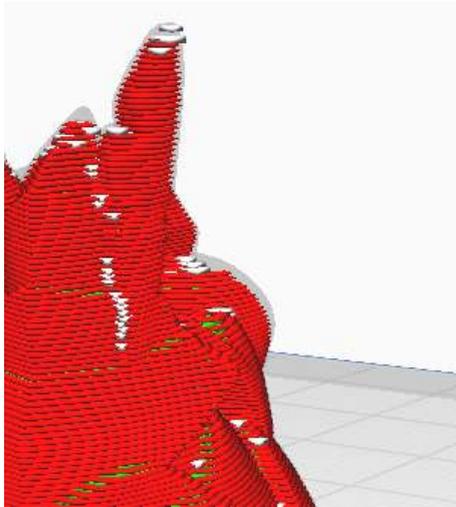
No software foram identificadas partes do modelo, como a manga da camisa, que não seriam completamente impressas por causa da espessura (Figura 16), demandando correção no Blender e nova avaliação no Cura antes da impressão (Figura 17).

Figura 16 - Partes incompletas do modelo e correção



Fonte: autoria própria

Figura 17 - Partes do modelo após correção



Fonte: autoria própria

As impressoras utilizadas para os testes deste modelo foram uma Prusa MK3S com bico de tamanho 0.4mm e uma Creality Ender-3 também com bico 0.4mm. Essa escolha foi feita para avaliarmos eventuais diferenças que ocorreriam por características da máquina, da configuração do fatiador ou por causa do próprio modelo. Ambas impressoras receberam manutenção e testes de calibragem antes do início da impressão.

As configurações do perfil de fatiamento aplicadas no Cura no início do teste foram as seguintes:

- Layer height (Altura de camada): 0.12mm
- Line width (Largura de camada): 0.4mm
- Wall lines (Linhas de parede): 4
- Infill density (Densidade de preenchimento): 15%
- Infill pattern (Padrão de preenchimento): ZigZag
- Printing temp (Temperatura de impressão): 190°C
- Build plate temp (Temperatura da base de impressão): 60°C
- Print Speed (Velocidade de Impressão): 30mm/s
- Travel speed (Velocidade de deslocamento): 250mm/s
- Build plate adhesion (Adesão a base de impressão): Brim

A altura de camada reduzida permite que mais detalhes sejam aparentes e que a superfície tenha menos linhas de impressão visíveis, a parede externa mais espessa e o preenchimento dão mais resistência ao modelo impresso. O padrão de

preenchimento em ZigZag confere mais uma parede interna conectada ao perímetro do preenchimento onde ela couber. A temperatura de impressão de 190°C está dentro da faixa recomendada para impressão em PLA pelo fabricante. A velocidade de impressão foi reduzida para 30 mm/s, dando mais tempo para as camadas resfriarem e aderirem melhor às anteriores, evitando deformação. A de velocidade de *travel* foi aumentada para diminuir a quantidade de filamento que vaza quando o bico precisa mover fora da peça para chegar em outro ponto. Por fim, a adesão à mesa de impressão foi configurada para Brim, reduzindo as chances de deslocamento da peça durante a impressão, já que a área de contato seria pequena.

Os testes foram realizados com um filamento novo PLA Branco da Cliever, que estava lacrado até o teste para eliminar a variação das condições de umidade e fragilidade do filamento antigo. Também foi realizado um teste na Ender-3 para identificar variações causadas pelo modelo da impressora (Figura 18).

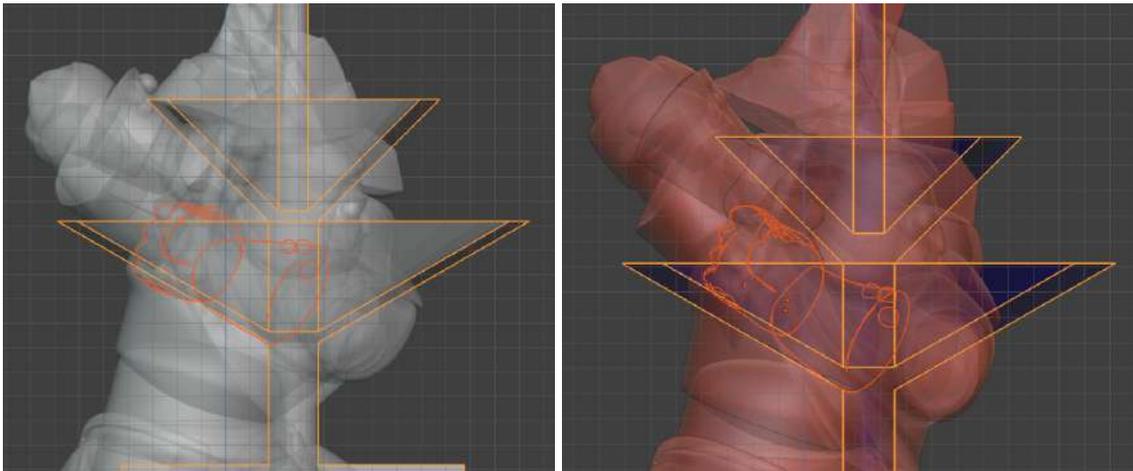
Figura 18 - Resultados da Prusa MK3S de bico 0.4 (esquerda) e Ender 3 de Bico 0.4 (direita)



Fonte: autoria própria

Pelos detalhes do cinto e do braço ficarem mais deformados do que o esperado e a espada ter ficado menor do que o desejado, o modelo foi novamente editado no Blender, e ao conferir no validador, percebeu-se que certos pontos do braço passavam do ângulo de 60, contribuindo para a deformação. Foi então alterada levemente a posição dos braços, deixando os cotovelos mais altos e dando mais detalhamento ao cinto (Figura 19) e o teste foi repetido (Figura 20).

Figura 19 - Correção do modelo após experimento



Fonte: autoria própria

Figura 20 - Resultados do modelo 2 na Ender 3 de Bico 0.4



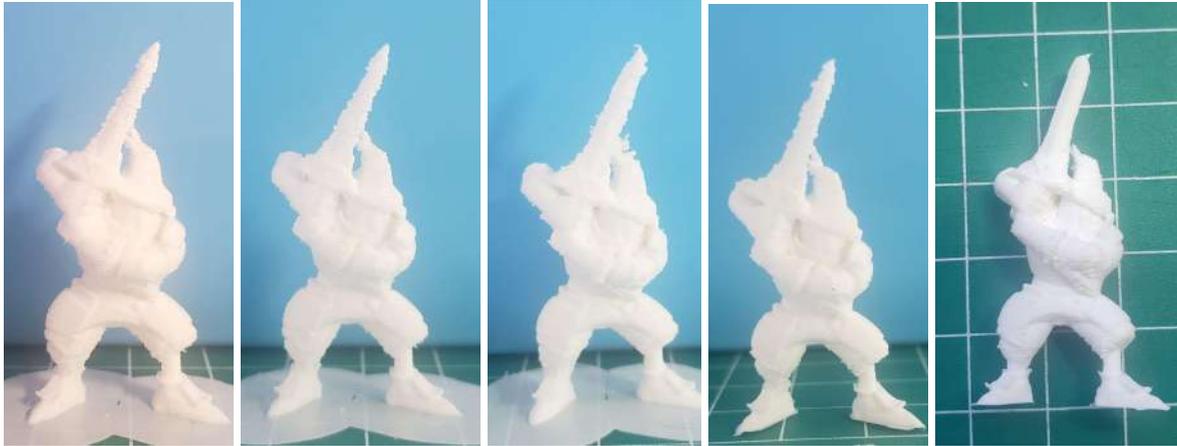
Fonte: autoria própria

Os testes seguintes foram realizados com configurações diferentes para diminuir a deformação causada na espada e melhorar o acabamento do *overhang* dos braços e da calça. Essas alterações foram referentes a:

- Posicionamento da peça para direcionar o ar da ventoinha. (Figura 21-A);
- Z-hop (levantar do bico da camada) quando retraindo o filamento (Figura 21-B);
- Tempo mínimo de camada para 7 segundos (Figura 21-C);
- Diminuir ainda mais a velocidade de impressão para 20 mm/s (Figura 21-D);

- Configurar Z-seam (Linha de junção Z) para shortest (mais curto) (Figura 21-E);

Figura 21 - Testes de impressão.



Da esquerda para a direita: A) Impressão com posicionamento corrigido. B) Impressão com o Z-hop habilitado. C) Impressão com tempo mínimo de camada reduzido para 7 segundos. D) Impressão com velocidade de impressão reduzida para 20mm/s. E) Impressão com Z-seam configurada para shortest.

Fonte: autoria própria

O teste da figura 21-E foi considerado como um nível aceitável de superfície, sem grandes deformações nos *overhangs*, *stringing* ou fragilidade. Com isso, os experimentos e o processo de modelagem da figura humana foram finalizados conforme mostrado na figura 22.

Figura 22 - Resultado da Impressão com escalímetro e moeda para escala



Fonte: autoria própria

A Configuração final do perfil do Cura para o teste ficou:

- Layer Height (Altura de camada): 0.12mm
- Initial Layer Height (Altura de camada Inicial): 0.1mm
- Wall Line Count (Quantidade de linhas de parede): 2
- ZSeam Alignment (Alinhamento da linha de junção Z): Shortest
- Seam Corner preference (Preferência de cantos da linha de junção):
Hide/Expose seam (Esconder/Expor linha de junção)
- Infill density (Densidade de preenchimento): 15%
- Infill Pattern (Padrão de preenchimento): Zig Zag
- Infill Before Walls (Preenchimento antes das paredes): On
- Printing Temperature (Temperatura de impressão): 190C
- Build Plate Temperature (Temperatura da base de impressão): 50C
- Flow (Fluxo): 83% (O valor depende da impressora)
- Print Speed (Velocidade de impressão): 20mm/s
- Travel Speed (Velocidade de deslocamento): 250mm/s
- Retract At Layer Change (Retrair ao mudar de camada): On
- Zhop When Retracted (Salto Z quando retraído): On
- Minimum Layer Time (Tempo mínimo de camada): 7s
- Build plate adhesion (Adesão a base de impressão): Brim

4.2 Veículo de ficção-científica

Para o veículo, foi escolhido a nave Vudu (Banshee, na versão em inglês) do jogo de computador StarCraft 2: Wings of Liberty, desenvolvido pela Blizzard Entertainment (Figura 23). Suas estruturas suspensas e formas angulares servem para demonstrar como aplicar o processo na modelagem de superfícies duras, exigindo mais atenção nos pontos de corte e angulação das paredes, já que possuem menos espaço para deformação do que formas orgânicas.

Figura 23 - Nave Vudu, do jogo Starcraft 2



Fonte: Blizzard Entertainment, 2010

4.2.1 Estratégia

Para as dimensões, foi escolhido um tamanho de 30mm em escala absoluta, ou seja, o comprimento da ponta da cabine a ponta do cauda na miniatura terá comprimento de 30mm. Foi escolhida a escala absoluta por ser incerto o tamanho total do veículo original para poder fazer uma escala.

Dentre essas considerações, será utilizado as seguintes configurações iniciais para a impressão em uma impressora Ender-3 de bico de tamanho 0.4, seguindo as definições que obtiveram sucesso na miniatura anterior:

- Layer Height (Altura de camada): 0.12mm
- Initial Layer Height (Altura de camada Inicial): 0.1mm
- Wall Line Count (Quantidade de linhas de parede): 2
- ZSeam Alignment (Alinhamento da linha de junção Z): Shortest
- Seam Corner preference (Preferência de cantos da linha de junção): Hide/Expose seam (Esconder/Expor linha de junção)
- Infill density (Densidade de preenchimento): 15%
- Infill Pattern (Padrão de preenchimento): Zig Zag
- Infill Before Walls (Preenchimento antes das paredes): On
- Printing Temperature (Temperatura de impressão): 190C
- Build Plate Temperature (Temperatura da base de impressão): 50C
- Flow (Fluxo): 83% (O valor depende da impressora)
- Print Speed (Velocidade de impressão): 20mm/s
- Travel Speed (Velocidade de deslocamento): 250mm/s
- Retract At Layer Change (Retrair ao mudar de camada): On

- Zhop When Retracted (Salto Z quando retraído): On
- Minimum Layer Time (Tempo mínimo de camada): 7s
- Build plate adhesion (Adesão a base de impressão): Brim

4.2.2 Escopo

Nesta etapa, assim como no modelo do Steiner, foram coletadas imagens de referência para ajudar na modelagem (Figura 24). Porém, por se tratar de um veículo, ele não possui tanta liberdade de movimento quanto um personagem humano, resultando em menos referências de poses ou expressões. Para complementar as referências, foram adicionados outros veículos do mundo real para conectar o veículo do cenário da ficção com seus análogos.

Figura 24 - Referências visuais da nave



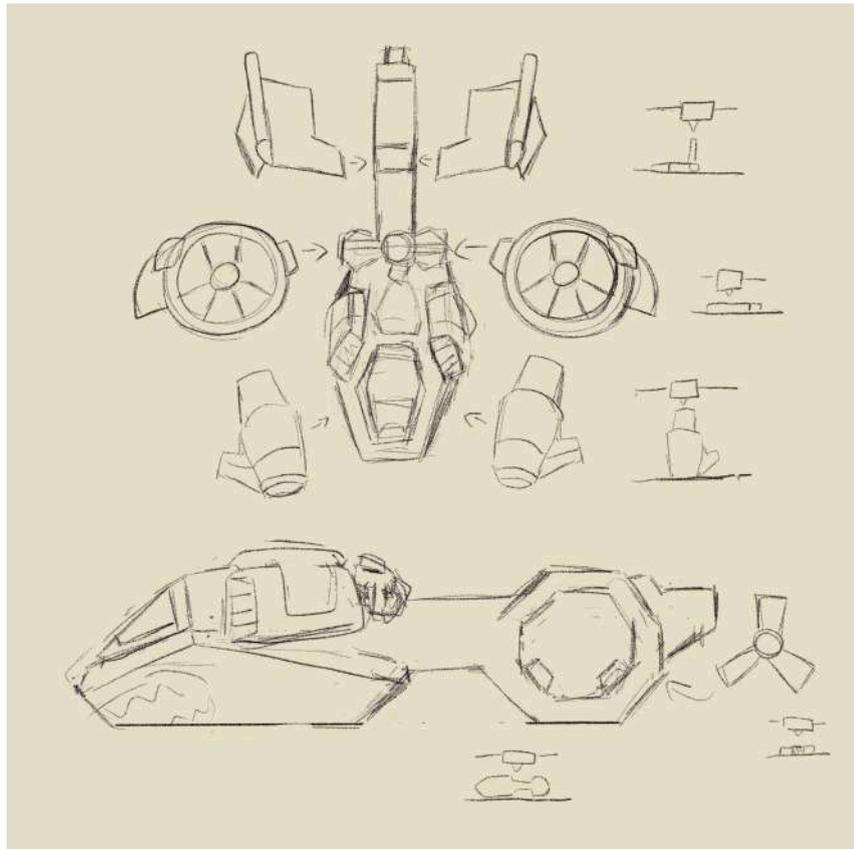
Fonte: Compilação do autor.

4.2.3 Esqueleto

Por ser composto de estruturas fixas, com considerável limitação de movimento quando comparado a um personagem humano ou criatura fantástica, para o esqueleto foi considerado focar na separação das peças e em como seriam conectadas após a impressão para compor o modelo final (Figura 25). Aqui, experiências prévias com modelismo e miniaturas tiveram contribuição.

Levou-se em consideração sua orientação em relação à base da impressora para facilitar a impressão sem perder qualidade ou dificultar a etapa de montagem. Por ser um modelo de 30mm de comprimento, encaixes seriam complicados de imprimir, devido ao pouco espaço para tolerância. Assim, decidimos que a montagem seria feita posteriormente, usando adesivo instantâneo.

Figura 25 - Desenhos para a modelagem

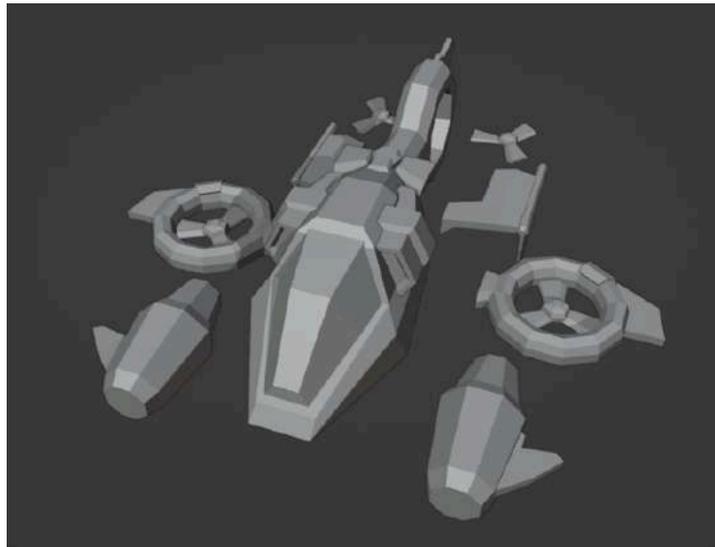


Fonte: autoria própria

4.2.4 Pré-Estética

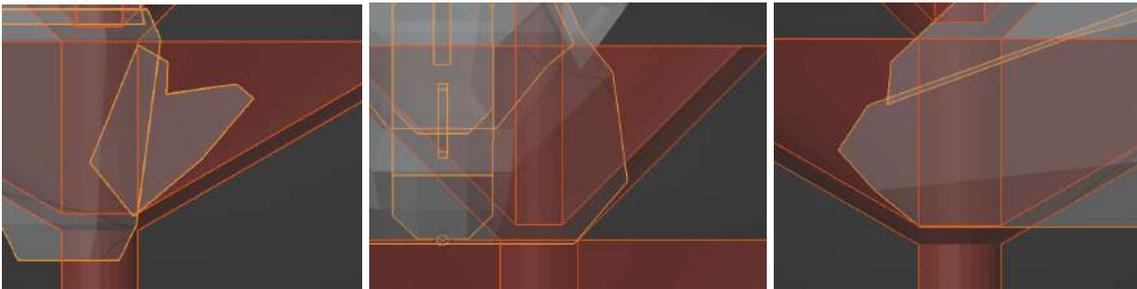
Procedemos com a modelagem individual de cada parte definida na etapa de Esqueleto, começando pelas formas básicas principais (Figura 26) e imediatamente estabelecendo os ângulos e distâncias recomendados para impressão (Figura 27), conferindo-os através do validador. Preferimos conferir antes de seguir para a próxima etapa e realizar a suavização e detalhamento da superfície.

Figura 26 - Modelagem low poly da nave



Fonte: autoria própria

Figura 27 - Conferência de ângulos com validador.



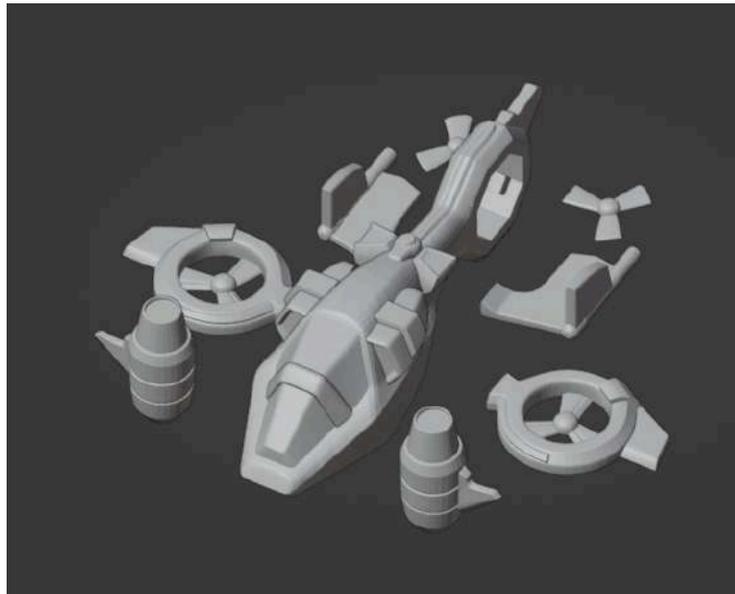
Da esquerda para a direita: A) Ângulo das turbinas. B) Ângulo da base. C) Ângulo da cabine.

Fonte: autoria própria

4.2.5 Estética

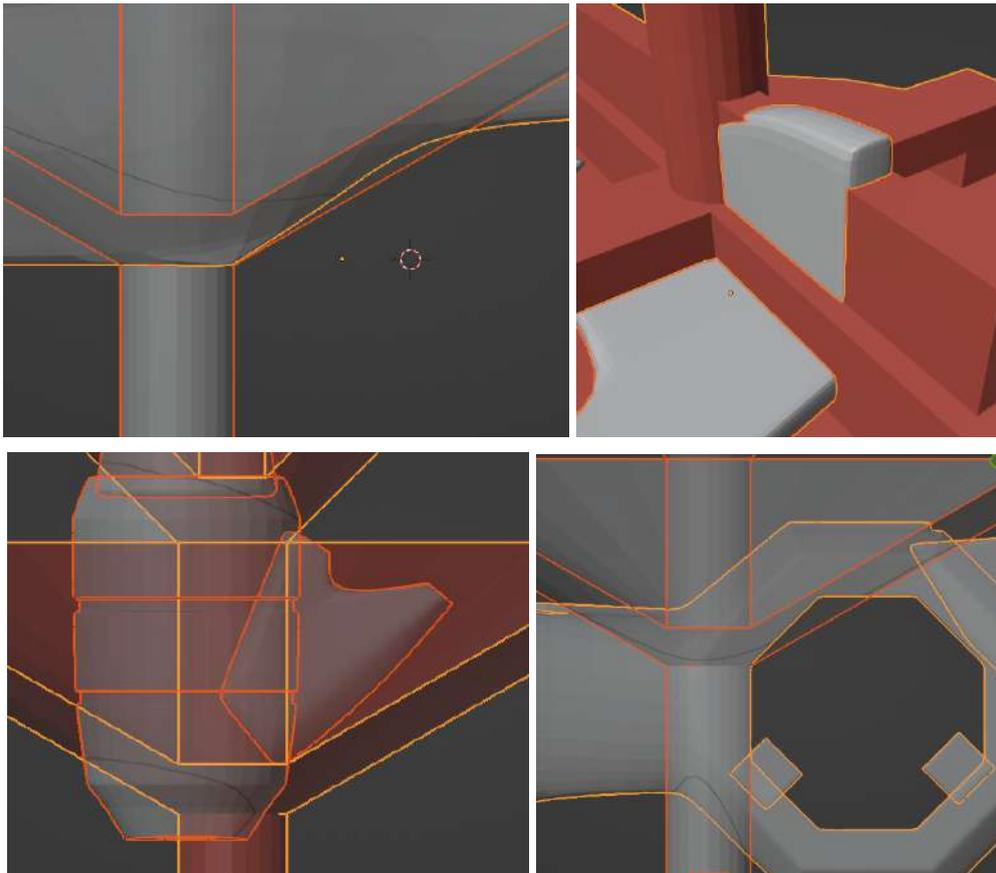
Esta etapa contemplou a suavização das superfícies e maior detalhamento das asas, cauda, turbinas e cabine (Figura 28). Também foram orientadas as peças para a posição em que estarão durante a impressão, de modo a melhor aplicar o validador nas espessuras e detectar ilhas (Figura 29).

Figura 28 - Resultado da etapa de estética



Fonte: autoria própria

Figura 29 - Avaliação da etapa com o validador.



Da esquerda para a direita, de cima para baixo:

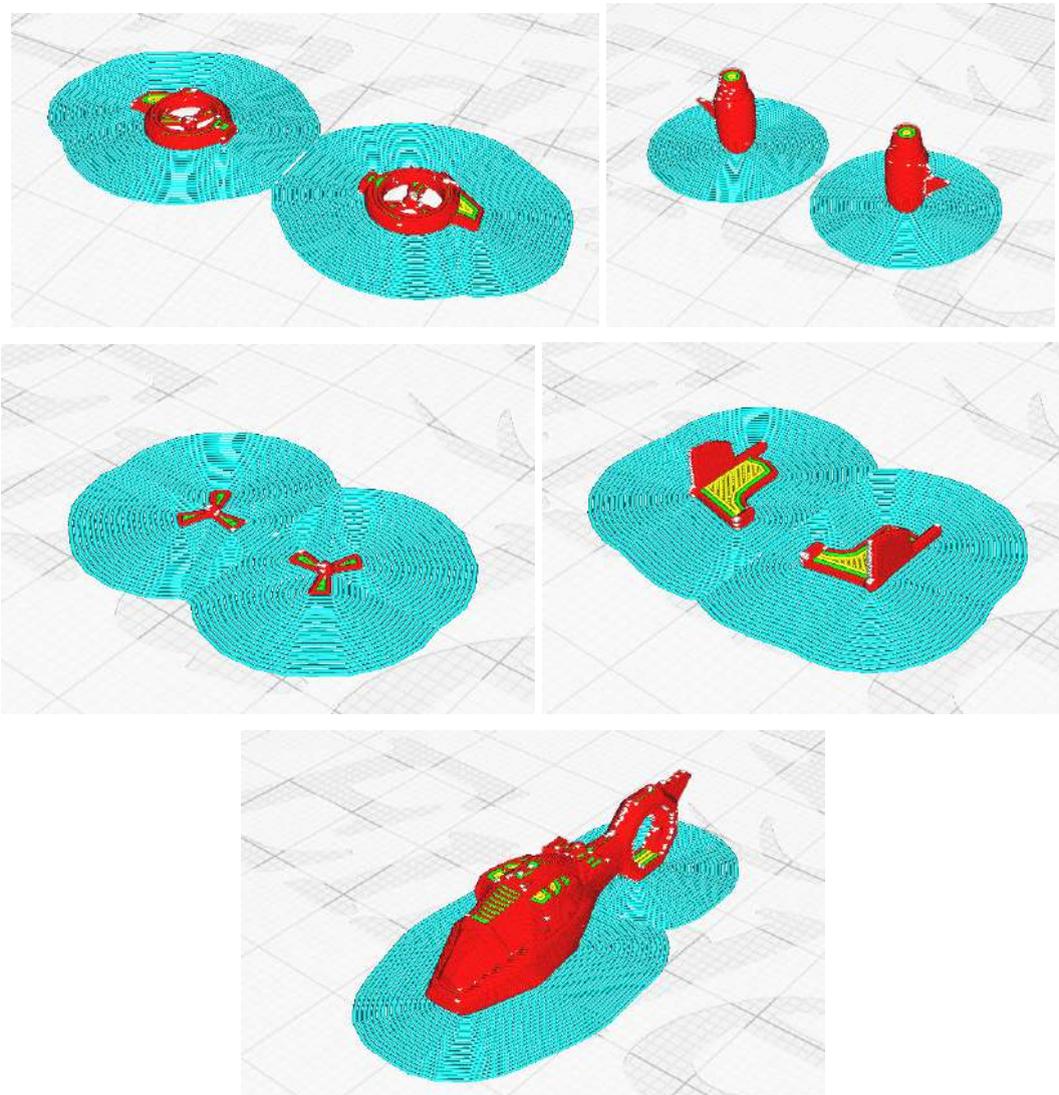
- A) Verificação do ângulo da conexão da base à cauda.
- B) Verificação da espessura das asas traseiras.
- C) Verificação do ângulo da turbina.
- D) Verificação do ângulo da abertura para hélice na cauda.

Fonte: autoria própria

4.2.6 Experimento

Para a etapa de experimento, foi decidido que cada parte e seus respectivos pares, como as asas, turbinas e hélice traseira, seriam impressos separadamente para poder controlar melhor o processo de impressão e avaliação dos resultados (Figura 30), podendo cancelar a impressão durante uma falha técnica sem afetar o teste da outra parte. As configurações usadas no Cura foram as mesmas utilizadas no último teste de impressão do modelo do personagem anterior.

Figura 30 - Fatiamento de cada parte separada para impressão.



Da esquerda para a direita, de cima para baixo:

- A) Fatiamento das hélices maiores
- B) Fatiamento das turbinas.
- C) Fatiamento das hélices traseiras.
- D) Fatiamento das asas traseiras.
- E) Fatiamento do corpo da nave.

Fonte: autoria própria

Na impressão das turbinas, percebeu-se que as abas laterais, apesar de terem sido completamente impressas, apresentaram uma certa deformação por conta da sua espessura, que possuía um único perímetro (Figura 31).

Figura 31 - Resultado da impressão das turbinas vista frontal e lateral



Da esquerda para a direita: A) Vista frontal da impressão. B) Vista lateral da impressão.
Fonte: autoria própria

Também foi percebido que as hélices traseiras ficaram muito finas na impressão, quase com a mesma espessura da aba ao redor, as deixando frágeis e maleáveis demais (Figura 32).

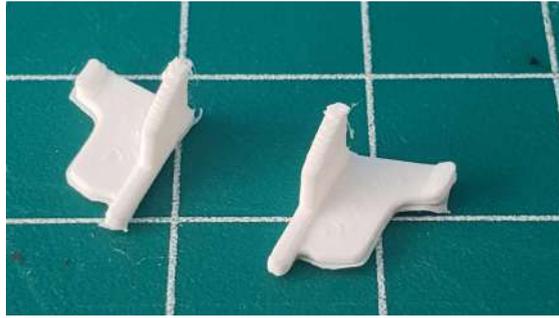
Figura 32 - Resultado da impressão das hélices traseiras



Fonte: autoria própria

Os modelos da cauda e das asas foram impressos completamente e sem deformações significativas (Figura 33 e 34), não precisando retornar ao fatiador ou programa de modelagem para correções. O corpo da nave não foi impresso neste momento, reservando a possibilidade de aumentar a espessura da hélice traseira e de imprimi-la diretamente no corpo, com a angulação e espessura adequadas (Figura 35).

Figura 33 - Resultado da impressão das asas traseiras.



Fonte: autoria própria

Figura 34 - Resultado da impressão das hélices.



Fonte: autoria própria

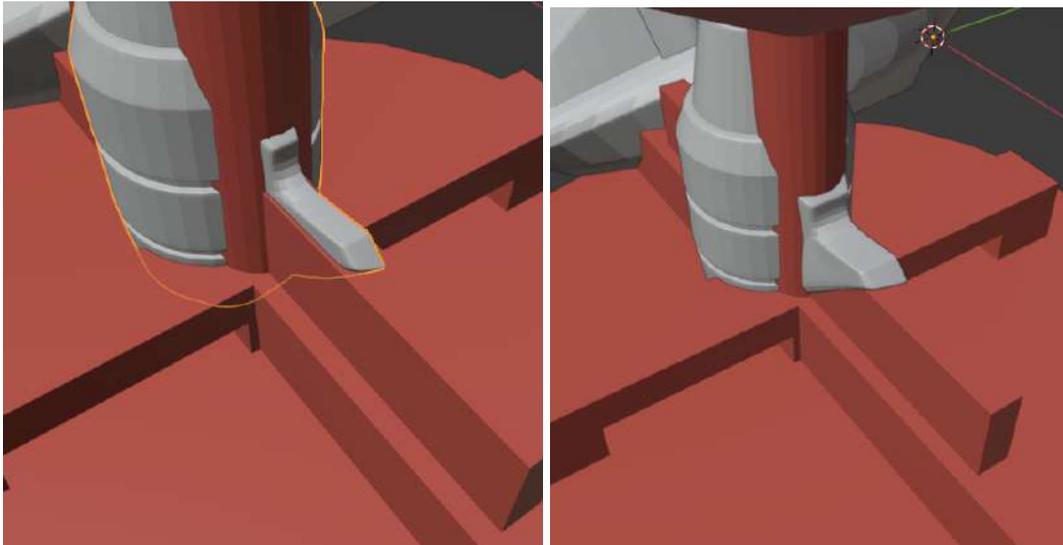
Figura 35 - Junção do modelo da hélice e corpo em um só.



Fonte: autoria própria

Ao conferir as dimensões da turbina novamente, identificou-se que a espessura estava levemente menor que o mínimo recomendado (Figura 36-A), alteração ocorrida possivelmente durante a suavização das superfícies. Elas foram então corrigidas para passar do tamanho mínimo (Figura 36-B).

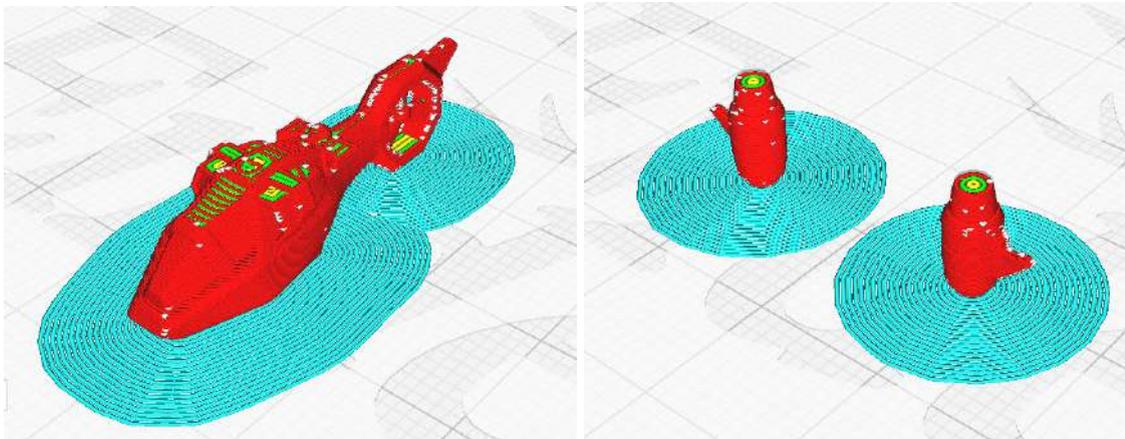
Figura 36 - Correção da espessura da asa da turbina verificando com validador.



Da esquerda para a direita: A) Verificação da espessura. B) Espessura corrigida.
Fonte: autoria própria

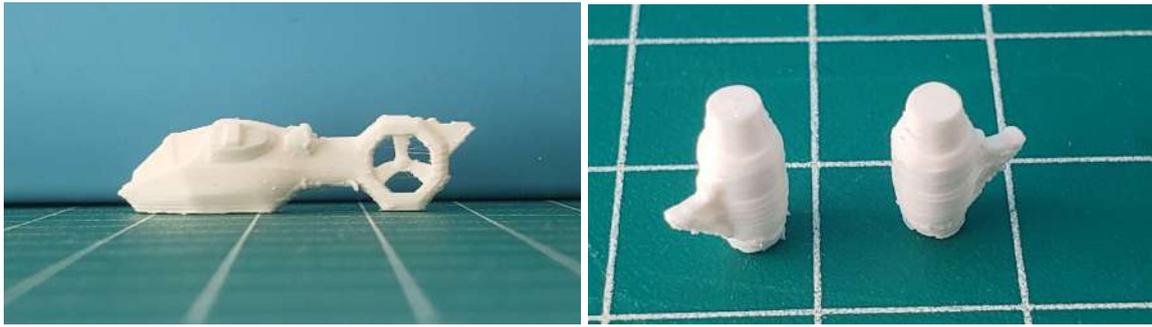
As versões novas do corpo e das turbinas foram então fatiadas no Cura e enviadas para impressão (Figuras 37 e 38).

Figura 37 - Fatiamento e impressão das partes ajustadas.



Da esquerda para a direita: A) Fatiamento do corpo da nave B) Fatiamento das turbinas.
Fonte: autoria própria

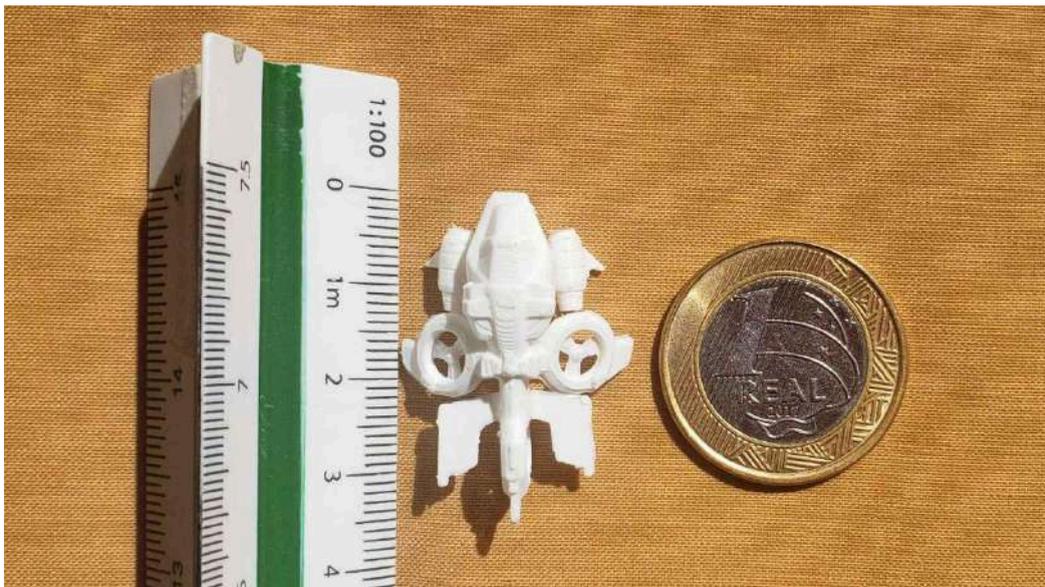
Figura 38 - Resultado da impressão das partes ajustadas



Da esquerda para a direita: A) Impressão do corpo da nave. B) Impressão das turbinas da nave.
Fonte: autoria própria

Após a impressão, não houve necessidade de refazer os modelos ou alterar as configurações destas peças. Todas as partes aprovadas foram fixadas com cola instantânea (Figura 39) e o processo foi encerrado.

Figura 39 - Resultado da montagem das peças impressas com escalímetro e moeda para escala.

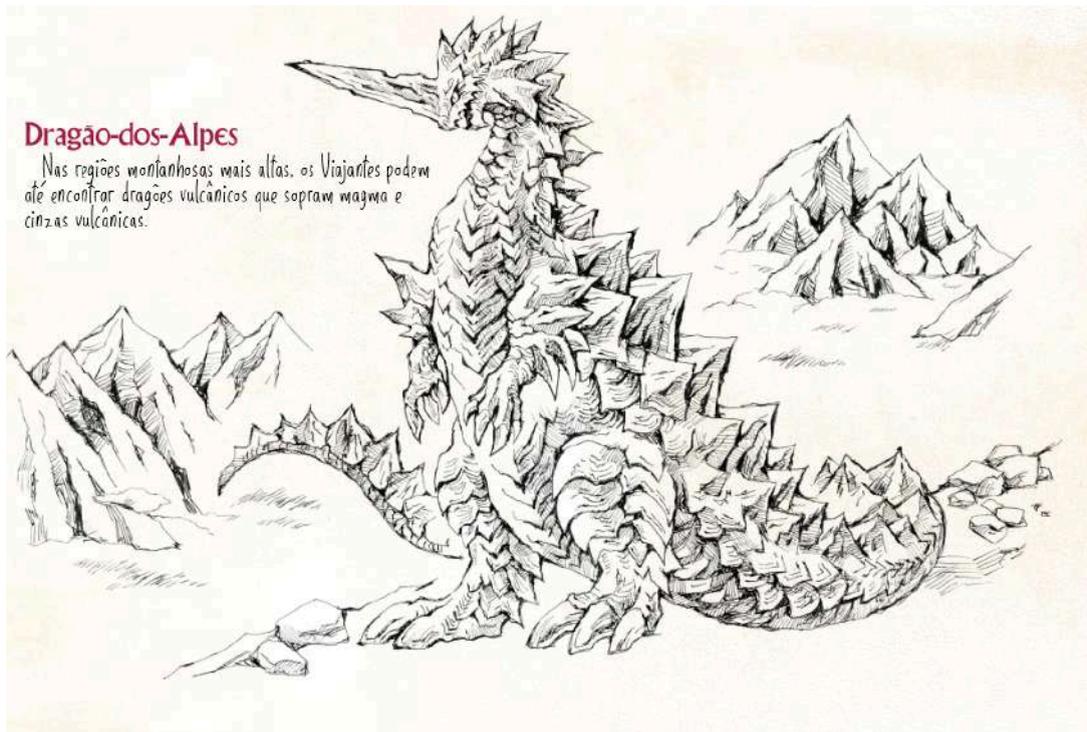


Fonte: autoria própria

4.3 Criatura de cenário de fantasia

Para a criação de um cenário fantasia, foi escolhido o Dragão-dos-Alpes do jogo de RPG de mesa Ryuutama: Um RPG de Fantasia Natural (Figura 40). O formato dos espinhos e chifres destacam a aplicação dos ângulos de impressão e espessuras de paredes durante o processo de modelagem.

Figura 40 - Dragão-dos-alpes do sistema de RPG Ryuutama



Fonte: *Ryuutama: um RPG de Fantasia Natural* (2024)

4.3.1 Estratégia

Se for considerado a mesma escala da figura humana que foi usada para a primeira miniatura, a proporção do dragão ficaria grande demais para os propósitos deste trabalho, já que as ilustrações mostram uma criatura maior que montanhas. Neste caso, para preservar um tamanho reduzido menor que 50mm, foi escolhido trabalhar com o tamanho de 30mm em escala absoluta.

Dentre essas considerações, será utilizado as seguintes configurações iniciais para a impressão em uma impressora Ender-3 de bico de tamanho 0.4, seguindo as definições que obtiveram sucesso nas miniaturas anteriores:

- Layer Height (Altura de camada): 0.12mm
- Initial Layer Height (Altura de camada Inicial): 0.1mm
- Wall Line Count (Quantidade de linhas de parede): 2
- ZSeam Alignment (Alinhamento da linha de junção Z): Shortest
- Seam Corner preference (Preferência de cantos da linha de junção): Hide/Expose seam (Esconder/Expor linha de junção)
- Infill density (Densidade de preenchimento): 15%

- Infill Pattern (Padrão de preenchimento): Zig Zag
- Infill Before Walls (Preenchimento antes das paredes): On
- Printing Temperature (Temperatura de impressão): 190C
- Build Plate Temperature (Temperatura da base de impressão): 50C
- Flow (Fluxo): 83% (O valor depende da impressora)
- Print Speed (Velocidade de impressão): 20mm/s
- Travel Speed (Velocidade de deslocamento): 250mm/s
- Retract At Layer Change (Retrair ao mudar de camada): On
- Zhop When Retracted (Salto Z quando retraído): On
- Minimum Layer Time (Tempo mínimo de camada): 7s
- Build plate adhesion (Adesão a base de impressão): Brim

4.3.2 Escopo

Como o jogo de origem deste modelo não possui referências visuais além da sua ilustração, a coleta de referências incluiu a arte oficial e outras fontes visuais que possuem elementos similares, como imagens de cadeias de montanhas, répteis e outras criaturas fictícias com silhuetas similares, como Zorah Magdaros, do videogame Monster Hunter: World e o Godzilla (Figura 41).

Figura 41 - Referências visuais da criatura

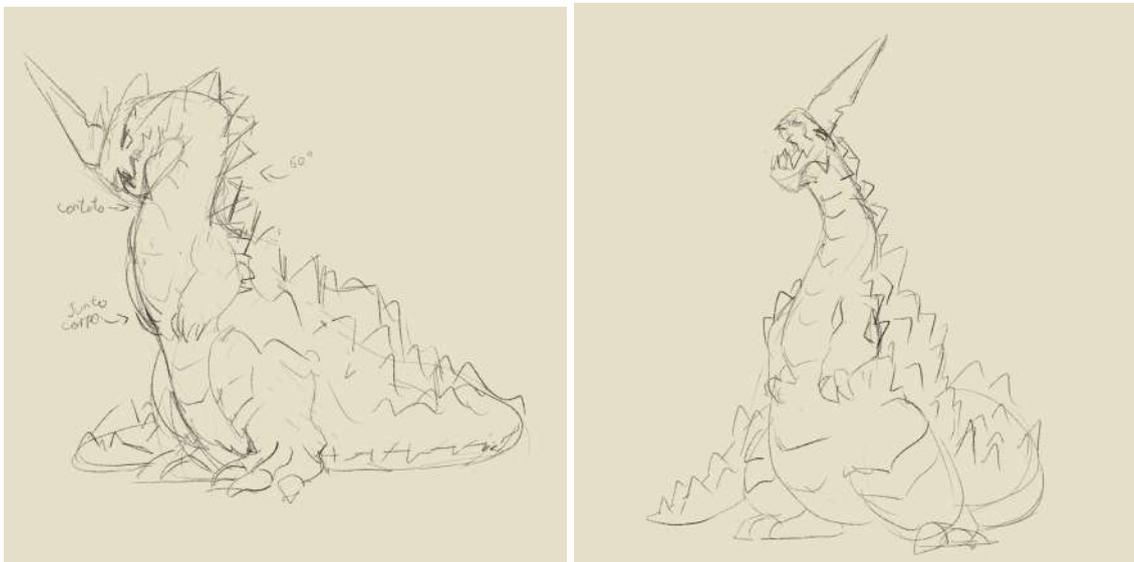


Fonte: Compilação do autor.

4.3.3 Esqueleto

As ideias da pose para a miniatura posicionam os espinhos, a cabeça e os braços de maneira que permitam a miniatura de ser impressa inteiramente, sem precisar de cortes. No primeiro esboço (Figura 42-A), o queixo se apoia na curva do pescoço, mantendo os ângulos máximos para impressão de overhangs. O segundo esboço explora a ideia de angular a cabeça para cima com a boca aberta, incorporando elementos da pose do Godzilla (Figura 42-B). A primeira pose foi escolhida para o modelo final, por retratar melhor a característica mais neutra da arte original, a segunda opção sendo considerada agressiva demais para o contexto do jogo de onde se origina.

Figura 42 - Ilustrações para orientação da modelagem da criatura



Da esquerda para a direita: A) Pose com cabeça abaixada. B) Pose com cabeça levantada.

Fonte: autoria própria

4.3.4 Pré-Estética

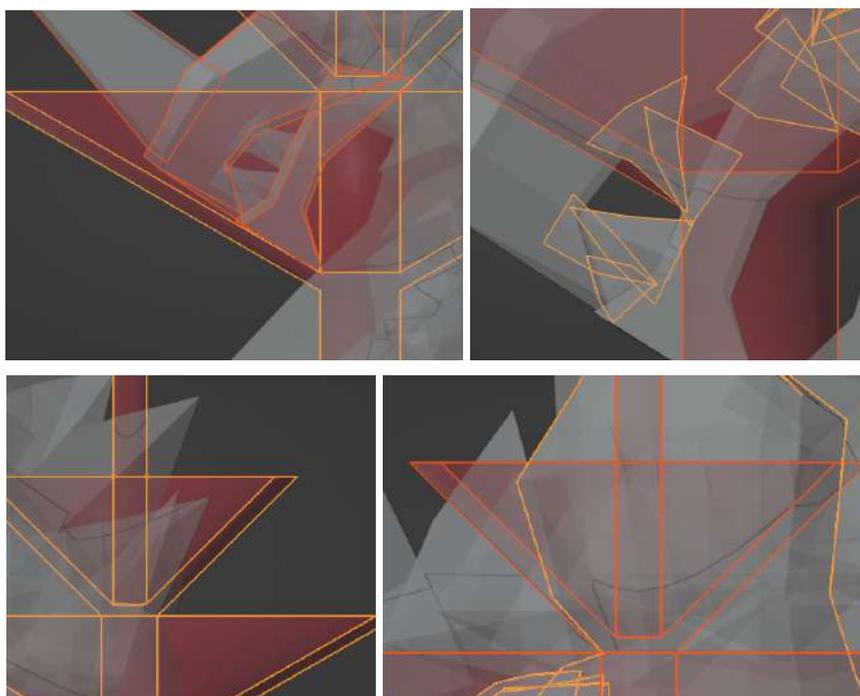
A forma básica do modelo foi produzida no Blender (Figura 43), com atenção em construir os dentes, pernas e morros nas costas do dragão com ângulos dentro do limite de 60 graus para imprimir sem suportes, sendo conferidos pelo validador (Figura 44).

Figura 43 - Modelagem em baixa definição (Low poly) da criatura



Fonte: autoria própria

Figura 44 - Avaliação de ângulos através do validador.



Da esquerda para a direita, de cima para baixo:

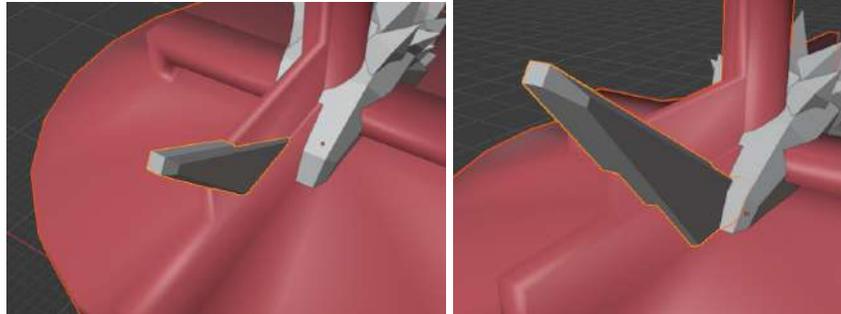
- A) Verificação do ângulo do queixo com o pescoço.
- B) Verificação do ângulo dos dentes.
- C) Verificação do ângulo dos espinhos.
- D) Verificação do ângulo das pernas.

Fonte: autoria própria

Depois de ajustados e validados os ângulos, foi conferida a espessura do chifre e costas e constatou-se que a espessura estava menor do que a indicada

pelo validador (Figura 45-A), sendo corrigidas e finalizando a etapa de pré-estética (45-B).

Figura 45- Verificação e correção da espessura do chifre



Da esquerda para a direita: A) Verificação da espessura. B) Espessura corrigida.

Fonte: autoria própria

4.3.5 Estética

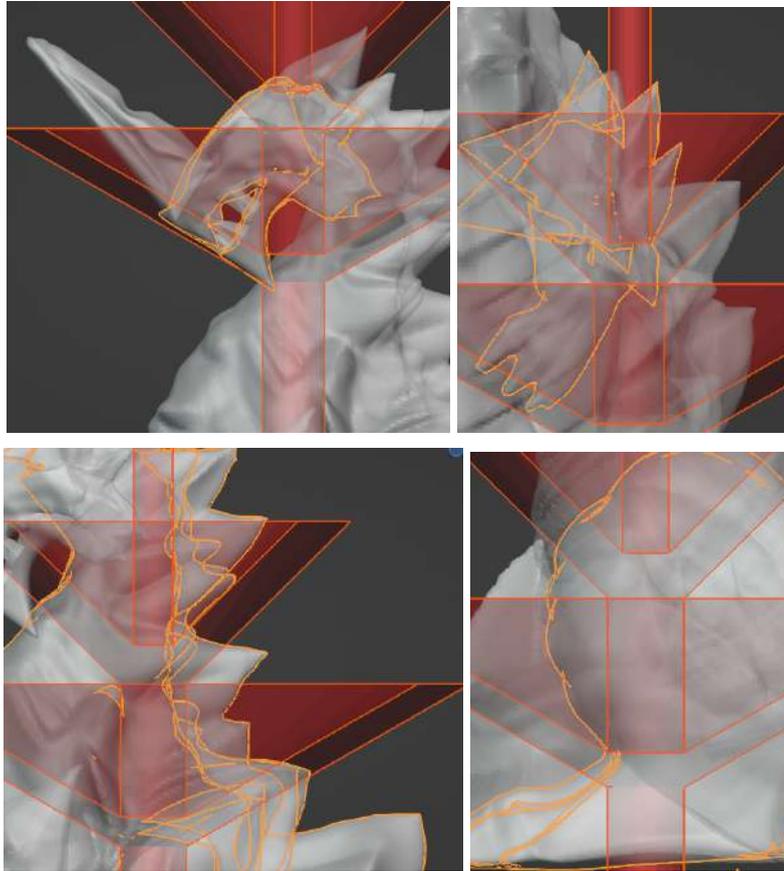
Uma vez validadas as formas básicas, a malha foi combinada para poder acrescentar os detalhes das rochas nas costas, o relevo do chifre e rosto e as escamas da barriga e pernas (Figura 46). O validador foi então aplicado para conferir se os ângulos da cabeça e chifre, das rochas das costas na vista frontal e lateral e nas escamas do corpo e pernas seguiam atendendo aos critérios de impressão (Figura 47). Com isso, o modelo foi exportado em .STL e encaminhado para a próxima etapa.

Figura 46 - Modelagem da criatura depois da etapa de estética.



Fonte: autoria própria

Figura 47 - Avaliação de ângulos através do validador.



Da esquerda para a direita, de cima para baixo:

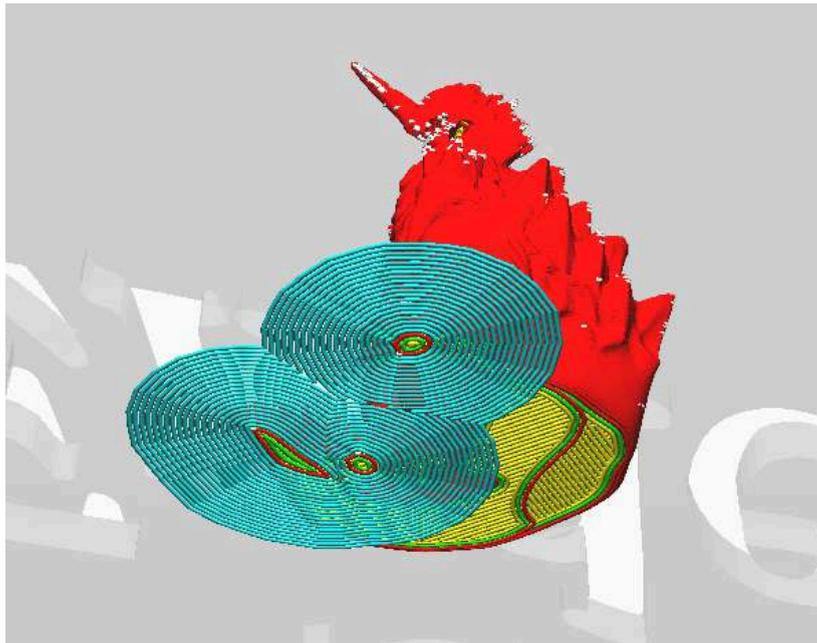
- A) Verificação do ângulo do queixo. B) Verificação do ângulo dos espinhos em vista frontal.
- C) Verificação do ângulo dos espinhos em vista lateral. D) Verificação do ângulo das pernas.

Fonte: autoria própria

4.3.6 Experimento

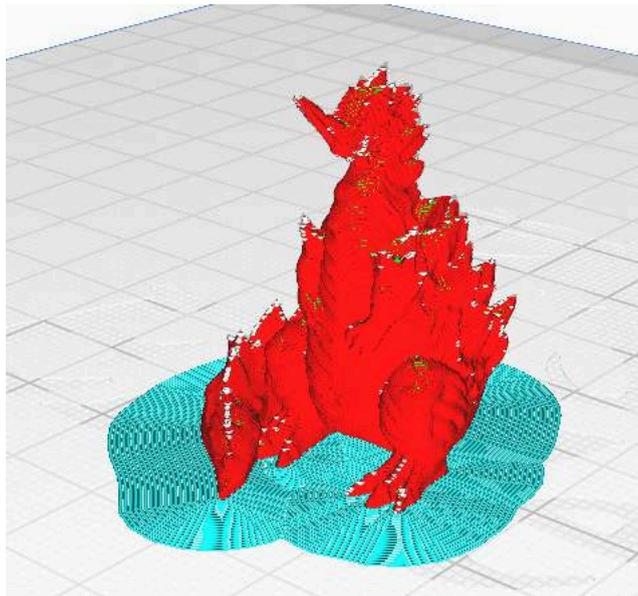
Após abrir o modelo no fatiador, verificou-se que a sua base não estava corretamente alinhada à mesa de impressão (Figura 48), sendo o modelo levado de volta ao Blender para ser alinhado, exportado e fatiado novamente (Figura 49).

Figura 48 - Modelo desalinhado a mesa de impressão



Fonte: autoria própria

Figura 49 - Modelo alinhado a mesa de impressão



Fonte: autoria própria

Com as correções implementadas, foi feito o primeiro teste de impressão do modelo. Usamos as configurações iniciais do Cura definidas na etapa de estratégia e foram atingidos os resultados da impressão apresentados na figura 50.

Figura 50 - Vista frontal e lateral da impressão da criatura.

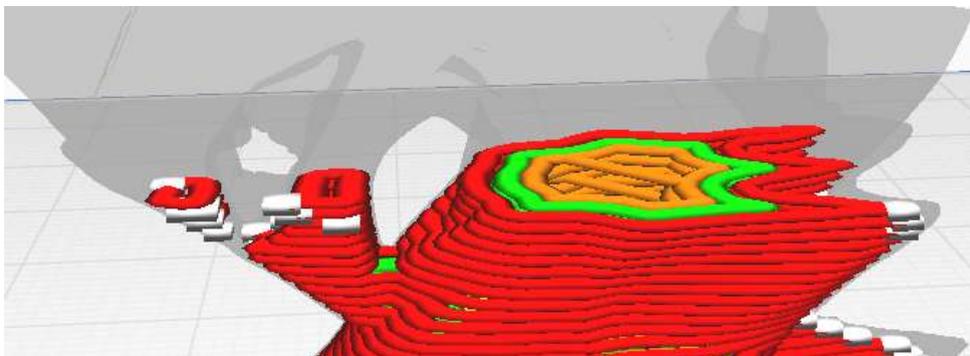


Da esquerda para a direita: A) Vista frontal da miniatura. B) Vista lateral da miniatura.

Fonte: autoria própria

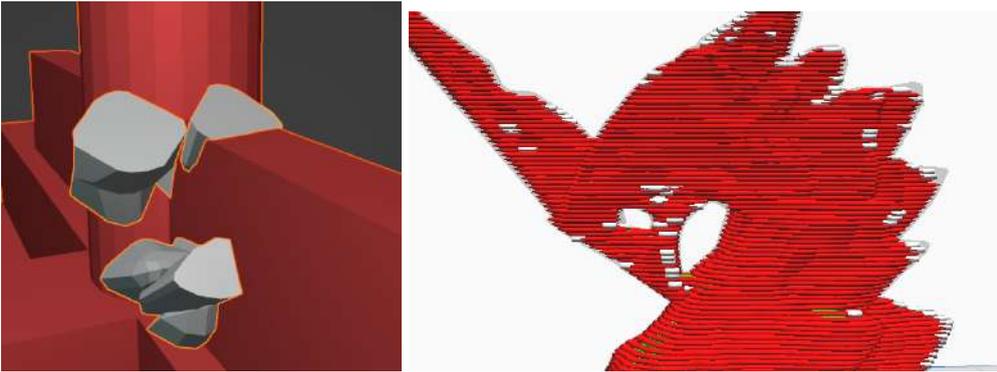
Após a impressão, notou-se que, no fatiador, havia uma pequena seção dos dentes e das rochas do pescoço que estavam finas demais para serem completamente impressas (Figura 51), sendo decidido ajustar novamente no Blender (Figura 52-A) e fazer outro teste com as mesmas configurações e material no modelo novo (Figuras 52-B). Apesar das alterações, o resultado da impressão não apresentou alteração significativa.

Figura 51 - Verificação no fatiador da falha na boca



Fonte: autoria própria

Figura 52 - Correção do modelo e verificação no fatiador.



Da esquerda para a direita: Figura 52-A Correção do modelo; Figura 52-B Verificação no fatiador.
Fonte: autoria própria

A figura 53 mostra o resultado da impressão. Quando o objeto foi avaliado, considerou-se que não seriam necessárias alterações no modelo ou reiterar o teste, concluindo a criação do modelo do Dragão-dos-Alpes.

Figura 53 - Vista lateral do resultado impresso com escalímetro e moeda para escala.



Fonte: autoria própria

5. Resultados

Observando a aplicação do método durante o processo de modelagem, considera-se que para maior entendimento, seria importante esclarecer a distinção entre as etapas de conceituação (Escopo e Esqueleto) e modelagem (Pré-estética e Estética) agrupando-as em macroetapas separadas.

Também foi percebido que a etapa de experimento poderia ser melhor aplicada se considerar a etapa de avaliação no fatiador e a etapa de impressão como sub etapas dentro da macro etapa de experimento e sintetizando as condições de falha que fariam com que o modelo retorne para etapas anteriores e como elas seriam corrigidas.

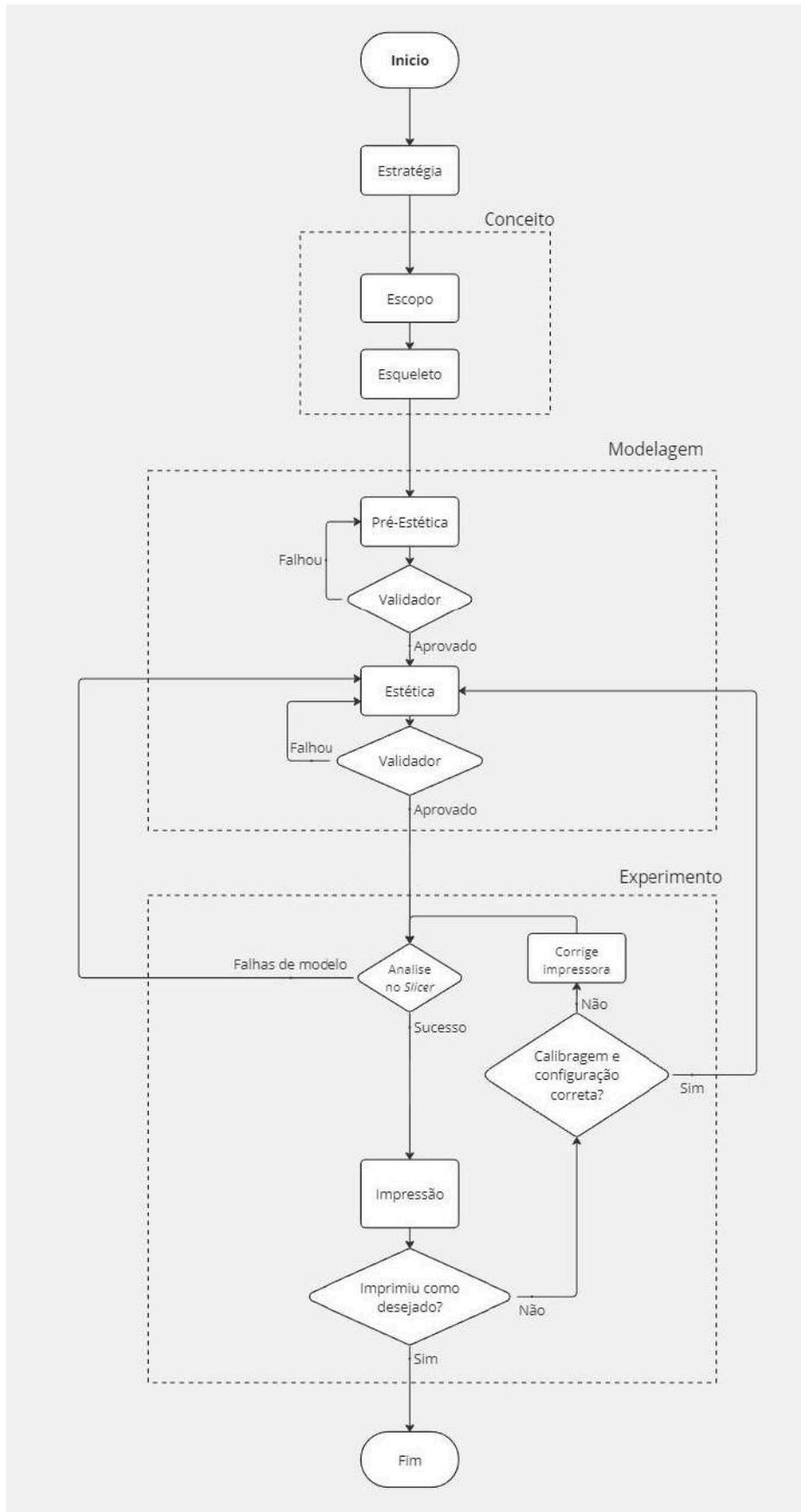
Considerando isso, construiu-se um fluxograma adaptado que incorpora essas considerações para melhor aplicação do processo no futuro (Figura 54).

Na nova versão do fluxograma, a análise do *slicer* não se restringe apenas a avaliar se o modelo é *watertight*, permitindo que outras observações que necessitem de correção no modelo possam retornar para a etapa de estética, como inconsistência de dimensões que fariam a impressão pular camadas, como a observada no experimento do personagem humano e no da criatura. A impressão também foi transferida para sua própria etapa. Assim, nos casos em que a impressão precise ser interrompida, não é necessário avançar para a etapa de análise. Mas, sempre que seja concluída, ou quando o erro demandar postura semelhante, deve-se avaliar se a impressão saiu como desejado, se precisou ser interrompida ou se o resultado final foi uma impressão indesejada.

Analisando os resultados obtidos das impressões, notou-se que o procedimento completo diminuiu a quantidade de deformidades e correções, tanto por implementar boas práticas de modelagem com finalidade de impressão em FDM quanto por eliminar a necessidade de suportes nos testes realizados.

O tempo de impressão da figura humana foi de uma hora e 2 minutos, da nave foi de 46 minutos totais (27 para o corpo, 6 para as asas, 4 para a cauda e 9 para as turbinas) e o dragão demorou uma hora e 44 minutos. Se o bico utilizado fosse de diâmetro 0.2mm, o tempo de impressão simulado no fatiador aumenta para uma hora e 42 minutos para o humano, uma hora e 20 minutos para a nave e o dragão para duas horas e 49 minutos, mantendo as mesmas configurações de fatiamento.

Figura 54 - Fluxograma adaptado



Fonte: autoria própria

6. Considerações

A estrutura básica do processo de Lima e Meurer (2011) permitiu a adaptação para um processo de modelagem 3D voltado para impressão, tanto em FDM quanto em SLA (Ferrari Filho, 2022). Convém notar que esses critérios são extensíveis a outros produtos digitais. Fabricantes de jogos que porventura quiserem ampliar o engajamento junto ao público podem optar por criar cenários específicos, que respeitem esses critérios já no processo de arte conceitual e modelagem. Com isso, o público poderia ter acesso a dioramas e cenários imprimíveis, que poderiam ser materializados em impressão caseira ou aluguel de impressoras em *fablabs* ou espaços *maker*. E, neste sentido, a fidelidade entre o impresso e a experiência de jogo ficaria sob controle da fabricante, e não de adaptações ou *fanarts* feitas pelo público.

Durante a implementação, percebeu-se que o uso do validador ajudou a evitar problemas que se manifestariam apenas em etapas posteriores. Ao rever o processo aplicado nos três experimentos, percebeu-se que o do personagem humano precisou retornar mais vezes da etapa de experimento para a etapa de estética do que a nave e a criatura. Isso ocorreu por se tratar de um modelo que envolve a forma humana e uma pose de ação. Isso pode ter ocorrido por que nossa percepção é mais atenta a imprecisões em representações humanas do que em máquinas ou criaturas fictícias. Também pode ter contribuído o fato de ser a primeira miniatura a ser modelada, prescindindo do período de adaptação ao uso da ferramenta de validação, pois a medida que o modelador foi se acostumando com os requisitos, houve uma diminuição na quantidade de vezes que o validador precisou ser aplicado, sendo somente usado para conferir correções e pontos de incerteza, como nos braços da miniatura do personagem humano. O processo na miniatura da nave retornou com menos falhas de superfície e mais fidelidade quando comparada aos demais experimentos, já que suas superfícies retas se beneficiam mais do processo de impressão FDM que as formas curvas e orgânicas. O do dragão, por ter sido o último, teve a vantagem do modelador estar mais acostumado com o processo e ter atenção a pontos de validação, o que contribuiu para tornar o procedimento mais rápido e ter menos falhas.

O processo também poderia ser aprimorado pela inclusão de ferramentas mais completas e automatizadas voltadas para impressão em softwares de escultura digital para substituir o validador que é aplicado com movimento do próprio modelador, abrindo espaço para erro humano durante a verificação, possivelmente deixando passar erros ocasionais para etapas seguintes.

Outra questão também, é que seguindo o processo como está, o modelo final fica restrito a aplicação de escultura para impressão, com dificuldade de ser reutilizado para aplicações digitais como animações, jogos ou arte promocional. A menos que haja esta definição durante a etapa de estratégia ou um controle de versionamento entre etapas para guardar a modelagem separada durante a pré-estética ou estética, poderá ocorrer dificuldade em modificar o modelo posteriormente com o objetivo de reaproveitar o que já tem, como gerar outras poses ou mudar partes do modelo como peças, roupas ou rostos.

Destaca-se a importância da calibração adequada para miniaturas em escalas menores, como dimensões totais de altura, largura ou profundidade inferiores a 30 mm. Nestes casos, a redução afeta principalmente as condições de resfriamento, o que pode ocasionar em falhas como as bordas do topo curvando com o resfriamento rápido, colidindo com o bico e derrubando a peça, ou camadas pequenas demais não resfriando rápido o bastante antes de receber mais material quente, deformando a superfície. Após determinadas as configurações adequadas para impressora no primeiro procedimento, os dois seguintes tiveram significativamente menos falhas. Os resultados do procedimento mostraram como a modelagem considerando a fabricação eliminou a necessidade de suportes, que causam boa parte das inconsistências de superfícies e diminuem a qualidade do resultado final.

Estas adaptações focaram na inclusão dos critérios de análise para imprimir bem em FDM, mas o procedimento também pode ser aplicado para impressões em resina por SLA, permitindo maior nível de detalhamento do modelo original e reduzindo a quantidade de suportes necessários, possibilitando gerar dois modelos para distribuição, um com menos detalhes para FDM e outro com mais para SLA.

É possível ainda explorar outros materiais e processos de acabamento utilizados em FDM, com modelos de impressoras mais recentes, voltados ao uso pessoal. Com o crescente interesse em impressão 3D para uso doméstico e de microempresas, é importante reduzir a dependência de conhecimento especializado

e fatores de risco à saúde para produção e fabricação. Uma modelagem consciente das limitações do processo de impressão resulta em menos trabalho que o proprietário de uma impressora FDM precisa para alcançar resultados de produção desejados.

Os modelos utilizados no trabalho, os arquivos de fatiamento e o perfil usado no Cura estão disponíveis no repositório:

<<https://drive.google.com/file/d/1eQ8BhQipJ7uHk696VII5gmVqba7ESKrW/view?usp=sharing>>

7. Referências

DE PAULA, Victor Araujo. **MODELAGEM 3D INSPIRADA EM PERSONAGEM HISTÓRICO DE CONFLITO DO NORDESTE BRASILEIRO**. 2021. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Design) - Universidade Federal de Pernambuco, 2021.

FILHO, José Francisco Ferrari. **MINIATURAS PARA IMPRESSÃO 3D: ETAPAS E PROCESSOS DE CRIAÇÃO**. 2022. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Animação) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2022.

FAT Dragon Games. Disponível em: <https://www.fatdragongames.com/fdgfiles/>. Acesso em: 19 jun. 2024.

SQUARESOFT. **FINAL Fantasy IX**. Videogame, 2000.

HERO Forge. Disponível em: <https://www.heroforge.com/>. Acesso em: 19 jun. 2024.

ILL gotten games. Disponível em: <https://www.illgottengames.net/>. Acesso em: 19 jun. 2024.

LIVESU, Marco; ELLERO, Stefano; MARTÍNEZ, Jonàs; LEFEBVRE, Sylvain; ATTENE, Marco. **From 3D Models to 3D Prints: an Overview of the Processing Pipeline**. Computer Graphics Forum, 2017.

LIMA, Alessandro; MEURER, Heli. *Projeto de personagens tridimensionais e virtuais: validação e adaptação de metodologias*. In: **GAMEPAD LEVEL 4 – SEMINÁRIO DE GAMES, COMUNICAÇÃO E TECNOLOGIA [Anais]**, Universidade FEEVALE, 2011.

MERILÄINEN, Mikko; HELJAKKA, Katriina; STENROS, Jaakko. *Lead fantasies: The making, meaning and materiality of miniatures*. In: **Material Game Studies**, p. 83-101, 1 jun. 2022.

RYUUTAMA: Um RPG de Fantasia Natural. Editora Hugin & Muninn, 2024.

BLIZZARD ENTERTAINMENT. **STARCRAFT II: Wings of Liberty**. Videogame, 2000.

TRESCA, Michael J. **The Evolution of Fantasy Role-Playing Games**. McFarland & Company, Inc., 2011.

VASSÃO, Caio. **Metadesign: ferramentas, estratégia e ética para a complexidade**. Editora Blucher, 2010.