

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

FELIPE MATEUS FRANCO

**USO DE MODELAGEM 3D E MANUFATURA ADITIVA NO AUXÍLIO À
FABRICAÇÃO DE PRÓTESES FACIAIS DE SILICONE**

CURITIBA

2021

FELIPE MATEUS FRANCO

**USO DE MODELAGEM 3D E MANUFATURA ADITIVA NO AUXÍLIO À
FABRICAÇÃO DE PRÓTESES FACIAIS DE SILICONE**

**Use of 3D modelling and additive manufacturing to aid the fabrication of
silicone facial prostheses**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. José Aguiomar Foggiatto.

CURITIBA

2021

FELIPE MATEUS FRANCO

**USO DE MODELAGEM 3D E MANUFATURA ADITIVA NO AUXÍLIO À
FABRICAÇÃO DE PRÓTESES FACIAIS DE SILICONE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 06/dezembro/2021

José Aguiomar Foggiatto
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Neri Volpato
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Sergio Leandro Stebel
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me permitido as oportunidades da vida que me guiaram até a conclusão deste curso e a escrita deste trabalho. Agradeço também o apoio da família e dos amigos ao longo desta jornada. De modo especial, agradeço ao professor José Aguiomar Foggiatto, meu orientador de estágio interno, de estágio externo, de iniciação científica e deste TCC, por todos os ensinamentos valiosos desde 2017, bem como a todos os integrantes do Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental (NUFER) que, em maior ou menor quantidade, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Também, agradeço à Dra. Karin Barczyszyn e ao Hospital Angelina Caron, por terem trazido a demanda que proporcionou esta oportunidade de pesquisa e terem contribuído imensamente para sua execução. A todos vocês, meu mais sincero muito obrigado.

RESUMO

Próteses faciais são dispositivos assistivos usados na reabilitação de pacientes que possuem deformidades na região do rosto por inúmeros motivos. O serviço de produção de próteses faciais é dominado atualmente por um método artesanal de confecção, que consome tempo e recursos dos profissionais de saúde habilitados para esta função. Neste trabalho, é apresentado um fluxo de trabalho virtual de confecção de próteses faciais que foca em substituir alguns dos passos que os profissionais de saúde têm que realizar manualmente por ações virtuais, aumentando a agilidade da resolução do caso e poupando recursos tanto do profissional quanto da clínica ou hospital onde é realizado o serviço. O método é descrito detalhadamente e validado clinicamente, usando como base implantações de próteses faciais em casos reais, em um estudo submetido a um Comitê de Ética em Pesquisa. Os resultados mostram a viabilidade da reabilitação facial via próteses de silicone usando o fluxo virtual, com pareceres positivos vindos de uma profissional de saúde experiente na área das próteses faciais, concluindo assim com sucesso este desenvolvimento.

Palavras-chave: prótese facial; engenharia de reabilitação; impressão 3D; silicone; projeto auxiliado por computador.

ABSTRACT

Facial prostheses are assistive devices used in the rehabilitation of patients that have facial deformities for a number of reasons. The facial prosthesis manufacturing service is currently dominated by a handmade method, which consumes time and resources of healthcare professionals licensed to perform this function. In this paper, a virtual workflow of facial prostheses manufacturing is presented, which focuses on replacing some of the steps that the healthcare professionals have to perform manually with virtual actions, increasing the agility of the case resolution and saving resources of both the professional and the clinic or hospital where the service is performed. The method is described in detail and clinically validated, using as basis the implantation of prostheses in real cases, in a study submitted to a Research Ethics Committee. The results show the feasibility of facial rehabilitation via silicone prostheses using the virtual workflow, with positive feedback from an experienced healthcare professional from the facial prostheses area, thus successfully concluding this development.

Keywords: facial prosthesis; rehabilitation engineering; 3D printing; silicone; computer-aided design.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Caso de reabilitação de deformidade nasal: (a) Anatomia da lesão, (b) prótese nasal usada para reabilitação facial, (c) outro ângulo do resultado obtido.	10
Figura 2 - Máscara de gesso para caso de prótese nasal	19
Figura 3 - Tomografia Computadorizada: (a) Corte representando um corte sagital da região de cabeça e pescoço, (b) Localização do corte em um modelo 3D da cabeça	21
Figura 4 - Escala de Hounsfield para estruturas anatômicas comuns	21
Figura 5 - Reconstrução 3D baseada nos arquivos de TC para um caso de prótese óculo-palpebral: (a) corte axial, (b) corte sagital, (c) corte coronal, (d) superfície 3D reconstruída	22
Figura 6 - Digitalização a laser de objetos	23
Figura 7 - Digitalização da máscara de gesso para desenvolvimento de caso de prótese nasal	23
Figura 8 - Exemplo de protocolo para fotogrametria com 26 fotos	24
Figura 9 - Princípio de funcionamento da manufatura aditiva por extrusão de material com alimentação por filamento	26
Figura 10 - Fluxograma do método virtual proposto para confecção de próteses faciais	30
Figura 11 - Fluxograma da parte Aquisição da Geometria Facial	31
Figura 12 - Fluxograma da etapa Análise do Caso.....	34
Figura 13 - Fluxograma da etapa Modelagem da Prótese.....	35
Figura 14 - Fluxograma da etapa Confecção dos Moldes.....	38
Figura 15 - Fluxograma da etapa Fabricação da Prótese em Silicone	40
Figura 16 - Reconstrução da TC no programa InVesalius	47
Figura 17 - Superfície do rosto contendo a região de interesse	48
Figura 18 - Modelo de nariz escolhido como base e seu posicionamento no rosto da paciente.....	49
Figura 19 - Vistas frontal e lateral da prótese implantada no rosto	49
Figura 20 - Modelagem da parte traseira da prótese.....	50
Figura 21 - Vistas lateral e traseira da prótese final.....	50
Figura 22 - Superfície de partição (cinza claro) dos moldes da prótese	51
Figura 23 - Moldes superior e inferior	52
Figura 24 - Suavização do molde: Região de análise (esq.), borda antes da suavização (centro) e depois da suavização (dir.).	53
Figura 25 - Planejamento e impressão dos moldes: a) simulação da impressão do modelo 3D. b) par de moldes impressos e pós-processados.....	54
Figura 26 - Relação de materiais para a moldagem do silicone.....	54
Figura 27 - Aplicação do silicone nos moldes: (a) Mistura do silicone com pigmentação intrínseca; (b) inserção do silicone nos moldes	55
Figura 28 - Prótese nasal após cura do silicone nos moldes impressos.....	56

Figura 29 - Prótese auricular esquerda gerada a partir da orelha contralateral	57
Figura 30 - Estudo de dos moldes de prótese auricular da Paciente 2	58
Figura 31 - Prótese óculo-palpebral do estudo de caso da Paciente 3	59
Figura 32 - Moldes e prótese óculo-palpebral	60
Figura 33 - Materiais enviados à protesista	61
Figura 34 - Evolução do caso de prótese nasal da Paciente 1	64
Figura 35 - Evolução do caso de prótese auricular da Paciente 2	65
Figura 36 - Evolução do caso de prótese óculo-palpebral da Paciente 3	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Analogias entre o método artesanal de confecção de próteses faciais e o fluxo virtual proposto por este trabalho.	27
Quadro 2 - Atividades desenvolvidas na Fase 1	28
Quadro 3 - Atividades desenvolvidas na Fase 2	29
Quadro 4 - Parâmetros de impressão dos moldes para prótese nasal	53
Quadro 5 - Parâmetros de impressão dos moldes para prótese auricular	57
Quadro 6 - Parâmetros de impressão dos moldes para prótese óculo-palpebral	60
Quadro 7 - Três próteses faciais modeladas a partir dos arquivos de TC	63
Quadro 8 - Avaliação da prótese nasal da Paciente 1.....	64
Quadro 9 - Avaliação da prótese auricular da Paciente 2.....	65
Quadro 10 - Avaliação da prótese óculo-palpebral da Paciente 3	67

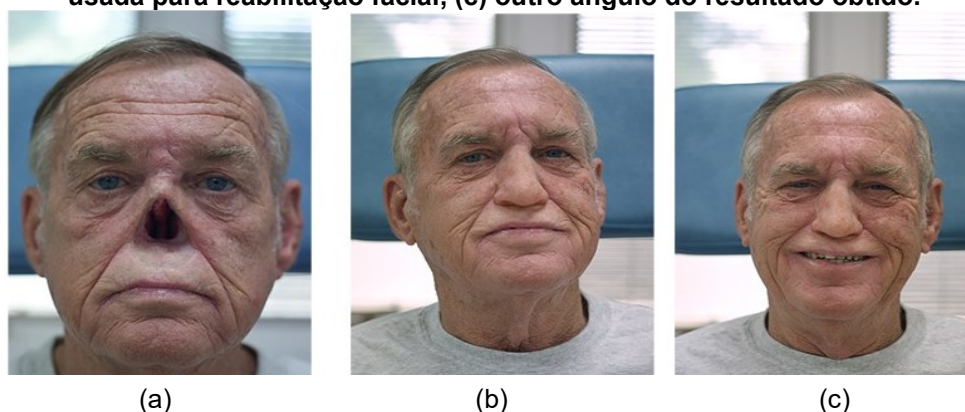
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	PROBLEMA	12
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo geral	13
1.2.2	Objetivos específicos	14
1.3	JUSTIFICATIVA	14
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	DEFORMIDADES FACIAIS	16
2.2	PRÓTESES FACIAIS	17
2.3	TECNOLOGIAS PARA O AUXÍLIO NA CRIAÇÃO DE PRÓTESES FACIAIS	19
2.3.1	Digitalização de objetos	20
2.3.2	Modelagem 3D	24
2.3.3	Impressão 3D	25
2.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE O REFERENCIAL TEÓRICO	27
3	METODOLOGIA	28
3.1	FASE 1 – ABORDAGEM TEÓRICA DO MÉTODO	29
3.1.1	Apresentação teórica do método	30
3.1.1.1	Aquisição da geometria facial	31
3.1.1.2	Análise do caso	33
3.1.1.3	Modelagem da prótese	34
3.1.1.4	Confecção dos moldes	37
3.1.1.5	Fabricação da prótese em silicone	39
3.1.2	Primeiro projeto ao comitê de ética em pesquisa	42
3.1.3	Segundo projeto ao comitê de ética em pesquisa	44
3.2	FASE 2 – ABORDAGEM PRÁTICA DO MÉTODO	45
3.2.1	Aplicação do método em caso de prótese nasal	46
3.2.2	Aplicação do método em próteses auriculares	56
3.2.3	Aplicação do método em próteses óculo-palpebrais	58
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	62
5	CONCLUSÕES	68
	REFERÊNCIAS	70
	APÊNDICE A - Questionário de Pesquisa – Próteses Virtuais	75
	APÊNDICE B - Questionário de Pesquisa - Implantações	77

1 INTRODUÇÃO

As próteses faciais (Figuras 1(b) e 1(c)) são dispositivos assistivos focados em reabilitar pacientes que sofreram algum tipo de lesão facial ou passaram por uma intervenção cirúrgica (ACKERMAN, 1953). São utilizadas geralmente em casos que envolvem cirurgias de ressecção de câncer de pele na região do rosto, procedimentos de reconstrução facial após um trauma ou o tratamento de doenças congênitas, como a microtia (BOCKEY *et al.*, 2018). Todas estas três situações implicam em uma deformidade facial irreversível para o paciente (Figura 1(a)) que, embora saudável, ainda necessita de uma forma de reabilitação psicossocial para se reintegrar à sociedade (GODOY *et al.*, 2011).

Figura 1 - Caso de reabilitação de deformidade nasal: (a) Anatomia da lesão, (b) prótese nasal usada para reabilitação facial, (c) outro ângulo do resultado obtido.



Fonte: Real Life Faces (2021)

Tradicionalmente, as próteses faciais são confeccionadas de modo manual por profissionais da odontologia especializados em procedimentos bucomaxilofaciais (CARVALHO *et al.*, 2019). O método tradicional de confecção de próteses faciais baseia-se em quatro passos principais:

- a) Passo 1: Captura da anatomia do rosto do paciente. É confeccionado um modelo facial em gesso que replica a região lesionada do rosto e seus arredores. Deste modo, o protesista pode trabalhar na prótese sem que o paciente esteja presente no consultório.
- b) Passo 2: Escultura artesanal do órgão facial artificial de interesse. Usando massa de modelar, cera ou diversos outros materiais facilmente moldáveis, o protesista esculpe o órgão de interesse. É um trabalho

personalizado para cada caso e é usual tentar ocultar lesões, cicatrizes e outros defeitos faciais do paciente.

- c) Passo 3: Fabricação da prótese em silicone biocompatível. A partir do modelo em cera (ou outro material), é fabricada uma mufla para a confecção da prótese em silicone. A mufla age como um molde para o silicone líquido e, ao final de seu processo de solidificação, o material assume a forma da prótese a ser implantada.
- d) Passo 4: Caracterização e implantação da prótese. No último passo, são dados os retoques estéticos que conferem realismo à peça, também muito específicos caso a caso. São adicionadas tonalidades diferentes, pelos, veias, pintas, rugas, entre outros, para que a transição prótese-pele se dê de uma forma natural e homogênea. Em próteses óculo-palpebrais também é confeccionado um olho em resina acrílica para completar o trabalho. No momento da implantação, o paciente é consultado sobre a aparência e o conforto da peça, e ajustes são realizados caso necessário.

Vê-se que este fluxo de trabalho, embora consolidado, é bastante dependente da habilidade manual do protesista e requer um elevado tempo de treinamento e trabalho. O método todo envolve técnicas altamente artesanais, como os procedimentos de modelagem manual, e materiais especializados, como a mufla para moldar o silicone. Assim, o processo se torna demorado e caro, além de limitar o número de atendimentos. Considerando este como um serviço tão importante aos pacientes que dele necessitam (GODOY *et al.*, 2011), se fazem necessárias novas ideias que auxiliem na sua simplificação e popularização.

Com esta demanda em mente, foi desenvolvido no Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental (NUFER) da UTFPR Curitiba um fluxo digital para a modelagem de próteses faciais, que transforma os passos 1 a 3 do método de confecção de próteses acima exposto em procedimentos virtuais, usando tecnologias da engenharia como a modelagem virtual e a manufatura aditiva (FRANCO; FOGGIATTO; BARCZYSZYN, 2020). Este método já foi publicado parcialmente em seminários e congressos, porém nunca de forma integral e ilimitada. Sendo assim, o presente trabalho pretende descrever em detalhes o fluxo virtual de confecção de próteses faciais de silicone, bem como demonstrar sua eficácia em três estudos de caso de próteses nasais, auriculares e óculo-palpebrais.

1.1 PROBLEMA

Os problemas relacionados ao método atual de confecção de próteses faciais podem ser resumidos em três pontos principais: a necessidade de uma elevada habilidade artística por parte do protesista, o tempo que este necessita para produzir uma prótese do começo ao fim, e a dificuldade em se testar geometrias para a prótese de acordo com o rosto do paciente.

O primeiro ponto diz respeito às características artísticas do método manual, que confia ao protesista a responsabilidade de modelar um órgão realista e esteticamente refinado. No fluxo atual, é proibitivo que um profissional com pouca habilidade artesanal de reprodução de peças anatômicas esteja habilitado para atender casos de próteses faciais, mesmo que domine outras partes do processo, como a recepção do paciente, a caracterização e a implantação da prótese. Isso restringe o número de profissionais que aceitam executar serviços na área e faz com que menos pacientes sejam atendidos quando necessitam desta especialidade.

A segunda questão envolve o tempo despendido pelo profissional da odontologia na modelagem manual de próteses faciais. A depender de sua própria experiência e da complexidade de cada caso, é comum que o dentista-protesista utilize um dia inteiro de trabalho apenas para esculpir o modelo básico da prótese (passo 2 apresentado na Introdução). Essa dedicação necessária ao serviço, somada à grande demanda de casos de odontologia clássica que geralmente é assumida por estes profissionais, são fatores que contribuem contra uma maior adesão de dentistas à especialidade da prótese bucomaxilofacial.

O último problema é relacionado à falta de referências faciais no momento da escultura da prótese facial. O modelo em gesso adquirido no primeiro passo do método manual faz um bom trabalho em copiar a área da lesão e seus arredores, mas muitas vezes falha em prover mais informações sobre características faciais do paciente que seriam necessárias para um posicionamento correto e harmonioso da peça no rosto. Isso ocorre pois, no momento da confecção do modelo de gesso, não é possível capturar todo o rosto do paciente de forma confortável, fazendo com que importantes referências, como posição de boca, sobrancelhas, fossas oculares, entre outras, sejam perdidas neste processo.

Dadas estas situações, seguem as hipóteses de como o fluxo de trabalho virtual proposto ajuda a reduzir aspectos dos problemas expostos:

- a) Embora usando constantemente seu *feedback* quanto aos aspectos anatômicos e clínicos da prótese, o método virtual retira da mão do protesista a responsabilidade da modelagem manual da peça, proporcionando a ele receber um molde que gera uma prótese geometricamente correta e que necessita apenas de acabamento estético.
- b) O método reduz a quantidade de horas de trabalho do protesista, substituindo os processos de aquisição da geometria do paciente via máscara de gesso (passo 1 do método), de modelagem manual (passo 2), e de confecção da mufla (passo 3), entregando ao protesista o molde de uma prótese pronta para a confecção em silicone, acabamento e implantação no paciente (passo 4).
- c) Por ser baseado em arquivos do padrão Comunicação e Imagens Digitais em Medicina (do inglês *Digital Imaging and Communications in Medicine*, DICOM) obtidos de tomografias computadorizadas, o método provê ao projetista virtual da prótese uma imagem completa da área da cabeça do paciente, com todas as características faciais e clínicas relevantes para um posicionamento natural da peça no rosto do paciente. Também, como o retrabalho virtual não gasta materiais e insumos, como acontece no retrabalho do modelo físico, é possível produzir várias alternativas de solução para um determinado caso e compará-las.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um fluxo de trabalho para a confecção de próteses faciais, incorporando a modelagem virtual e a manufatura aditiva ao processo manual consolidado, e validá-lo em três casos clínicos reais.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Descrever o método para a modelagem virtual das próteses faciais utilizando os programas de engenharia Meshmixer e Solidworks;
- Detalhar o projeto dos moldes para silicone que dão forma às próteses modeladas virtualmente;
- Fabricar os moldes para próteses silicone utilizando a tecnologia de manufatura aditiva;
- Desenvolver as próteses para três casos reais de deformidade facial (nasal, auricular e óculo-palpebral)
- Validar o fluxo virtual via aplicação de questionário para avaliar a satisfação da protesista com o resultado do trabalho.

1.3 JUSTIFICATIVA

O rosto é uma das principais características que definem a identidade de uma pessoa (ELIAS, 1994). Sendo assim, quando a face é lesionada de modo irreversível, inúmeras sequelas são impostas ao paciente. Mesmo após o sucesso na cura (em casos de câncer) ou na reconstrução cirúrgica (em traumas causados por acidentes, por exemplo), ainda são relatados sentimentos de isolamento, vergonha e de perda de identidade (DA SILVA, 2008). Assim, é necessário desenvolver métodos que contribuam para a popularização e a agilidade do serviço de reabilitação social via próteses faciais.

A descentralização do trabalho no processo de confecção de próteses faciais é uma das ações que têm os efeitos de permitir que mais pacientes sejam atendidos, e mais rapidamente. O primeiro efeito ocorre caso o protesista utilize o tempo em que ficaria modelando manualmente para atender outros pacientes (fazendo a fila de atendimentos diminuir) e o segundo se dá caso a equipe de modelagem virtual trabalhe em horários diferentes do protesista (promovendo a evolução do caso em momentos antes ociosos).

Para o hospital, além do potencial ganho em publicidade e marketing, passando uma imagem moderna e inovadora para a sociedade, é uma oportunidade

de redução de custos e de aumento na gama de profissionais que possam executar o serviço. Os instrumentais e consumíveis mais recomendados para a técnica manual podem ser proibitivos em preço e/ou disponibilidade nacional, ainda mais na realidade econômica deficitária da maioria dos hospitais que atendem pelo Sistema Único de Saúde (SUS). Além disso, a habilidade de modelagem manual requerida para a confecção dos modelos é um fator que diminui a quantidade de profissionais que trabalham com o serviço. Esta parte do processo, sendo executada virtualmente, faz com que o protesista receba o molde da prótese finalizada, apenas devendo moldá-la em silicone, caracterizá-la e implantá-la.

Além dos efeitos práticos, este trabalho também fomenta a popularização nacional das áreas da Engenharia de Reabilitação (GODINHO, 2010) e das Tecnologias Assistivas (BERSCH; TONNOLI, 2006), que unem conceitos dos diversos ramos da engenharia para a produção de soluções para a área médica. Muitas vezes os alunos ingressantes nos cursos de engenharia não consideram a atuação na área da saúde simplesmente por não terem sido expostos a esta possibilidade. Com este trabalho, espera-se registrar mais um possível ramo de trabalho onde alguns dos conceitos ensinados ao longo do curso podem ser aplicados.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 introduziu a situação-problema, os objetivos e a justificativa para a realização deste trabalho. No Capítulo 2 é trazido o referencial teórico dos conceitos utilizados no decorrer do desenvolvimento do trabalho. O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada na resolução da solução-problema, bem como a explicação integral do método virtual de confecção de próteses faciais, dos projetos ao Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) necessários para sua execução, e dos casos de exemplo. O Capítulo 4 traz os resultados obtidos com a aplicação da metodologia, bem como os registros das implantações realizadas para avaliação da qualidade do trabalho e as respostas da protesista que acompanhou os pacientes. As conclusões sobre o desenvolvimento são expostas no Capítulo 5, e as referências bibliográficas fecham o trabalho no Capítulo 6, com dois apêndices ao final contendo os questionários de avaliação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção são apresentados os conceitos que compõem o presente trabalho. Devido às suas características multidisciplinares, são expostas aqui definições relevantes tanto da área da engenharia quanto da área médica. O capítulo inicia com noções sobre deformidades faciais e próteses faciais, apresenta o método manual usado para sua confecção, e traz as tecnologias da área da engenharia que podem ser utilizadas para a confecção de um fluxo similar, mas virtual, de confecção de próteses. Alguns conceitos apresentados no Capítulo 1 são detalhados.

2.1 DEFORMIDADES FACIAIS

Em sua definição médica, deformidades são alterações totais ou parciais em um órgão como consequência de algum agente patológico, como doenças, traumas, entre outros (INFOPÉDIA, 2021). Quando ocorrem na região do rosto são chamadas “deformidades faciais” e possuem impacto negativo na autopercepção e nas interações sociais dos pacientes afetados (CRERAND, 2017). São abordadas neste trabalho três das principais causas para deformações faciais: deformação por ressecção cirúrgica de câncer, deformação por trauma e malformação congênita.

A ressecção cirúrgica é um dos tratamentos possíveis para quadros de câncer em diversos estágios de desenvolvimento. Diferentemente da quimioterapia (tratamento via medicação) ou da radioterapia (tratamento via radiação), que geralmente são as primeiras opções de tratamento de neoplasias, a ressecção é um procedimento invasivo que preza pela retirada do tecido comprometido pelo câncer e de uma área extra ao redor dele, por segurança. Por este motivo, muitos dos pacientes que passam pelo tratamento cirúrgico em casos de câncer de pele na região do rosto acabam necessitando de uma posterior reabilitação facial para que possam reintegrar sua imagem corporal e manter um nível aceitável de qualidade de vida (DROPKIN, 1999).

Outro motivo que também gera necessidade de reabilitação facial é a deformação por trauma, que acontece quando o paciente sofre lesões ou fraturas decorrentes de acidentes graves, principalmente automobilísticos (BELMONTE,

2021). Este tipo de deformação, geralmente repentina, é a que causa as piores reações psicológicas nos pacientes acometidos, com relatos comuns de depressão, ansiedade e problemas de sociabilidade e imagem corporal (DE SOUSA, 2010).

Ainda, uma terceira condição causadora de deformidades no rosto é a malformação congênita. Ela ocorre quando o processo de formação de algum órgão facial não se completa ou sofre alterações, causadas por agentes patogênicos externos, restrição uterina, entre outros. Um exemplo de malformação facial facilmente reabilitável é a microtia, caracterizada quando uma ou ambas as orelhas não se desenvolvem de modo natural, podendo causar assimetria facial e/ou problemas auditivos (ANGLE, 2008).

2.2 PRÓTESES FACIAIS

As próteses faciais são dispositivos assistivos focados na reabilitação psicossocial de pacientes com deformidades faciais. São parte do grupo das próteses bucomaxilofaciais e executadas por profissionais especialistas da odontologia (CRO-SP, 2021). Apresentam-se pouco invasivas e resultam em uma melhora imediata da aparência na área da lesão do paciente, sendo há muitos anos indicadas como parte do processo de recuperação estética e funcional da face (NEVES *et al.*, 2004).

A importância das próteses faciais para os pacientes lesionados é principalmente centrada na recolocação social proporcionada por este dispositivo. A região maxilofacial do rosto possui uma relação muito forte com a expressão de sentimentos e com o senso de autoimagem, então qualquer deformidade ou aspecto antinatural nesta área impacta em relações humanas importantes como as atividades sociais e a naturalidade na presença de outros (BAILEY; EDWARDS, 1975). Também, alguns aspectos funcionais da vida diária, como o uso de óculos (uma vez que devem ser apoiados no nariz e nas orelhas), podem ser recuperados com o uso de uma prótese facial.

O silicone biocompatível é o material usual para a fabricação das próteses faciais. Seus pontos positivos concentram-se na facilidade de sua preparação, na boa aceitação do material quanto a pigmentos intrínsecos (no momento da mistura das partes A e B) ou extrínsecos (no momento do acabamento da prótese), na sua

estabilidade química e física, na sua fácil limpeza e na sua flexibilidade, o que confere boa parte do realismo dos modelos (CARVALHO; ORLANDO; CORSETTI, 2018).

Desde a sua popularização na metade do século XX, as próteses faciais são artigos esculpidos manualmente de forma artesanal. São consideradas obras complexas no ramo da odontologia, pois, além do caráter funcional e anatômico, os modelos devem ter a aparência o mais natural possível (DE CARVALHO *et al.*, 2019). O método manual de confecção de próteses faciais é composto por etapas artesanais que são utilizados para posterior comparação com o método virtual.

Na primeira consulta do paciente com recomendação para reabilitação facial via prótese de silicone, o dentista deve capturar a área da lesão para que possa realizar o trabalho de escultura da prótese em momento posterior. Esta captura geralmente é feita nos arredores da região da lesão e usa alginato odontológico, substância que se molda ao rosto do paciente e, após alguns minutos, se solidifica. Este passo necessita de um paciente calmo e relaxado, uma vez que quaisquer linhas de expressão presentes no modelo da moldagem serão transferidas para o alginato, podendo comprometer a fidelidade da captura. Após isso, o alginato é retirado e preenchido com gesso odontológico tipo II para a criação da “máscara” ou “modelo” de gesso, que é uma representação fiel da face do paciente em tamanho real. Esta máscara de gesso, mostrada na Figura 2, é a referência para a modelagem da primeira versão da prótese, um modelo feito em cera. O dentista (aqui também chamado de protesista) esculpe sobre a máscara de gesso um modelo que seja esteticamente harmônico com o restante do rosto do paciente, podendo usar fotos, relatos, tendências e até mesmo exames de imagem anteriores para definir parâmetros como o posicionamento, o formato e o tamanho do órgão artificial. Para um aumento de naturalidade, também podem ser adicionadas rugas, marcas, pelos e linhas de expressão, de forma a tentar “esconder” a superfície e as bordas da prótese em meio aos contornos naturais do rosto do paciente.

Modelada a versão em cera, o próximo passo é a transformação desta em um modelo em silicone. Esta fase é protagonizada pela mufla, um aparato odontológico que cria moldes de gesso a partir da cópia física da geometria do objeto a ser moldado. A prótese em cera é colocada na mufla junto a gesso líquido e, após a solidificação do material, é retirada deixando um espaço vazio. Após a secagem do gesso, esse espaço vazio é preenchido com silicone para a fabricação

da prótese final. Tendo acesso ao primeiro modelo em silicone, o protesista chama o paciente ao consultório para uma primeira avaliação da prótese no rosto. São avaliados itens como o conforto do modelo, adequação da forma e a funcionalidade da prótese. Caso algum ponto negativo seja identificado pelo paciente, são feitas modificações no modelo em cera e a mufla deve ser refeita.

Figura 2 - Máscara de gesso para caso de prótese nasal



Fonte: Autoria própria

Após os retoques finais, é feita a caracterização da prótese, adicionando-se tons de pele, sombras, pelos, veias e outros recursos estéticos para que o modelo fique o mais parecido possível com o rosto do paciente. Esta fase pode ou não ser feita com a presença do paciente e é uma das partes mais artesanais do método. Para próteses óculo-palpebrais, ainda é confeccionado um olho em resina acrílica, tendo como base a anatomia contralateral do paciente. A fixação final da prótese geralmente se dá por líquidos adesivos biocompatíveis, que aderem o modelo ao rosto, mas permitem sua retirada para higienização sempre que oportuno (geralmente entre um e dois dias, conforme o caso e a rotina do paciente).

2.3 TECNOLOGIAS PARA O AUXÍLIO NA CRIAÇÃO DE PRÓTESES FACIAIS

Algumas tecnologias bem estabelecidas na engenharia podem ter impactos positivos em processos usualmente desempenhados em outras áreas do

conhecimento. Algumas das técnicas do ramo, que podem ajudar na produção de próteses faciais, nominalmente a digitalização de objetos, a modelagem 3D e a manufatura aditiva, são apresentadas neste capítulo.

2.3.1 Digitalização de objetos

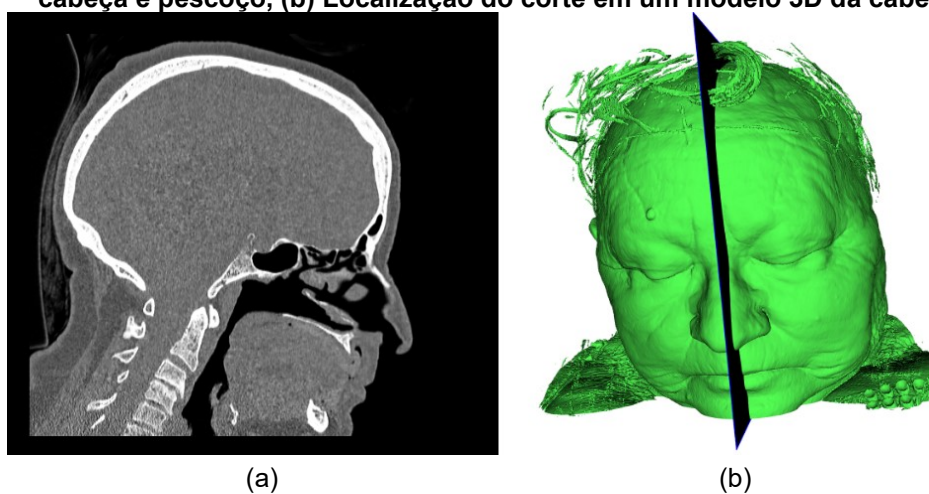
Para converter atividades do método manual para o mundo virtual, a primeira ação necessária é digitalizar a geometria da face do paciente para que se possa trabalhar com ela no computador. Este requisito pode ser cumprido de três principais maneiras, cujo resultado é uma superfície virtual 3D: a conversão de arquivos de exames médicos por imagem, a digitalização a laser da máscara de gesso e a captura da face via fotografias.

A Tomografia Computadorizada (TC) é um exame médico usado para produzir imagens seccionais transversais do corpo do paciente (BUSHONG, 2010). O equipamento, chamado tomógrafo, emite feixes de raios-X que atravessam o corpo em intervalos definidos de distância. Estes feixes são atenuados de maneira diferente dependendo de qual elemento anatômico atravessam (como pele, ossos, água e ar) e são lidos por sensores que registram esta atenuação. Para cada intervalo de distância, o algoritmo do tomógrafo compila estes registros e produz um “corte”, que pode ser interpretado como uma imagem de seção de um local específico do corpo (Figura 3).

A imagem presente em cada corte da TC é composta por pixels em tons de cinza, com a intensidade do brilho de cada pixel representando a densidade daquele ponto específico do corte. Elementos anatômicos mais densos, como ossos e cartilagens, aparecem mais claros no corte, enquanto os menos densos, a exemplo da pele, aparecem em tons mais escuros de cinza.

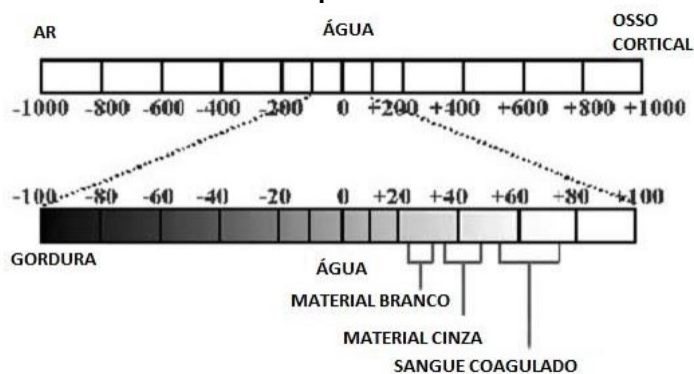
A intensidade do brilho dos pixels pode ser medida em Unidades de Hounsfield (do inglês, *Hounsfield Units*, HU), em homenagem ao engenheiro eletricitista britânico, ganhador do Prêmio Nobel de Física de 1979, Godfrey Hounsfield, um dos inventores da tomografia computadorizada. A escala Hounsfield (Figura 4) é normalizada na densidade da água (0 HU) e apresenta valores negativos para estruturas menos densas (com o ar representando -1000 HU) e valores positivos para as mais densas (como o osso cortical denso, a +1000 HU).

Figura 3 - Tomografia Computadorizada: (a) Corte representando um corte sagital da região de cabeça e pescoço, (b) Localização do corte em um modelo 3D da cabeça



Fonte: Autoria própria

Figura 4 - Escala de Hounsfield para estruturas anatômicas comuns

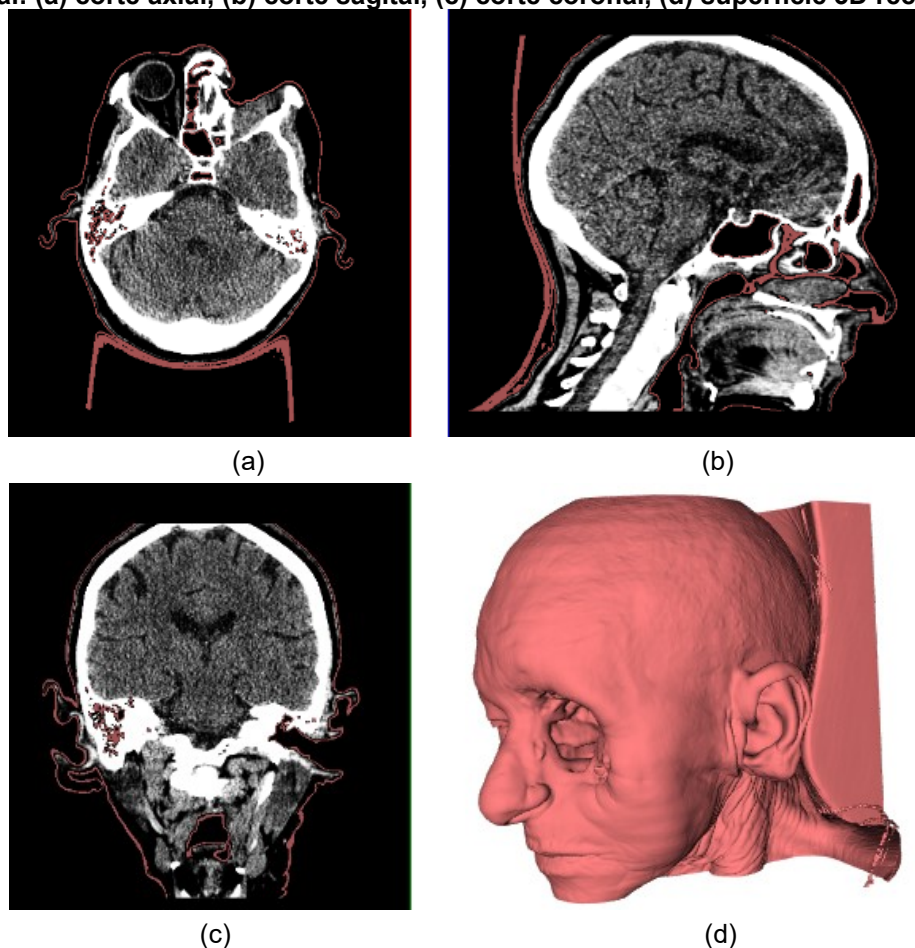


Fonte: Lopes (2016)

Para transformar os cortes da TC em superfícies 3D é necessário um programa de reconstrução tridimensional de estruturas anatômicas como o InVesalius (CTI, 2021). Esta classe de programas usa arquivos no padrão DICOM gerados pelo tomógrafo e os interpola segundo critérios específicos para a criação de uma superfície 3D. Um destes critérios é a faixa de HU de interesse, que permite ao usuário definir quais anatomias são reconstruídas baseado em sua densidade. Assim, o programa alinha os cortes sequencialmente, encontra em cada corte as regiões com a densidade desejada e interpola o contorno destas regiões ao longo de todos os cortes. O resultado é uma superfície 3D, com precisão médica e escala real, que contém apenas as anatomias de interesse. Na Figura 5, observam-se os

contornos em vermelho nas imagens de TC, que indicam as regiões que apresentam os valores de HU característicos do tecido epitelial do paciente.

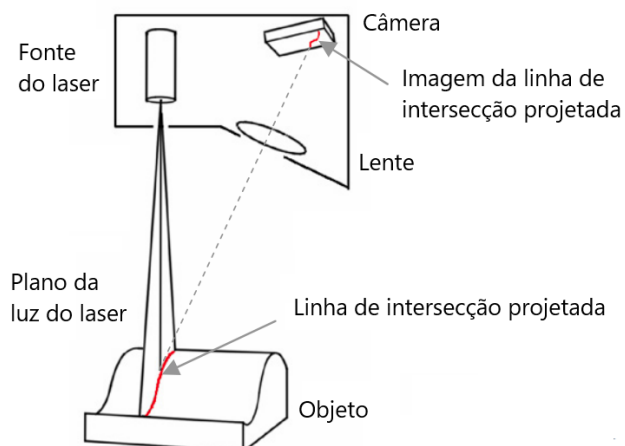
Figura 5 - Reconstrução 3D baseada nos arquivos de TC para um caso de prótese óculo-palpebral: (a) corte axial, (b) corte sagital, (c) corte coronal, (d) superfície 3D reconstruída



Fonte: Autoria própria

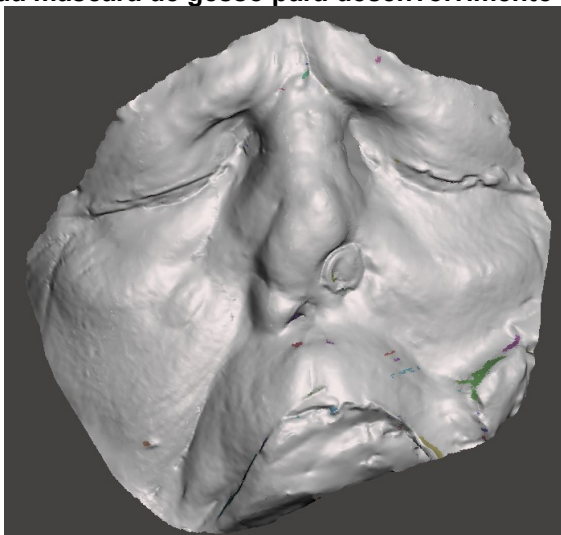
Outra tecnologia estabelecida é o escaneamento a laser, onde um dispositivo dotado de um emissor de laser e uma câmera emite um feixe de luz que é deformado pelo objeto de interesse (VAN GESTEL *et al.*, 2009). A câmera do dispositivo captura a deformação da luz do laser e a converte em uma nuvem de pontos, que são interpolados para a criação de uma superfície 3D virtual (Figura 6). A Figura 7 mostra a digitalização da máscara de gesso confeccionada para desenvolvimento de caso de prótese nasal apresentada anteriormente na Figura 2.

Figura 6 - Digitalização a laser de objetos



Fonte: adaptado de Van Gestel *et al.* (2009)

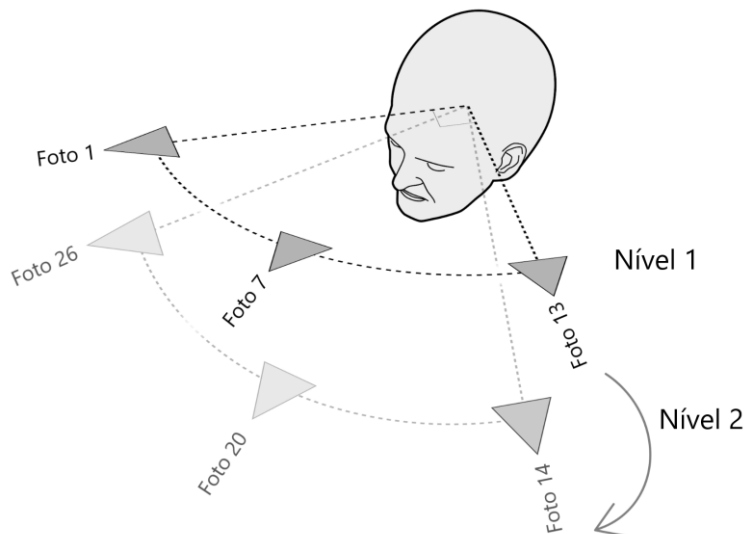
Figura 7 - Digitalização da máscara de gesso para desenvolvimento de caso de prótese nasal



Fonte: Autoria própria

Outra tecnologia que permite a aquisição virtual de superfícies físicas é a fotogrametria. Neste método, fotos de múltiplos ângulos de um mesmo objeto são capturadas e processadas a fim de gerar uma superfície 3D (LUHMANN *et al.*, 2013). Uma das grandes vantagens deste método é a possibilidade de replicá-lo com facilidade, usando câmeras de celulares, protocolos simples e programas de código aberto para seu processamento (MORAES, 2020). A Figura 8 ilustra um método de fotogrametria de fácil realização, baseado em 26 fotos tiradas em dois níveis de altura, primeiro ao nível dos olhos e depois a aproximadamente 15° de angulação. O objetivo é capturar todos os detalhes do rosto necessários para a reconstrução pelo algoritmo de fotogrametria.

Figura 8 - Exemplo de protocolo para fotogrametria com 26 fotos



Fonte: Adaptado de Moraes (2020)

2.3.2 Modelagem 3D

Para que se possa corrigir e utilizar os biomodelos adquiridos a partir das técnicas de digitalização expostas, são necessárias as definições e as práticas da modelagem virtual 3D. São introduzidos nesta seção dois tipos de processamento virtual de modelos tridimensionais: a modelagem baseada em malhas e a modelagem baseada em corpos sólidos.

A modelagem baseada em malhas é o primeiro processamento ao qual os modelos digitalizados são expostos. Uma malha é uma aproximação de uma superfície complexa 3D utilizando polígonos simples, como triângulos (BERN; PLASSMANN, 1999). Sendo assim, a modelagem baseada em malhas trabalha modificando, adicionando ou retirando triângulos destes modelos. Todos os métodos de digitalização descritos na seção 2.3.1 geram malhas tridimensionais ao final de seu processamento. Estas malhas são exportadas em formatos de arquivos baseados em triângulos, como o STL (do inglês *STereoLithography*), e carregadas em programas de edição de malhas como o Meshmixer (AUTODESK, 2021) ou o Blender (BLENDER FOUNDATION, 2021).

Já a modelagem baseada em corpos sólidos é usada caso seja necessário um processamento mais exato e rigoroso dos arquivos 3D. Nesta técnica de modelagem são usados programas de Projeto Auxiliado por Computador (do inglês

Computer-Aided Design, CAD), que são ferramentas especializadas, de base matemática, que atuam na criação e edição de modelos tridimensionais (BRYDEN, 2014). Programas CAD que utilizam parâmetros para a definição dos modelos sólidos que produzem, como o SolidWorks (DASSAULT SYSTÈMES, 2021), são chamados paramétricos e focam em modificar arquivos 3D de forma intuitiva e padronizada.

2.3.3 Impressão 3D

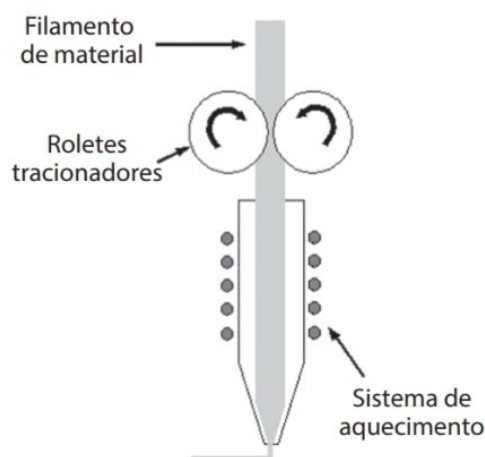
Para que um modelo virtual tome forma física, é necessário o uso de algum método produtivo parametrizado que reproduza o modelo a partir de uma matéria-prima. A manufatura aditiva é um método de fabricação baseado na adição de material em camadas seguindo um modelo 3D da peça de interesse (VOLPATO; CARVALHO, 2017). No campo da tecnologia assistiva, ela representa uma solução muito adequada para a produção de biomodelos por causa da complexidade destes, principalmente quando se considera outros processos de fabricação comuns, como a usinagem, por exemplo.

Dentre as formas possíveis de manufatura aditiva, o processo por extrusão de filamentos de plástico é o método de impressão 3D mais utilizado no mundo (STATISTA, 2020). Seu funcionamento básico consiste em fundir e depositar um filamento de plástico em locais específicos da mesa de impressão de forma a construir uma “camada” (Figura 9). Ao final de uma camada, a máquina faz um incremento na altura do bico de impressão (ou um decremento na sua plataforma de impressão) e inicia a impressão da próxima camada. A sucessão destas deposições resulta na criação da peça de interesse.

A área médica tem se apresentado um campo muito prolífico para a aplicação da manufatura aditiva, principalmente para aplicações onde a peça produzida deve ser personalizada, barata e rápida de se produzir (VENTOLA, 2014). Exemplos de aplicações recentes são a fabricação de modelos paciente-específicos para planejamento de cirurgias (WAKE *et al.*, 2019) e a impressão de dispositivos implantáveis para reconstrução craniana (OLADAPO *et al.*, 2020). A crise sanitária mundial proporcionada pelo Coronavírus também trouxe várias oportunidades para o uso da impressão 3D. A súbita necessidade por peças e dispositivos médicos de

fabricação rápida e de geometria complexa, como escudos faciais e peças para respiradores, por exemplo, evidenciaram a impressão 3D como uma ferramenta importante para a resposta rápida no combate à pandemia (CHOONG *et al.*, 2020).

Figura 9 - Princípio de funcionamento da manufatura aditiva por extrusão de material com alimentação por filamento



Fonte: Adaptado de Volpato (2017)

Um dos materiais usados na impressão por extrusão de material de maior utilidade para o ramo da tecnologia assistiva é o polímero Ácido Polilático (do inglês, *Polylactic Acid*, PLA). Além de ser um dos filamentos plásticos mais baratos e fáceis de processar, o PLA é extraído de fontes naturais (PAWAR *et al.*, 2014), tendo como suas principais fontes a cana-de açúcar e o milho. Por sua origem vegetal, o PLA vem sendo usado em aplicações médicas há mais de 40 anos e acumula características interessantes para a área, como a biocompatibilidade, a biodegradabilidade e a absorção biológica (PAWAR *et al.*, 2014, SANTANA *et al.*, 2018). Porém, sua distribuição em filamentos para impressão 3D pode conter substâncias tóxicas, principalmente as usadas para conferir cor e propriedades mecânicas adicionais (OBUDHO, 2020). Desse modo, é recomendável o uso de filamentos de PLA Natural, variante sem adição de corantes ou outras substâncias. Além disso, a adoção de uma máquina dedicada para este material evita a contaminação cruzada entre filamentos, garantindo assim a biocompatibilidade da peça produzida.

2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O REFERENCIAL TEÓRICO

A oportunidade de intervenção descrita neste trabalho foi identificada a partir da apresentação e da compreensão de todas as fases do fluxo manual de confecção de próteses faciais. Confrontando este conhecimento com o estado da arte das tecnologias disponíveis hoje no campo da saúde e da engenharia, alguns paralelos foram facilmente traçados, como mostram os exemplos do Quadro 1.

Quadro 1 – Analogias entre o método artesanal de confecção de próteses faciais e o fluxo virtual proposto por este trabalho.

Método Artesanal	Fluxo Virtual
Aquisição da geometria facial utilizando alginato e gesso	Digitalização de superfícies usando <i>scanners</i> ou exames de imagem
Escultura manual das próteses	Modelagem de superfícies virtuais formadas por malhas
Confecção da mufla da prótese utilizando uma versão desta em cera	Confecção dos moldes virtuais utilizando como base o arquivo da prótese virtual
Fabricação de uma mufla personalizada para cada caso	Impressão 3D de moldes personalizados para cada caso
Uso de muflas de gesso para moldar a peça de silicone	Uso de moldes impressos para fabricação de peças em silicone

Fonte: Autoria própria

Estas analogias foram a base para a ideia da conversão de ações físicas em passos virtuais que gerassem o mesmo resultado com a mesma qualidade. Assim, foi montado o fluxo virtual de confecção de próteses faciais de silicone, totalmente baseado no método artesanal, porém lançando mão de recursos não antes utilizados para esta aplicação, que será exposto em mais detalhes na seção a seguir.

3 METODOLOGIA

A execução deste trabalho se deu em duas fases bem definidas, dividindo-o em uma parte teórica e uma prática. Destas, a Fase 1 teve como principal foco a apresentação teórica do fluxo de trabalho virtual para confecção de próteses faciais desenvolvido no NUFER, e foi organizada como mostra o Quadro 2. Tal fluxo foi apresentado pela primeira vez no XXV Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica (SICITE) da UTFPR (FRANCO; FOGGIATTO; BARCZYSZYN, 2020) e posteriormente no III Congresso Brasileiro de Tecnologia Assistiva (FRANCO; BARCZYSZYN; FOGGIATTO, 2021).

Quadro 2 – Atividades desenvolvidas na Fase 1

Atividade		Responsável
Descrição detalhada do fluxo virtual de confecção de próteses faciais	Aquisição da Geometria Facial	Autor
	Análise do Caso	
	Modelagem da Prótese	
	Confecção dos Moldes	
	Fabricação da Prótese em Silicone	
Descrição dos estudos submetidos ao CEP	Descrição dos estudos	
	Apresentação dos desenhos e metodologias dos estudos	

Fonte: Autoria própria

Na seção 3.1 do presente trabalho, é explicado o método usando diagramas que retratam sua operação. Também nesta seção, estão presentes os desenhos e os resultados dos estudos submetidos ao CEP que permitiram à equipe do NUFER utilizar imagens médicas de pacientes com deformidades faciais para validar teoricamente e clinicamente o método.

A Fase 2, detalhada no Quadro 3, foi centrada na validação clínica do método em três casos reais de deformação facial. O método é explicado na prática a partir da seção 3.2, usando um estudo de caso de prótese nasal, desde a aquisição da geometria do paciente, passando pela modelagem virtual da prótese e dos moldes, até a obtenção da prótese em silicone. Após o estudo de caso, os detalhes da confecção de próteses para outros órgãos faciais (orelha e olho) são também apresentados.

Quadro 3 – Atividades desenvolvidas na Fase 2

Atividade	Responsável
Escrita do projeto a ser submetido ao Comitê de Ética em Pesquisa, focado na implantação das próteses	Autor
Seleção dos pacientes para estudo de caso	Protesista
Coleta das imagens de Tomografia Computadorizada (TC) ou Ressonância Magnética (RM)	
Modelagem virtual das próteses	Autor
Modelagem, fabricação e acabamento dos moldes impressos	
Teste dos moldes com silicone biocompatível	
Envio dos moldes para o protesista responsável pelo caso	
Moldagem e caracterização das peças de silicone	Protesista
Implantação e primeira avaliação do paciente	
Ajustes no modelo, caso necessário	Autor
Coleta do feedback final da protesista	
Organização dos dados e redação da conclusão do trabalho	

Fonte: Autoria própria

Como esta fase envolve a participação de pacientes, foram utilizados os dados obtidos através dos projetos ao Comitê de Ética apresentados na Fase 1, para a validação formal da implantação das próteses confeccionadas virtualmente. Esta ação garantiu que a pesquisa se desenvolvesse de modo seguro e responsável, e que os resultados obtidos pudessem ser publicados oficialmente. Para o desenvolvimento deste projeto, algumas das atividades de caráter médico foram realizadas pela protesista que acompanhou o trabalho, dado que esta possui habilitação para ter contato com os pacientes e realizar a implantação das próteses.

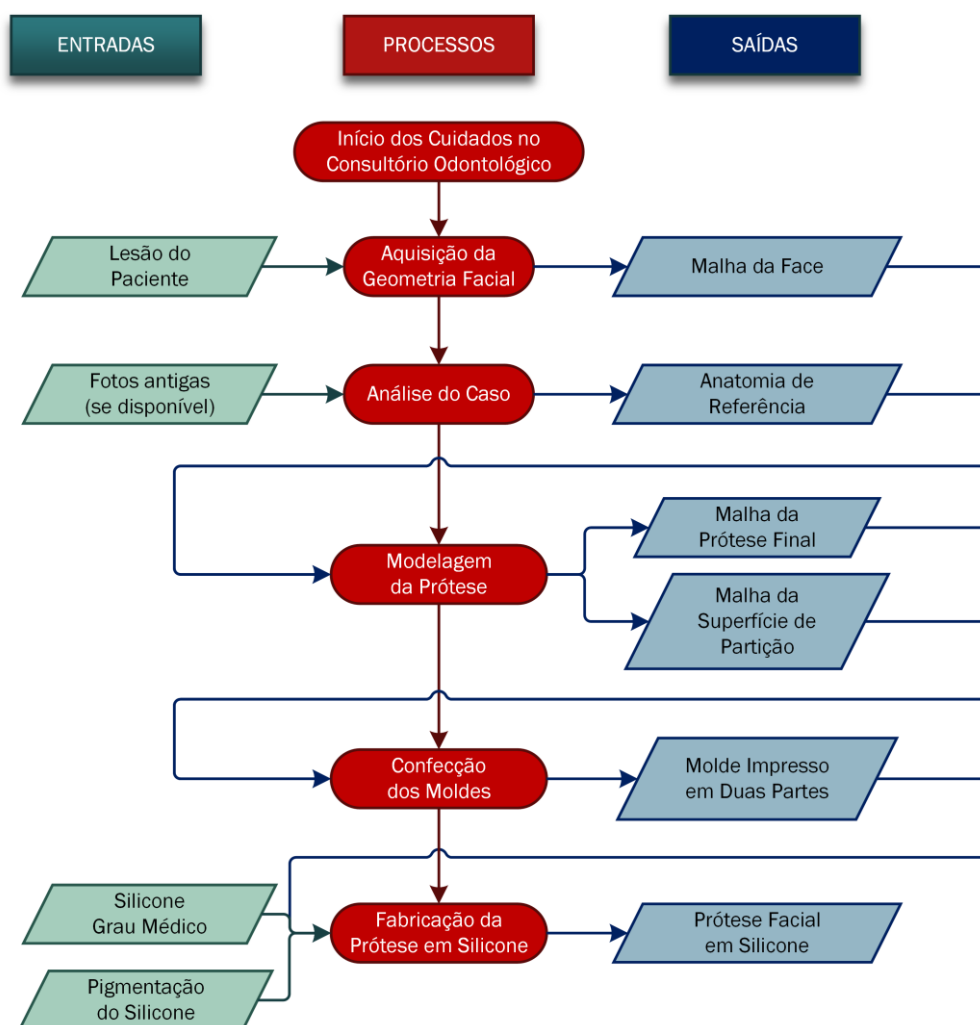
3.1 FASE 1 – ABORDAGEM TEÓRICA DO MÉTODO

Esta primeira fase do desenvolvimento é centrada na apresentação teórica do fluxo virtual de confecção de próteses faciais desenvolvido no NUFER desde fevereiro de 2019. São apresentados diagramas detalhados das partes do método, com comentários sobre suas entradas e saídas em cada parte. Para que fosse possível testar este método teórico em casos reais, foram submetidos dois projetos ao Comitê de Ética em Pesquisa do Hospital Angelina Caron para a aquisição de dados de pacientes com deformações faciais por ressecção de câncer.

3.1.1 Apresentação teórica do método

O método de modelagem virtual de próteses faciais é subdividido em cinco partes principais: a aquisição da geometria facial do paciente, a análise do caso, a modelagem da prótese, a modelagem e fabricação dos moldes que dão a ela sua forma física, e a fabricação das próteses em silicone utilizando os moldes. O fluxograma do método de modelagem virtual de próteses faciais é mostrado na Figura 10 e cada um dos tópicos elencados tem sua explicação detalhada nas seções 3.1.1.1 a 3.1.1.5.

Figura 10 - Fluxograma do método virtual proposto para confecção de próteses faciais

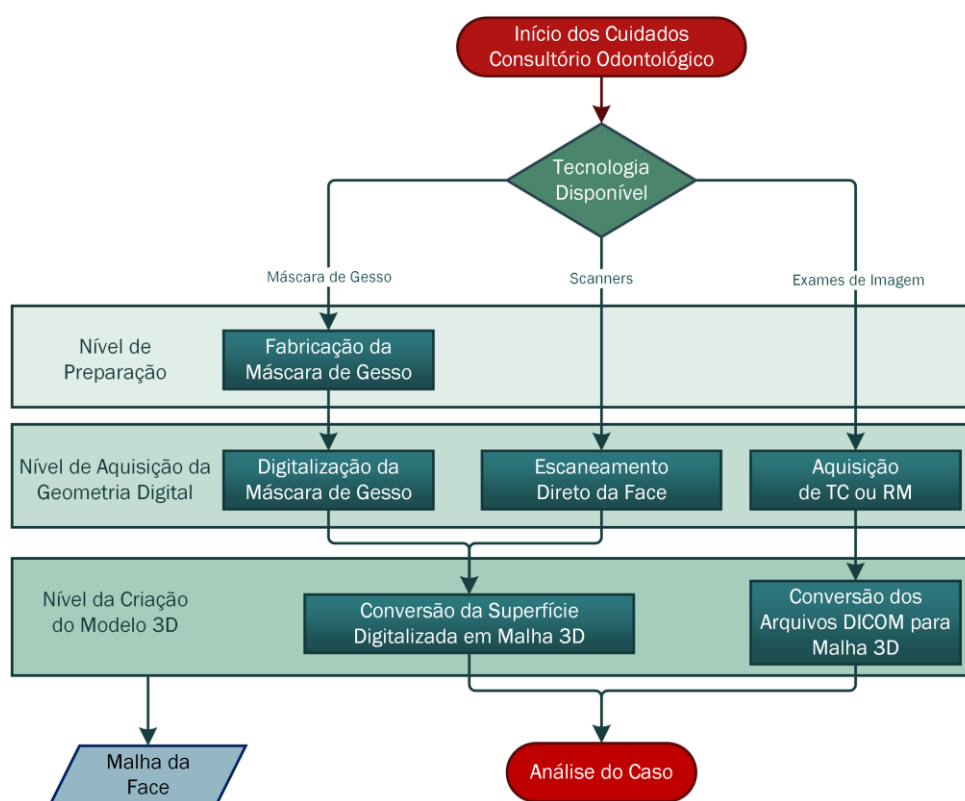


Fonte: Autoria própria

3.1.1.1 Aquisição da geometria facial

A primeira parte do método envolve conseguir capturar a face do paciente de maneira digital, para que possa ser trabalhada usando as ferramentas digitais disponíveis (previamente elencadas na seção 2.3.1). A principal saída desta seção é a malha tridimensional da face, geralmente composta por triângulos, a ser trabalhada posteriormente com os programas de modelagem baseada em malhas. A Figura 11 traz o fluxograma parcial relativo a esta parte do método.

Figura 11 - Fluxograma da parte Aquisição da Geometria Facial



Fonte: Autoria própria

Com o paciente no consultório, o procedimento de aquisição da geometria facial pode se dar de três maneiras, dependendo dos recursos que estiverem à disposição do protesista: fabricação e escaneamento de uma face de gesso, digitalização do rosto por fotogrametria ou o encaminhamento para a realização de exames de imagem da região da cabeça e pescoço (caso o paciente ainda não tenha). Independentemente do caminho escolhido, as atividades similares entre eles

podem agrupar-se em três níveis: a preparação prévia (caso necessário), a aquisição da geometria digital, e a criação do modelo 3D com os dados adquiridos.

O primeiro caminho, usando a máscara de gesso, é o mais conhecido pelos dentistas que fazem próteses manualmente, sendo parte da prática clínica. A máscara funciona como um registro temporal e analógico da lesão do paciente, moldando-se alginato odontológico na superfície de seu rosto e posteriormente adicionando-se gesso para a criação de uma peça rígida, robusta e durável. No fluxo manual de confecção de próteses faciais, tendo-se a máscara de gesso, o protesista faria a modelagem de uma prótese de cera sobre a máscara. Porém, como o fluxo proposto trabalha apenas com arquivos virtuais, esta máscara deve ser digitalizada. A digitalização pode ocorrer por inúmeros métodos, como por laser ou por luz estruturada, e a maioria dos aparelhos digitalizadores possuem seus próprios programas para a transformação dos dados adquiridos em uma malha tridimensional representativa daquela máscara.

A segunda opção, ainda acessível a quase todos os protesistas, é o uso da digitalização a partir de fotos para aquisição da geometria do rosto. As fotos necessárias para o funcionamento dos algoritmos desta técnica podem ser obtidas com um celular comum, embora existam muitas recomendações de como essas capturas podem ser feitas para que o sucesso da operação seja garantido (MORAES, 2020). Exemplos destas recomendações englobam usar sempre uma câmera com foco fixo no rosto do paciente, estar em uma região bem iluminada e seguir protocolos padronizados de captura, com múltiplos ângulos e, pelo menos, duas alturas da câmera em relação ao rosto. A digitalização por fotos em regiões com baixa luminosidade ou mesmo a falta de perícia dos profissionais em seguir os protocolos de captura, podem tornar esse método difícil para se conseguir resultados precisos, embora a maioria dos problemas possa ser resolvida seguindo-se corretamente as recomendações. A partir das capturas corretas do rosto dos pacientes, pode-se usar programas como o OrtoGOnBlender para a reconstrução da malha tridimensional do rosto contido nas imagens.

A forma mais precisa de digitalização atualmente é a aquisição da geometria facial do paciente via exames médicos de imagem. Embora seja a tecnologia mais cara e menos acessível das três apresentadas, é a que mais apresenta confiabilidade para a operação. Uma vez que as imagens médicas de Tomografia Computadorizada e Ressonância Magnética são usadas para diagnóstico clínico,

sua captura é milimetricamente precisa e seus aparelhos são constantemente validados e auditados para que mantenham esta precisão. O escaneamento do paciente é realizado levando em conta a superfície de interesse e a resolução desejada (geralmente cortes de 1 mm ou menos, para grande fidelidade na operação). Ao final, tem-se arquivos DICOM da cabeça inteira, que podem ser transferidos a um programa, como o InVesalius, para a reconstrução das informações em três dimensões e criação da malha da região de estudo.

3.1.1.2 Análise do caso

Tendo a face do paciente reconstruída tridimensionalmente no computador, é possível analisar as possíveis abordagens para a confecção de sua prótese facial de silicone. Em conjunto com o profissional de saúde que acompanha o caso, são feitas as definições necessárias para o trabalho virtual à distância. Nessa fase, é recomendável ter o maior número possível de informações do paciente, para que sua prótese tenha grande sucesso em termos de funcionalidade e harmonia com a face. Como resultado desta seção, obtém-se a anatomia de referência para a modelagem da prótese facial. Esta parte do fluxo é mostrado na Figura 12.

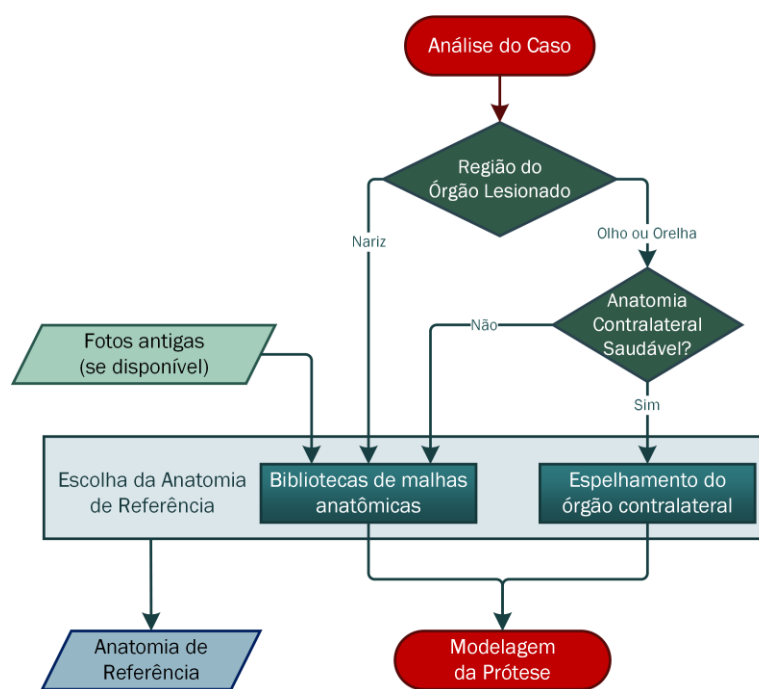
Um grande fator que influencia todo o trabalho a partir deste ponto é a localização do órgão comprometido. Lesões nas regiões auricular e ocular, especialmente quando causadas por ressecção de câncer de pele, geralmente ocorrem em apenas um lado do rosto, mantendo o órgão contralateral saudável. Isso permite que a base da futura prótese facial seja referenciada na anatomia do próprio paciente, aumentando a simetria e a harmonia facial resultante.

Já para lesões nasais, que ocorrem em um órgão que é único na face, não é possível ter essa referência espelhada. Nesses casos, se faz necessário o uso de uma anatomia externa como base da prótese, a mais parecida possível com o órgão antigo do paciente, ou que melhor se adeque ao rosto mutilado. Esta anatomia externa pode ser obtida de diversas formas, usando na maioria das vezes as tecnologias descritas na seção 3.1.1.1.

Caso não seja possível capturar anatomias para este uso, existem na internet bancos de dados anatômicos como o Embodi3d (EMBODI3D, 2021), de onde é possível selecionar imagens DICOM ou até mesmo malhas já reconstruídas

para o uso em aplicações médicas. Usando arquivos desse banco de dados, paciente, protesista e modelador virtual selecionam em conjunto um modelo de nariz que seja tecnicamente e clinicamente viável para a construção da prótese do paciente. Detalhes pessoais como idade, sexo, etnia, fenótipo e outras características faciais são levados em conta, bem como fotos antigas e linhas de expressão do paciente.

Figura 12 - Fluxograma da etapa Análise do Caso

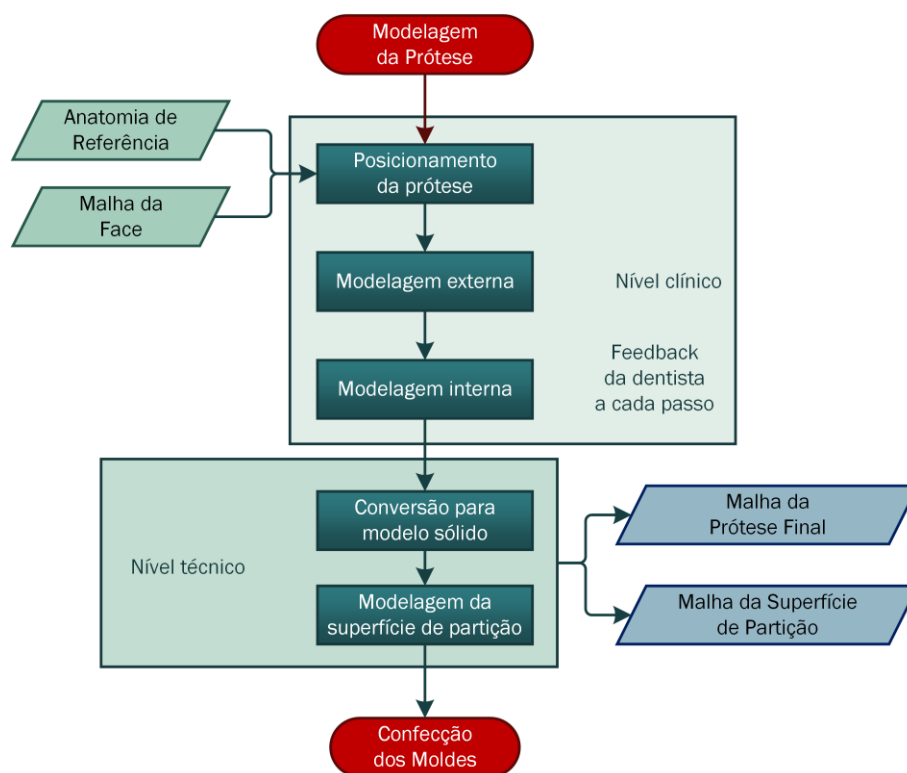


Fonte: Autoria própria

3.1.1.3 Modelagem da prótese

A principal fase do fluxo digital é a modelagem virtual da prótese facial. Ela se divide entre o nível clínico e o nível técnico, onde no primeiro é modelada a parte funcional e estética da prótese e é necessário sempre o *feedback* do protesista para aprovar o trabalho, e no segundo são tomadas ações que focam na viabilização da fabricação do modelo. Ao fim desta fase, as malhas da prótese e da superfície de partição dos moldes estão prontas e podem ser desenvolvidos os moldes que produzem fisicamente a prótese em silicone. Essas ações são organizadas visualmente na Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma da etapa Modelagem da Prótese



Fonte: Autoria própria

O início da parte clínica da modelagem é o posicionamento do modelo de referência no modelo do rosto do paciente. Este fator conta muito para o impacto estético da prótese, então deve-se buscar sempre a posição e angulação que resultem numa boa harmonização facial. A principal fonte de referências para o posicionamento da prótese são as linhas faciais, principalmente na região das fossas oculares, boca, sobrancelhas, e quaisquer outras anatomias presentes tanto na malha da prótese quanto no rosto do paciente. Alinhar estas anatomias nas duas malhas gera um bom ponto de partida para a escolha da localização, protrusão, espessura e angulação da peça de silicone.

Outro fator importante a ser destacado é que a lesão que origina a necessidade da prótese facial não segue um padrão de aparência definido, pois pode ser devida a traumas ou intervenções cirúrgicas. Nesses casos, os pacientes passam por procedimentos que não focam na parte estética, mas na parte clínica e patológica, onde o sucesso é medido pela reabilitação funcional dos órgãos da face ou da retirada do câncer. Assim, a superfície da lesão pode estar disposta de

maneira aleatória, e o posicionamento da prótese deve levar isso em conta para uma melhor reabilitação facial.

Após posicionar a prótese, é modelada a sua região de transição com o rosto. Esta fase é chamada de modelagem externa e é focada, principalmente, em fazer com que a prótese não seja muito perceptível a olho nu. Isso envolve projetar uma malha que seja bem fina nas bordas, tendendo à tangência com a pele. Também, quando o silicone é pigmentado no final do processo, as regiões finas tendem a ficar mais transparentes, o que ajuda nesse transiente suave entre prótese e rosto. Outro aspecto que pode ser abordado na modelagem externa da prótese é poder customizar a peça para cobrir outras deformidades anatômicas próximas à lesão facial, como cicatrizes e orifícios. Essa decisão estética fica a cargo de um consenso entre protesista e paciente, respeitando os limites da técnica virtual. Ao fim da modelagem externa, o modelo virtual da prótese está quase pronto e o *feedback* do protesista que acompanha o caso é requisitado.

A fase da modelagem interna ocorre em seguida e é onde a prótese cumpre seus requisitos funcionais. Para narizes, são modeladas as narinas e canais nasais, bem como a região do septo nasal. Em orelhas, é desenhado o canal auditivo. Por fim, para próteses óculo-palpebrais, é feito o orifício onde se encaixa o olho que complementa o conjunto. O grande desafio desta parte do método é o mesmo da fase anterior: a variabilidade anatômica dos pacientes após as cirurgias de reconstrução ou ressecção do órgão facial. É muito comum, por exemplo, que as narinas do paciente estejam fora de seu local usual após o procedimento, embora cumpram normalmente sua função de aspirar o ar. Nestes casos, é necessário modelar a prótese nasal de forma que suas narinas, geralmente na posição normal, se conectem às do paciente, evitando a obstrução das vias aéreas.

Em sequência, as malhas da prótese e do rosto são unidas para que formem um único corpo sólido. Até o passo anterior, a malha da prótese e a do rosto são apenas duas superfícies que se interceptam, mas precisam ser transformadas em um corpo sólido para as próximas fases do método. Para realizar esta ação, primeiramente é descartada toda a parte da malha do rosto que não entra em contato com a malha da prótese. Em seguida, são feitas operações de suavização e união na borda das malhas para que resultem em uma peça única e fechada. Esta operação faz com que a parte da prótese que entra em contato com o paciente seja

definida pela própria superfície digitalizada de seu rosto e de sua lesão, gerando um encaixe virtualmente perfeito entre os dois.

Adicionalmente, devido à complexidade da superfície da lesão, é criado naturalmente um encaixe estilo poka-yoke, que possui apenas uma orientação correta possível. Esta característica é muito importante pelo fato de que os pacientes devem retirar sua prótese para higienização diariamente (ou a cada dois dias, dependendo do caso) e depois a recolocar no mesmo lugar. Ao fim da união das malhas, obtém-se a malha tridimensional final da prótese. Como fluxo opcional, é possível fazer a impressão 3D da peça e testá-la diretamente no paciente, se necessário, para validar o resultado do trabalho em tamanho real. Quaisquer correções apontadas pelo profissional de saúde são realizadas e a geometria do modelo da prótese facial é considerada terminada.

3.1.1.4 Confeção dos moldes

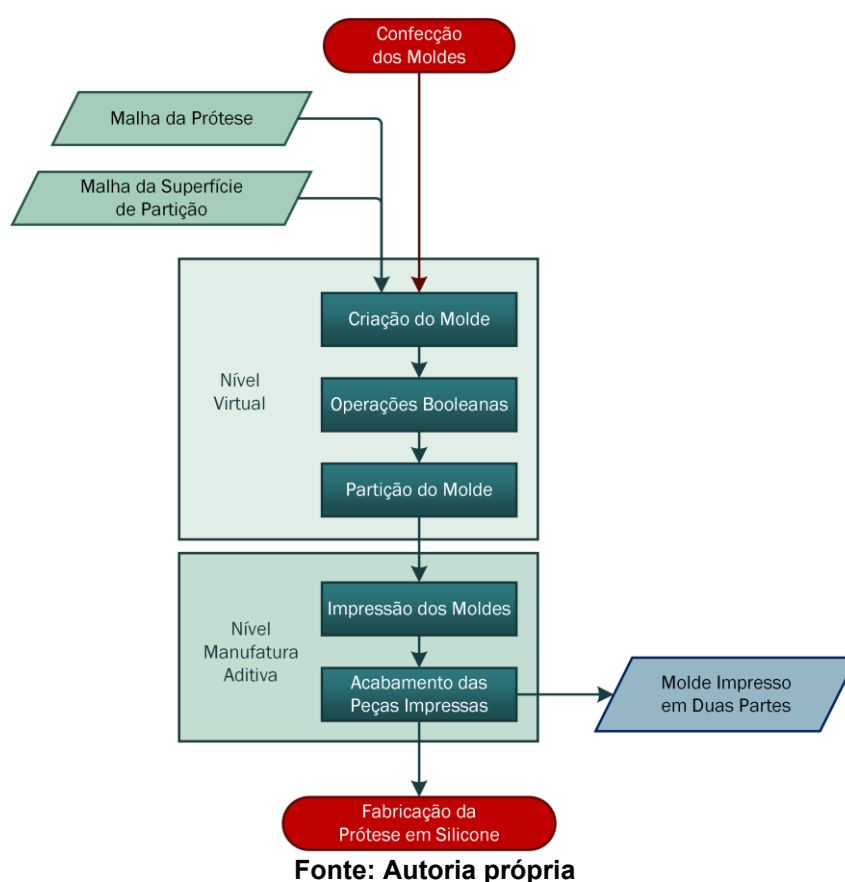
Após modelada, a malha da prótese possui todas as características da peça a ser implantada no paciente, porém ainda é totalmente virtual. Para que seja fabricada fisicamente em silicone, se faz necessário um método que dê forma a este material. A solução escolhida foi a modelagem e a impressão 3D de moldes. O fluxograma da Figura 14 apresenta todas as etapas para essa fase.

Para a modelagem dos moldes, o primeiro passo é a criação da superfície de partição, que o separa em duas partes e permite a extração da peça após a fabricação. Esta superfície pode ser modelada em programas de modelagem parametrizados, como o SolidWorks, ou de modelagem de malhas, como o Meshmixer. A superfície de partição deve ser modelada de modo a atravessar a prótese e gerar uma aba em todo seu redor, seguindo a linha de partição. Isso faz com que o molde seja fabricável e que a linha de partição na peça final seja distribuída pela borda.

A modelagem do molde consiste basicamente de desenhar um bloco ao redor da prótese, grande o suficiente para contê-la. Usando recursos de transparência nos programas de modelagem, é possível ainda realizar cortes neste bloco a fim de reduzir material, ou mesmo personalizá-lo a partir de requisitos do protesista. Alguns profissionais, por exemplo, podem necessitar de um molde com

formato quadrado ou circular, com faces anterior e posterior obrigatoriamente paralelas, caso integrem esta peça em seu fluxo já habitual de confecção de próteses, usando prensas para o fechamento dos moldes e outros aparatos com os quais estão acostumados. Também podem ser modelados nesta etapa recursos de alinhamento e fechamento manual dos moldes, como furos para parafusos que mantém o molde fechado quando em operação.

Figura 14 - Fluxograma da etapa Confecção dos Moldes



Para a criação da cavidade que é preenchida com silicone, é feita uma operação booleana de subtração entre a prótese e o bloco. Isso faz com que seja criado um espaço vazio no bloco, dando origem ao molde que, quando preenchido com silicone, dá forma à prótese. Para o acesso a este espaço vazio, deve-se também modelar um canal de entrada para o silicone, de preferência em uma região pouco visível e perto de uma das bordas da prótese, pois pode ser gerada uma rebarba no formato do canal de entrada que deve ser retrabalhada posteriormente.

A última parte da confecção dos moldes é a sua separação em duas partes. Neste momento, a superfície de partição é carregada e usada como parâmetro de divisão do corpo sólido do molde, gerando dois outros sólidos geralmente chamados de moldes superior e inferior da prótese. Essa operação cria duas peças que se encaixam perfeitamente, uma vez que a superfície de partição é um elemento gráfico que não possui espessura. Na sequência, as duas partes dos moldes são identificadas, as bordas geradas pela superfície de partição são suavizadas e os moldes podem ser considerados prontos.

A materialização dos moldes acontece por manufatura aditiva, uma vez que essa tecnologia permite a fabricação em baixa escala de peças complexas. Os arquivos dos moldes são abertos por um programa de planejamento de processo de impressão 3D, como o Ultimaker Cura ou o Simplify 3D, e os parâmetros de impressão são definidos. Recomenda-se o uso do material PLA Natural para a impressão dos moldes, por suas características de biocompatibilidade e disponibilidade. Após a impressão dos moldes, eventuais estruturas de suporte devem ser retiradas e outros defeitos inerentes do processo de impressão devem ser corrigidos, geralmente utilizando alicates de corte ou lixas finas. O resultado deve ser um par de moldes impressos que se encaixem corretamente e não deixem espaços significantes quando unidos. Após a finalização de seu acabamento, os moldes são enviados ao protesista, que os utiliza para a criação da prótese facial do paciente.

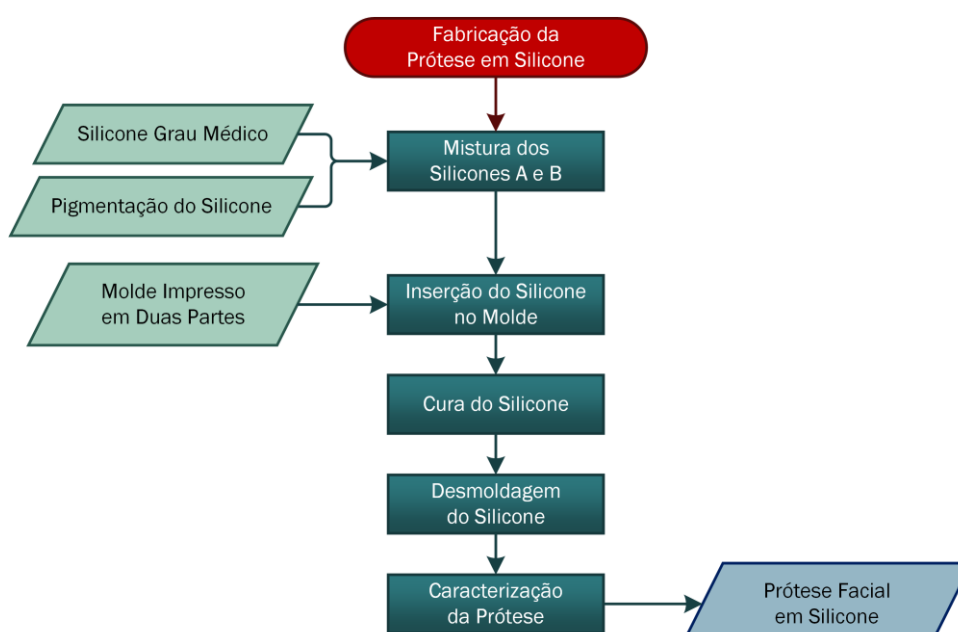
3.1.1.5 Fabricação da prótese em silicone

De posse do par de moldes que gera a prótese, o protesista usa silicone líquido biocompatível para produzir a peça. As imagens deste processo são exibidas no Capítulo 5, acompanhando os estudos de caso expostos. Nesta etapa, os moldes são usados no lugar da mufla de gesso, que é parte do fluxo manual de confecção de próteses faciais. Isso facilita a adaptação dos protesistas ao método aqui exposto, uma vez que recebem um dispositivo que podem usar de maneira análoga a outro que já conhecem. Geralmente os silicones de grau-médico utilizados para confecção das próteses são formados de partes A e B, e seu preparo deve ocorrer

peelo método descrito a seguir. A Figura 15 mostra todo o fluxo de preparação e operação com o silicone.

Para a manipulação do silicone, devem ser reservadas três seringas identificadas, um recipiente e um aparato de mistura, e as substâncias utilizadas para a pigmentação da prótese. As três unidades de seringas são destinadas às duas partes do silicone e à mistura destas, para que as partes não entrem em contato (e por consequência, iniciem o processo de cura) antes do tempo correto.

Figura 15 - Fluxograma da etapa Fabricação da Prótese em Silicone



Fonte: Autoria própria

Iniciando-se os trabalhos, devem ser coletadas, com as seringas, quantidades iguais das partes A e B do silicone. Como a prótese é modelada virtualmente, é possível calcular seu volume diretamente dos programas de modelagem, ajudando a definir com precisão a quantidade de silicone a ser utilizada. Para facilitar a operação e incluir eventuais perdas do processo, é recomendado superestimar em aproximadamente 25% a quantidade da matéria-prima. Após a coleta, posicionar as seringas na vertical, com o bico para cima, para que eventuais bolhas de ar possam fluir pelo silicone e subir em direção ao bico, facilitando sua retirada.

Com as seringas de silicone reservadas, as substâncias de pigmentação devem ser colocadas no recipiente da mistura. Podem ser usados quaisquer

pigmentos biocompatíveis, como pó para maquiagem ou substâncias naturais e artificiais. Esta etapa se chama pigmentação intrínseca, onde todo o silicone fabricado é pigmentado com o objetivo de ficar o mais próximo possível da coloração do rosto do paciente.

O próximo passo é colocar o silicone das seringas A e B no recipiente com o pigmento e misturar toda a massa até que assuma um aspecto uniforme. No momento em que as partes A e B entrarem em contato, o silicone inicia seu processo de cura. Assim, recomenda-se utilizar silicones com tempo de trabalho não muito curto, para que seja possível misturá-lo com o pigmento e inseri-lo no molde ainda líquido.

Assim que a homogeneização do silicone seja atingida, ele deve ser coletado com a seringa da mistura, tomando-se os mesmos cuidados com bolhas de ar citados anteriormente. A partir deste ponto, a inserção do silicone nos moldes pode ser realizada pela técnica com a qual o protesista mais se adaptar. Uma das técnicas prevê a inserção do silicone diretamente na cavidade, com os moldes abertos, enquanto outra técnica utiliza os moldes fechados e o silicone é introduzido com a seringa, pelo canal presente no molde. Caso a segunda técnica seja seguida, recomenda-se posicionar o molde de forma que o canal de introdução esteja na parte mais baixa e avançar o êmbolo da seringa com velocidade constante. Isso obriga que o silicone preencha a cavidade de baixo para cima, de maneira contínua, empurrando assim o ar para fora do molde e evitando a criação de bolhas na peça. Ao fim do processo, é possível ver o silicone ser expulso pelas bordas do molde, indicando que a cavidade interna está completamente preenchida

Após a inserção, deve-se reservar os moldes para que a cura do silicone aconteça. Uma última dica quanto à inibição de bolhas diz respeito a posicionar o molde com o canal de admissão para cima, para que eventuais bolhas fluam para esta parte e não comprometam a geometria da peça. A cura do silicone tem duração muito variável conforme a matéria-prima utilizada. Recomenda-se utilizar silicones de Cura à Temperatura Ambiente (do inglês *room-temperature vulcanization*, RTV). Do contrário, silicones que são curados com auxílio de temperatura geralmente necessitam de um ambiente climatizado a uma temperatura maior que a de transição vítrea do PLA dos moldes (aproximadamente 50°C a 55°C), o que pode causar deformações no molde e, conseqüentemente, alterar o resultado final.

O tempo de cura do silicone pode ser medido ao verificar se o material que sobrou na seringa ou no recipiente da mistura está curado. Ao curar, o silicone perde seu aspecto líquido e adquire características similares às da borracha, não sendo pegajoso ao toque. Após o tempo de cura, o molde pode ser aberto para a retirada da peça. Como o ar foi retirado do molde no momento da inserção do silicone, é comum que a abertura seja difícil, por vezes necessitando que seja inserido algum objeto fino e plano na linha de partição dos moldes.

Assim que o molde é aberto, é possível retirar a prótese facial, que está praticamente pronta com rebarbas de silicone ao seu redor. Esta rebarba, a depender do protesista, pode ser descartada ou utilizada para melhorar a transição entre a prótese e a pele, uma vez que se trata de uma superfície muito fina e quase transparente. Também pode ser utilizada como superfície para a colagem, aumentando a aderência da prótese ao rosto do paciente.

A última etapa é a caracterização extrínseca da prótese, definida pelo acabamento estético da peça e aumentando sua naturalidade e harmonia com a região ao seu redor. São adicionadas veias, cílios, pelos, pintas, sombras e vários outros detalhes anatômicos importantes para a aparência final da prótese, geralmente já com o paciente no consultório para a validação do procedimento. A implantação, por fim, é realizada utilizando-se colas biocompatíveis (como as usadas para fixação de perucas, por exemplo), finalizando assim o procedimento de reabilitação facial por prótese de silicone modelada virtualmente.

3.1.2 Primeiro projeto ao comitê de ética em pesquisa

Todo o fluxo mostrado na seção 3.1.1 foi idealizado e formulado em laboratório no Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental (NUFER) da UTFPR Campus Curitiba, Sede Ecoville, a partir da identificação da necessidade dos protesistas terem um fluxo mais virtual e menos manual para a confecção das próteses faciais de silicone. O método foi então desenvolvido utilizando arquivos disponibilizados em bancos de anatomias da internet e disponíveis para pesquisa. Para sua validação em casos reais, foi necessária a aprovação de um projeto junto a um Comitê de Ética em Pesquisa (CEP), para que pudessem ser utilizados dados reais de pacientes e, posteriormente, divulgados legalmente os resultados do

estudo. Esse ponto do desenvolvimento foi planejado para dar robustez ao método, testando-o e melhorando-o em casos representativos de lesão facial.

O projeto foi então dividido em duas submissões ao CEP, uma focada na parte teórica do fluxo e outra na parte prática. Essa divisão foi feita para criar uma fase “*in vitro*” da validação do método e outra “*in vivo*”, podendo-se assim praticar a modelagem e as ações do fluxo virtual na primeira parte, melhorá-lo, corrigi-lo, e em seguida aplicá-lo no tratamento de reabilitação facial dos pacientes para a validação clínica definitiva. A instituição escolhida para a execução do estudo foi o Hospital Angelina Caron, situado na região metropolitana de Curitiba, por ser a instituição de origem da protesista que apoiou a ideia e ajudou no desenvolvimento do fluxo virtual.

O primeiro projeto foi registrado sobre o CAAE 40889820.5.0000.5226 e o título “*Uso de imagens tomográficas para a modelagem 3D de moldes para próteses faciais*”. Ele foi focado na validação do método usando tomografias de casos reais de pacientes oncológicos do hospital. Todos os pacientes selecionados passaram pela ressecção cirúrgica de órgãos faciais após diagnóstico de câncer de pele, ou seja, teriam indicação para a reabilitação facial via prótese de silicone. Seu objetivo era refinar o método, criado teoricamente usando imagens médicas reais, para que fosse melhorado antes da aplicação direta nos casos clínicos.

Foram escolhidos dez casos do setor de Cabeça e Pescoço do hospital, dentre pacientes que passaram por tomografia computadorizada após o procedimento de ressecção do câncer. Alguns passaram por procedimentos simples de reconstrução facial ainda na mesma cirurgia, enquanto outros não precisaram desta intervenção, possuindo uma lesão anatomicamente mais estável. Tomando como base os arquivos de tomografia destes pacientes, foram modeladas quatro próteses óculo-palpebrais, quatro próteses nasais e duas próteses auriculares. O Capítulo 5 apresenta o Quadro 5 com alguns exemplos destas modelagens.

Após a modelagem das peças, foi apresentado um questionário à protesista que acompanhou os casos (Apêndice A). Nele, ela julgou a viabilidade das próteses modeladas em diversos itens como a harmonia com o rosto e a qualidade das bordas, por exemplo. Ao fim, com os resultados do questionário, o método foi validado *in vitro*. Assim, obtiveram-se parâmetros e argumentos para sua execução, incluindo a implantação das próteses, mediante novo estudo aprovado em Comitê de Ética.

3.1.3 Segundo projeto ao comitê de ética em pesquisa

Após o sucesso obtido no primeiro estudo, foi submetido o segundo projeto ao CEP, cadastrado sob o CAAE 48174521.3.0000.5226 e denominado “*Validação de uma sistemática para a confecção de próteses faciais de silicone usando tecnologias de baixo custo*”. Este projeto prevê a execução do fluxo digital de forma completa, desde a aquisição das tomografias computadorizadas dos pacientes até a implantação das próteses. Foi aprovada a participação de 20 pacientes oncológicos do setor de Cabeça e Pescoço do Hospital Angelina Caron, também com a restrição de necessitarem de reabilitação facial após ressecção cirúrgica. Este projeto tem duração de dois anos e possibilita a execução e validação não apenas do trabalho aqui apresentado, mas de todas as iniciativas a serem recebidas pelo NUFER na área das próteses faciais modeladas virtualmente. O fluxo de atividades designado para este trabalho é o que segue:

- O paciente é admitido no hospital para seu tratamento oncológico;
- O paciente realiza o exame de tomografia computadorizada após a cirurgia de ressecção do tumor com a finalidade de planejamento da prótese (caso não o tenha);
- O paciente é encaminhado à protesista para o início de seu tratamento de reabilitação facial;
- A protesista admite o paciente e oferece a participação no estudo. O recrutamento ocorre no consultório odontológico da Clinirad (Clínica de Radioterapia e Quimioterapia) nas dependências do Hospital Angelina Caron. O Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) será apresentado e explicado de forma que o paciente não tenha dúvidas ao final do processo:
 - Os pacientes que aceitam a participação assinam o TCLE;
 - Para os que não aceitarem, é oferecida a reabilitação facial seguindo o método manual;
- As tomografias anonimizadas dos pacientes são encaminhadas à UTFPR;
- Na UTFPR é modelada a prótese virtual e seus moldes, sempre com *feedback* visual e correções da protesista sobre a qualidade do modelo;

- A impressão dos moldes pode se dar na UTFPR ou no Laboratório de Prótese Bucomaxilofacial do Hospital Angelina Caron, a depender da disponibilidade e da conveniência em cada caso, sempre no material PLA Natural;
- A protesista usa os moldes para fabricar uma prótese de silicone para teste;
- O paciente é chamado ao consultório para testes da prótese em relação a conforto, funcionalidade e estética;
 - Caso ajustes sejam necessários, a equipe da UTFPR é informada e a prótese será ajustada virtualmente;
 - Caso a prótese seja aprovada, será realizada a caracterização e os detalhes finais para a implantação definitiva.

Ao final do processo de reabilitação de cada caso, a protesista respondeu um questionário baseado na metodologia Avaliação da Satisfação do Usuário de Tecnologia Assistiva de Québec (do inglês *Quebec User Evaluation of Satisfaction with Assistive Technology*, QUEST), adaptado de Carvalho, Gois Júnior e Sá (2014). Neste questionário (Disponível no Apêndice B), ela informou seu grau de satisfação com variados quesitos que dizem respeito ao modelo implantado. Este passo foi utilizado para que a qualidade da prótese implantada fosse quantificada e o fluxo utilizado fosse avaliado. Estes resultados, se positivos, seriam o argumento para a validação do uso clínico do fluxo deste trabalho, concluindo a pesquisa.

É importante ressaltar que todo o contato com os pacientes é realizado por profissionais de saúde e que a parte virtual do método é totalmente realizada à distância. Também, a anonimidade dos pacientes é garantida uma vez que suas informações pessoais como nome e idade são irrelevantes para a execução do trabalho. Por último, todos os participantes da pesquisa aceitaram voluntariamente participar do projeto, assinando sempre um TCLE.

3.2 FASE 2 – ABORDAGEM PRÁTICA DO MÉTODO

Nas seções 3.2.1 a 3.2.3 são apresentados três casos de prótese facial executados na prática, com imagens da modelagem virtual, do uso dos moldes e das próteses finais em silicone. No primeiro caso é abordada uma prótese nasal na seção 3.2.1, e todo o método delineado na seção 3.1 é exposto, com descrição dos

programas e materiais utilizados. Para os outros dois casos, incluídos nas seções 3.2.2 e 3.2.3, de prótese auricular e óculo-palpebral respectivamente, são apontadas apenas as diferenças do método padrão aplicadas para estes casos, abrangendo todo o conhecimento gerado para estas três variações de prótese facial de silicone. Todas as fotografias aqui utilizadas foram autorizadas pelos pacientes via termo de uso de imagem coletado pela protesista que realizou as implantações.

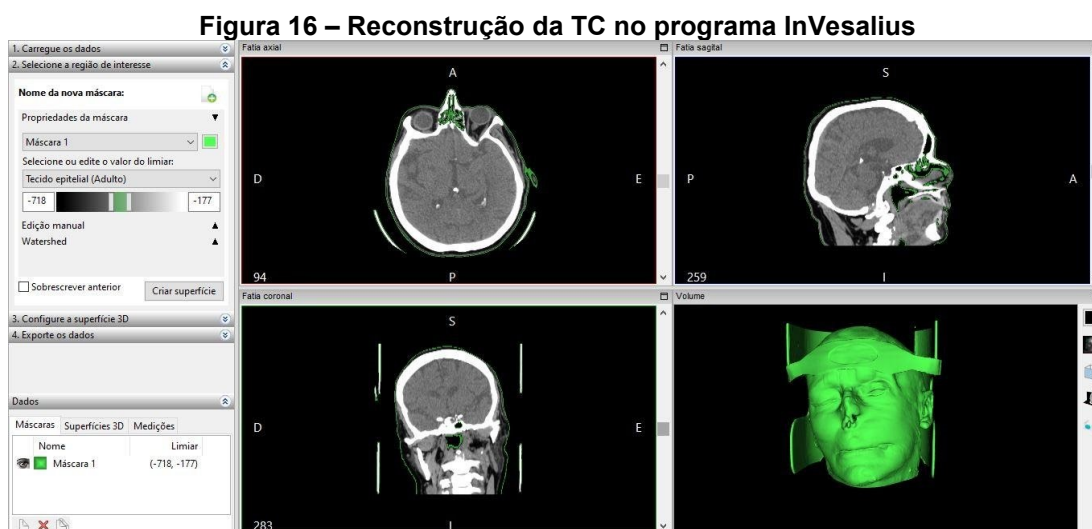
3.2.1 Aplicação do método em caso de prótese nasal

O primeiro passo para a confecção das próteses faciais pelo método virtual é a digitalização da superfície da face do paciente. Nesta fase, quanto mais fiel for a reprodução virtual do rosto, usando tecnologias de aquisição dimensionalmente mais rigorosas, melhor é representada a área da lesão facial e melhor tende a ser o encaixe da prótese no rosto. Desse modo, foi usado neste estudo de caso um exame de tomografia computadorizada para a reconstrução tridimensional da anatomia do paciente. Este método é o mais adequado atualmente para esta aquisição, capturando imagens seccionais do paciente e armazenando-as em “cortes” para posterior análise. Para um melhor conhecimento do caso e planejamento da prótese, podem também ser enviadas fotos da região afetada e imagens antigas do paciente, mediante assinatura de um termo de uso de imagem. No caso de exemplo descrito, foram utilizados os arquivos da TC da Paciente 1, após ressecção de câncer de pele, bem como fotos antigas e atuais.

Os cortes presentes nos arquivos de tomografia foram transformados em uma superfície 3D pelo programa InVesalius. O programa seleciona uma faixa de densidades dentro de cada corte da tomografia e as interpola, usando vários dados de entrada para este processamento, como o número de cortes no exame e o espaçamento entre cada um deles. Como a anatomia de interesse da prótese facial é a pele do rosto, o principal parâmetro de reconstrução utilizado foi a faixa de HU referentes à densidade do tecido epitelial adulto (-718 a -177).

Assim, após o processamento, foi gerada uma superfície de alta resolução que contém a geometria da face e da lesão do paciente, que são as bases necessárias para o desenvolvimento da prótese facial. A Figura 16 mostra as regiões delineadas na TC dentro da faixa de HU escolhida (em verde) gerando a

superfície do rosto da paciente no programa InVesalius. Após a validação da superfície gerada, confirmando-se a reconstrução bem-sucedida de todas as anatomias de interesse, esta foi exportada como uma malha tridimensional de triângulos em formato STL para ser trabalhada em programas de modelagem virtual



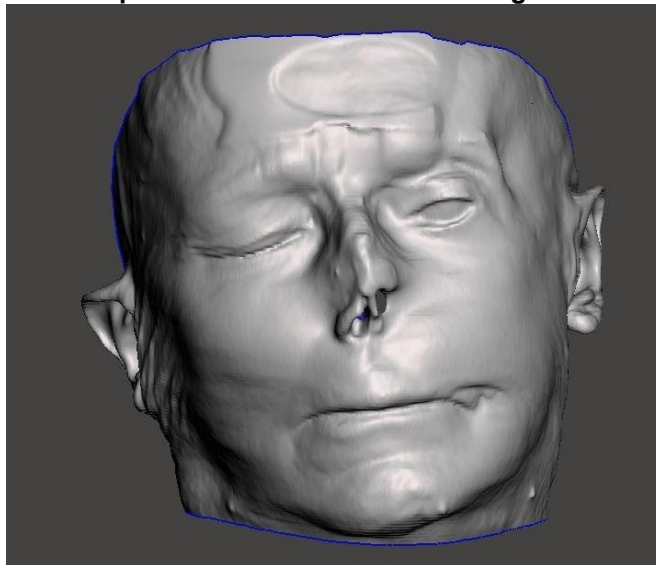
Fonte: Autoria própria

A maior parte do trabalho com as superfícies reconstruídas ocorreu no Meshmixer, um programa que permite o uso de modelagem baseada em malhas para a edição dos arquivos do rosto e da prótese, onde se pode moldar livremente as superfícies como se fosse feito um trabalho manual. Após a importação do arquivo STL nesta plataforma, o primeiro tratamento na superfície envolveu o descarte de elementos que não são utilizados para o posicionamento da prótese, como a parte de trás da pele da cabeça, os cabelos e os itens de apoio de cabeça usados durante a aquisição da tomografia. O resultado foi uma superfície de trabalho mais leve e que poupa recursos do computador no momento da modelagem (Figura 17).

Para a confecção de próteses nasais pelo método virtual, um modelo de referência externo deve ser utilizado, uma vez que não existem referências no rosto original para que seja modelado um nariz novo. Dentre as várias técnicas para aquisição de possíveis modelos de prótese, foi utilizada a reconstrução 3D de arquivos de exames de imagem que contemplavam toda a região da face. Os modelos obtidos nesse fluxo possuem o nariz e toda a área ao redor, o que facilitou o trabalho de modelagem da prótese. O nariz selecionado para o estudo de caso foi obtido de uma biblioteca de anatomias virtuais compilada no NUFER em trabalhos

de iniciação científica, dentre mais de dez modelos nasais de diferentes geometrias, tamanhos e formas.

Figura 17 - Superfície do rosto contendo a região de interesse

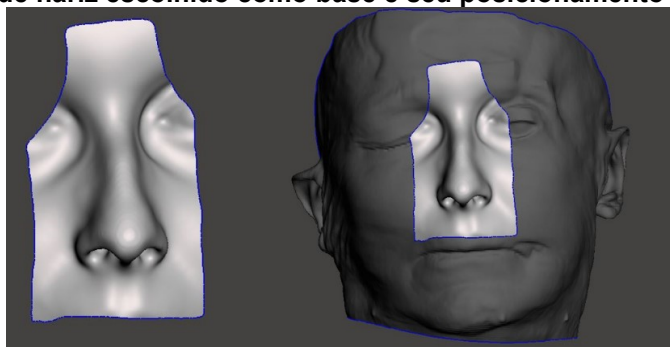


Fonte: Autoria própria

A seleção do modelo de nariz a ser utilizado como prótese aconteceu usando uma variedade de parâmetros dados pela protesista. Além da estética básica do nariz desejado (como dimensões, espessura, protrusão, entre outros), foi analisado o estado da lesão e a forma com que a geometria desta iria interferir na estética da futura prótese. O principal aspecto avaliado nesta fase foi a necessidade de modificações na malha da prótese para cobrir totalmente a região de interesse. Exemplos de situações que dificultam a adaptação de uma prótese nasal na geometria da lesão incluem protruções exageradas na área da lesão, assimetria ou ausência de uma das narinas, ou marcas e cicatrizes próximas à região, e algumas destas situações estavam presentes no estudo de caso.

O posicionamento do nariz no rosto foi uma das fases mais importantes de toda a operação. Este processo é delicado e pôde ser auxiliado pelos traços faciais presentes tanto no modelo do rosto do paciente quanto no modelo da prótese. Traços especialmente úteis para uma união harmônica entre essas duas superfícies foram as linhas da boca, das sobrancelhas e das fossas orbitais (Figura 18), e o alinhamento destas foi usado como ponto de partida para a definição do posicionamento da prótese.

Figura 18 - Modelo de nariz escolhido como base e seu posicionamento no rosto da paciente

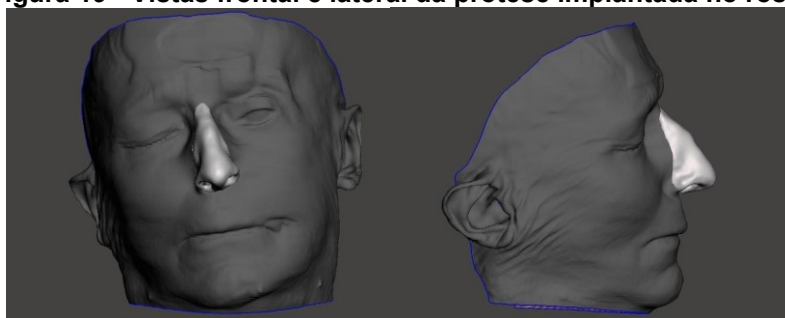


Fonte: Autoria própria

O próximo passo consistiu na adequação das narinas da prótese às da paciente. Uma questão recorrente nos casos de próteses nasais é a imprevisibilidade da aparência das narinas do paciente pós-trauma ou pós-cirurgia, uma vez que a aparência da região depende do modo de trabalho de cada cirurgião e da complexidade de cada caso. Assim, para este estudo de caso, foi necessário orientar as estruturas nasais internas da prótese de modo a permitir à paciente uma respiração desobstruída e sem esforço. Para isso, foram criados canais que ligassem as narinas da prótese às da paciente.

Como último passo da escultura virtual da prótese, foi moldada a parte das bordas do nariz, com especial cuidado nas regiões próximas ao contato da prótese com a pele. Além de definir o tamanho final do órgão artificial, importante para a questão estética, essa fase também permitiu cobrir imperfeições da face em regiões adjacentes ao nariz, como cicatrizes. Terminada esta modelagem, a protesista foi consultada para avaliar o resultado e dar seu aval sobre a prótese, uma vez que é ela quem tem a responsabilidade médica sobre o caso. Qualquer um dos passos anteriores poderia sofrer alterações dependendo deste retorno, mas não foi o caso. A Figura 19 mostra a aparência final da prótese nasal deste exemplo.

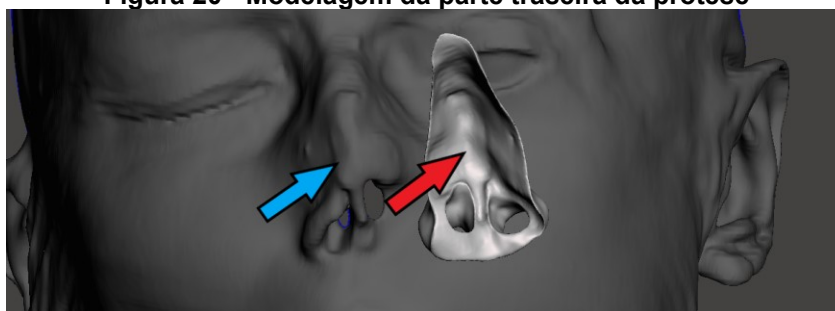
Figura 19 - Vistas frontal e lateral da prótese implantada no rosto



Fonte: Autoria própria

Embora o trabalho mais crucial de posicionamento e estética tenha sido completado, o rosto e a prótese ainda eram apenas duas superfícies independentes que se interceptavam. Para que fossem produzidos os moldes para sua fabricação em silicone (ou mesmo para a impressão direta do modelo), foi necessária a criação de uma superfície fechada delimitada por estas duas superfícies. Para essa operação foi usada a superfície frontal do rosto, incluindo a região mutilada, como superfície de fechamento do modelo do nariz selecionado para a paciente. A Figura 20 mostra a superfície da região mutilada (seta azul) da paciente usada como superfície traseira da prótese (seta vermelha). Na imagem a prótese está invertida, com o nariz virado para o rosto. Esse passo foi fundamental para o encaixe preciso do modelo da prótese no rosto da paciente.

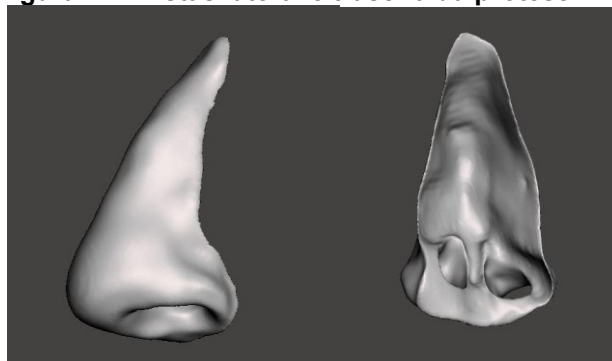
Figura 20 - Modelagem da parte traseira da prótese



Fonte: Autoria própria

O resultado foi uma peça que permite apenas uma posição de implantação correta. Isso ajudou a protesista, uma vez que a permitiu trabalhar com um modelo físico cujo encaixe é virtualmente perfeito, e a poupou da necessidade de retrabalhar à mão a superfície de contato da prótese com o rosto. As vistas lateral e traseira do modelo finalizado da prótese são mostradas na Figura 21.

Figura 21 - Vistas lateral e traseira da prótese final

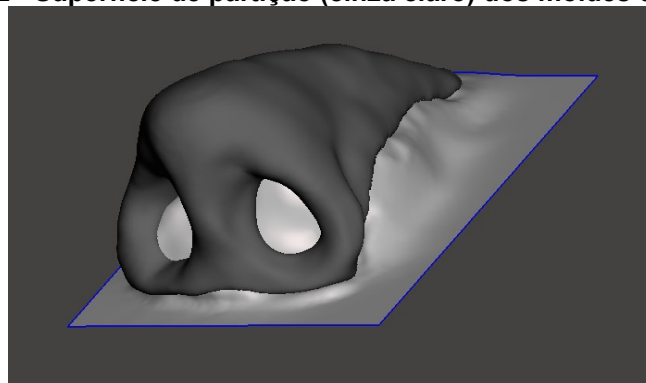


Fonte: Autoria própria

Quanto à modelagem dos moldes da prótese facial, o primeiro passo foi a criação da superfície de partição. Essa geometria é a fronteira entre as duas partes do molde e é bastante importante, visto que, dependendo da sua posição, pode gerar uma prótese com a linha de divisão visível na sua superfície. Pode-se, porém, manipular a posição dessa linha para que seu efeito seja imperceptível ou mesmo contribua para a qualidade percebida da prótese. No estudo de caso, a Figura 22 mostra a superfície de partição modelada delimitada em azul.

A superfície de partição foi definida a partir de um plano, de modo que ficasse tangente ao contorno externo da prótese e das narinas e, posteriormente, foi modelada para que passasse inteiramente por dentro dela. Essa disposição garantiu que o molde não tivesse mais que duas partes e evitou ângulos desfavoráveis de extração, situações que são causadas caso a superfície de partição fosse inteiramente plana (como na maioria dos moldes mecânicos). Também houve contribuição na parte estética, pois a prótese moldada ficou tangente à pele do paciente e contribuiu para uma melhor transição entre eles, o que tornou o implante menos perceptível.

Figura 22 - Superfície de partição (cinza claro) dos moldes da prótese



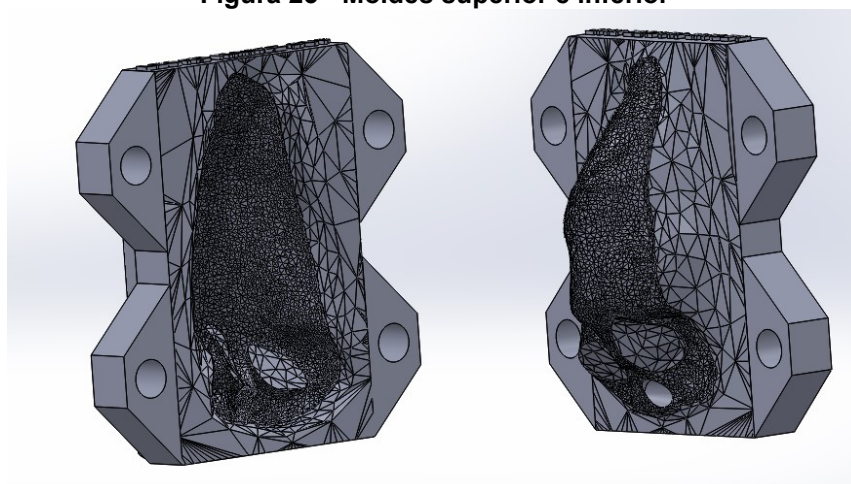
Fonte: Autoria própria

Depois de prontas, as malhas tridimensionais da prótese e da superfície de partição foram exportados em STL para serem usadas na modelagem dos moldes. Esta etapa foi realizada no SolidWorks, um programa CAD 3D paramétrico utilizado para o desenvolvimento deste estudo de caso. Essa escolha se deu pela natureza padronizada dos moldes, que necessitam de medidas exatas e um encaixe mecânico confiável, especialidade dessa categoria de programas de modelagem.

O desenho básico do molde foi um bloco posicionado ao redor da prótese, com abas furadas (no padrão de furos M6) que contribuíram tanto para o

alinhamento quanto para o fechamento destes. Esse bloco foi submetido a uma operação booleana de subtração, para que o volume da prótese fosse retirado do volume do molde. Isso deixou um espaço vazio dentro do molde correspondente ao “negativo” da prótese, e que gera a prótese física quando esse espaço vazio for preenchido pelo silicone. Para a separação das duas partes do molde, a superfície de partição foi utilizada como parâmetro de divisão do bloco, gerando dois sólidos correspondentes aos moldes superior e inferior. Ao fim, foi modelado um canal para a injeção do silicone da prótese, em um local que não comprometesse a aparência da peça. Também foram identificados os moldes em referência ao paciente, uma vez que estes são personalizados e não-intercambiáveis. A Figura 23 ilustra o par de moldes após o término dessa etapa.

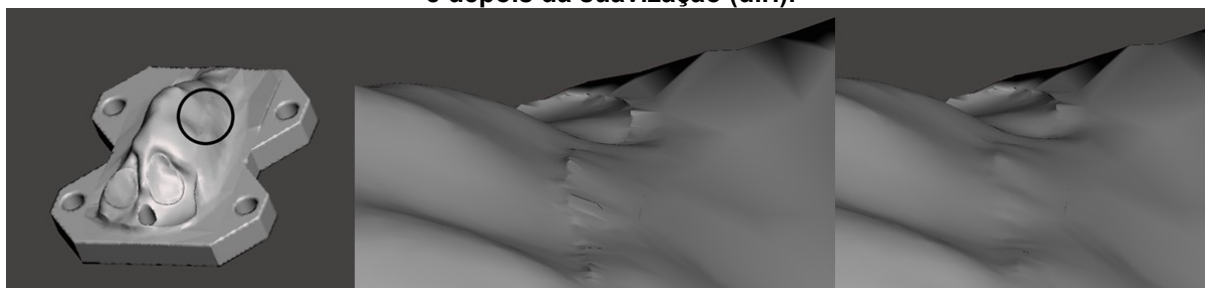
Figura 23 - Moldes superior e inferior



Fonte: Autoria própria

O último processamento virtual dos moldes foi feito novamente no programa Meshmixer. A borda da região negativa da prótese, quando dividida pela superfície de partição, formou uma fronteira protuberante nos moldes. Essa característica é indesejável em próteses faciais por fazer com que a peça de silicone tivesse uma borda bem definida, o que a deixaria mais aparente no rosto. Para corrigir a borda e deixar a prótese tangente ao rosto, foi necessário suavizar a superfície do molde naquela região. O antes e depois dessa operação é apresentado na Figura 24. Após esta fase, os modelos foram exportados em STL e seguiram para a sua fabricação por impressão 3D.

Figura 24 - Suavização do molde: Região de análise (esq.), borda antes da suavização (centro) e depois da suavização (dir.).



Fonte: Autoria própria

A fabricação dos moldes se deu em uma impressora por extrusão de material modelo Anet A8, usando os parâmetros de impressão apresentados no Quadro 4. A modelagem das peças levou em conta este processo de fabricação, tendo suas abas projetadas com ângulo de 45° com a horizontal para evitar o uso de suportes no processo de planejamento e impressão. O modelo foi impresso na vertical para se obter moldes com melhor qualidade superficial na região que entraria em contato com o silicone (Figura 25(a)).

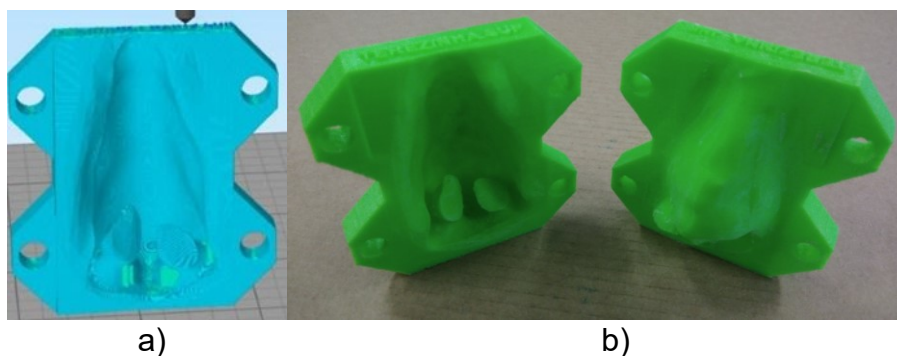
Quadro 4 - Parâmetros de impressão dos moldes para prótese nasal

Parâmetro	Valor
Programa de Planejamento	Simplify3D
Altura da Camada	0,08 mm
Preenchimento	8%
Perímetros	2
Temperatura de Impressão	210°C Extrusor 60°C Mesa
Velocidade de Impressão	50 mm/s
Material	PLA
Tempo de Impressão	3h11min (Inferior) 3h45min (Superior)
Filamento Utilizado	3,67 m (Inferior) 4,73 m (Superior)
Custo da impressão por par de moldes	R\$ 39,57

Fonte: Autoria própria

Após impressos, os moldes passaram por uma fase de pós-processamento. Nela, os suportes de impressão foram retirados e as imperfeições do processo foram corrigidas para garantir o perfeito encaixe dos moldes, sempre buscando preservar ao máximo a região da superfície que gera a prótese. Com essa etapa finalizada, a protesista foi contatada e foi realizada a entrega dos moldes. A aparência final do par de moldes é mostrada na Figura 25(b).

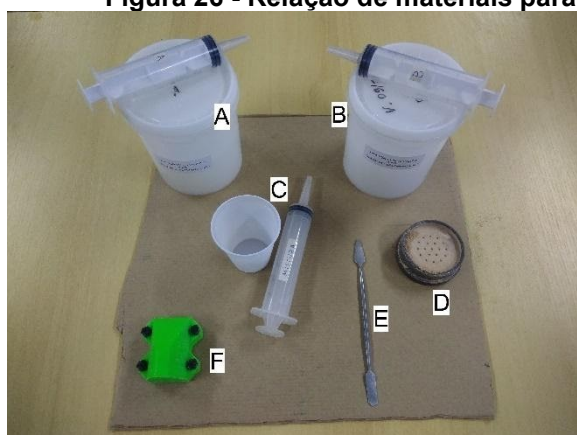
Figura 25 - Planejamento e impressão dos moldes: a) simulação da impressão do modelo 3D. b) par de moldes impressos e pós-processados



Fonte: Autoria própria

A seguir é apresentado o processo de uso dos moldes a título informativo, pois esta etapa foi realizada pela profissional de saúde com materiais adequados à implantação da peça. Os materiais utilizados nesse exemplo são apresentados na Figura 26.

Figura 26 - Relação de materiais para a moldagem do silicone



- a) Silicone Parte A + Seringa 60ml
- b) Silicone Parte B + Seringa 60ml
- c) Copo para mistura + Seringa 60ml
- d) Pó compacto para maquiagem
- e) Aparato para mistura
- f) Moldes da prótese já fechados com os parafusos M6.

Fonte: Autoria própria

O silicone utilizado neste exemplo foi o Dragon Skin 10 Fast (SMOOTH-ON, 2021), de dureza 10 Shore A, usado no mercado para a confecção de máscaras faciais para cinema e teatro. Este composto é classificado como um silicone com cura por platina (ou cura por adição) e foi preparado com a mistura de suas partes A e B. Para iniciar o processo, foram utilizadas seringas para retirar os silicones de seus recipientes, em razão 1:1 (A:B). Como o volume da prótese virtual desse exemplo é de 6,8 ml, e considerando uma margem de segurança relativa ao silicone perdido no processo, foram retirados 10ml de cada parte. Ao mesmo tempo, foi depositado no copo de mistura uma quantidade de pó de maquiagem suficiente para

se obter o tom desejado para a cor da prótese via pigmentação intrínseca (Figura 27(a)). No momento em que é depositado o conteúdo das seringas no copo da mistura, as partes de silicone começaram a interagir entre si quimicamente. Com isso, a mistura das partes e do pó de maquiagem precisou ser rápida, uma vez que o silicone indicado cura em 75 minutos à temperatura ambiente. Após atestada a homogeneidade da mistura, esta foi colocada em uma terceira seringa, atentando-se para que o material estivesse livre de bolhas e impurezas.

O próximo passo foi a inserção do silicone no molde (Figura 27(b)). Como estava presente no modelo um canal de injeção para a colocação do material, a seringa com a mistura foi posicionada neste canal e o silicone foi inserido com uma vazão constante. No método desenvolvido pelos autores, o molde foi orientado de forma que o material seja inserido no seu ponto mais baixo. Assim, o silicone, ao ser inserido, expulsou o ar de dentro do molde e evitou regiões sem material ou com bolhas de ar aprisionado, que comprometeriam a qualidade da prótese. A mistura foi reservada por duas horas para que curasse normalmente.

Figura 27 - Aplicação do silicone nos moldes: (a) Mistura do silicone com pigmentação intrínseca; (b) inserção do silicone nos moldes



a)

b)

Fonte: Autoria própria

Para a abertura do molde após o tempo de cura, foram retirados os parafusos e separadas as partes inferior e superior. Esta separação foi dificultada pela adesão entre o silicone e o plástico dos moldes, então foi necessário inserir um aparato fino e resistente na divisão dos moldes para ajudar a separação. Uma vez aberto, o molde gerou a prótese e a superfície de partição, causada pelo vazamento interno do silicone. Esta superfície, segundo relato posterior da protesista, foi útil no momento da implantação por permitir um melhor delineamento da borda da prótese, tornando sua aparência mais natural. A extração do modelo pode ser dificultada pela

sua geometria e partes pouco espessas podem rasgar. Em contrapartida, a elasticidade do silicone contribuiu para a retirada da peça (Figura 28). Após processos de acabamento e coloração extrínseca, a prótese está pronta para a implantação.

Figura 28 - Prótese nasal após cura do silicone nos moldes impressos

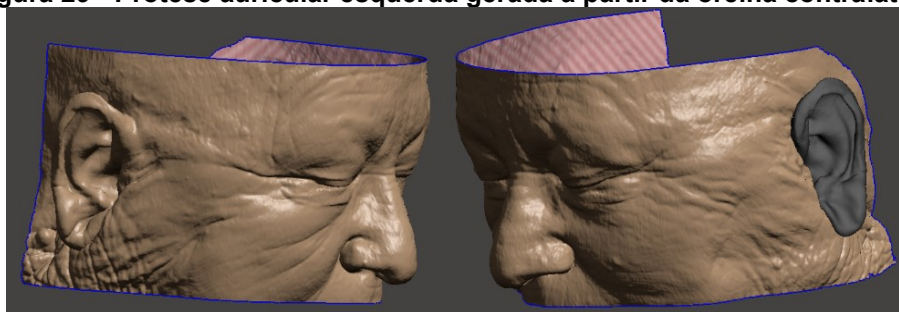


Fonte: Autoria própria

3.2.2 Aplicação do método em próteses auriculares

As próteses de silicone confeccionadas com método proposto puderam ser desenvolvidas também para casos de pacientes com câncer de pele na região da orelha (com extração parcial ou total do órgão), deformidades causadas por trauma, microtia, entre outros. A novidade neste caso foi que a paciente, também tratada após ressecção de câncer de pele na orelha esquerda, possuía ainda uma orelha direita anatomicamente saudável. Com isso, a orelha direita foi copiada e espelhada no programa Meshmixer para que servisse de base para a prótese da orelha esquerda. Neste caso, poupou-se o processo de escolha de uma geometria de referência externa e garantiu-se um bom resultado quanto à simetria e a harmonia geral da prótese no rosto do paciente. O fluxo seguiu um caminho de planejamento e produção igual ao da prótese nasal após o posicionamento da orelha espelhada, sem alterações. A Figura 29 ilustra o caso da Paciente 2 e a prótese da orelha esquerda modelada.

Figura 29 - Prótese auricular esquerda gerada a partir da orelha contralateral



Fonte: Autoria própria

Quanto ao molde (parâmetros de impressão no Quadro 5), a geometria da prótese auricular resultou em áreas onde seria necessária a adição de suportes de impressão na cavidade onde seria inserido o silicone, o que não é recomendado pois os suportes podem marcar o molde e, por consequência, a prótese. Além disso, os suportes se localizavam em locais de difícil acesso para sua remoção. A parte superior do modelo da orelha foi uma região propensa a esta situação, uma vez que possui áreas com ângulo bem menor que 45° com a horizontal, o que caracteriza a necessidade do uso de suportes. Foi realizada a impressão mesmo com suportes em locais inacessíveis e a peça de silicone, como previsto, não reproduziu a geometria naquela região, gerando uma prótese não-utilizável. A Figura 30(a) mostra o dano causado pela presença dos suportes não-retiráveis no molde.

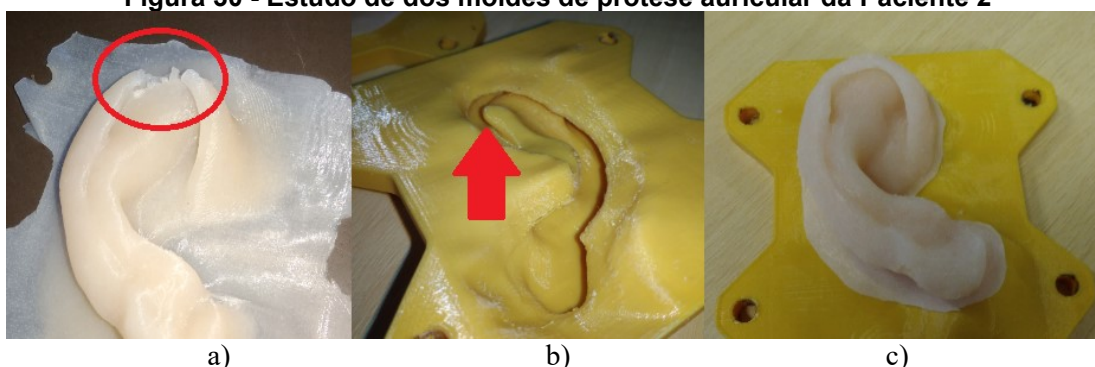
Quadro 5 - Parâmetros de impressão dos moldes para prótese auricular

Parâmetro	Valor
Programa de Planejamento	Simplify3D
Altura da Camada	0,08 mm
Preenchimento	8%
Perímetros	2
Temperatura de Impressão	210°C Extrusor 60°C Mesa
Velocidade de Impressão	50 mm/s
Material	PLA
Tempo de Impressão	5h14min (Inferior) 7h37min (Superior)
Filamento Utilizado	7,29 m (Inferior) 10,42 m (Superior)
Custo da impressão por par de moldes	R\$ 74,64

Fonte: Autoria própria

A solução encontrada foi imprimir uma amostra da parte crítica do molde para avaliar a possibilidade da impressão da peça sem suportes. Se a amostra sem suportes fosse impressa com sucesso, o processo seguiria para a impressão do molde completo (Figura 30b). Em caso de insucesso, a posição da prótese dentro do molde teria que ser modificada e outra amostra produzida, até que fossem obtidos resultados satisfatórios (Figura 30c). Com esta alteração, a prótese pôde ser produzida sem problemas pela protesista e foi implantada corretamente na paciente.

Figura 30 - Estudo de dos moldes de prótese auricular da Paciente 2

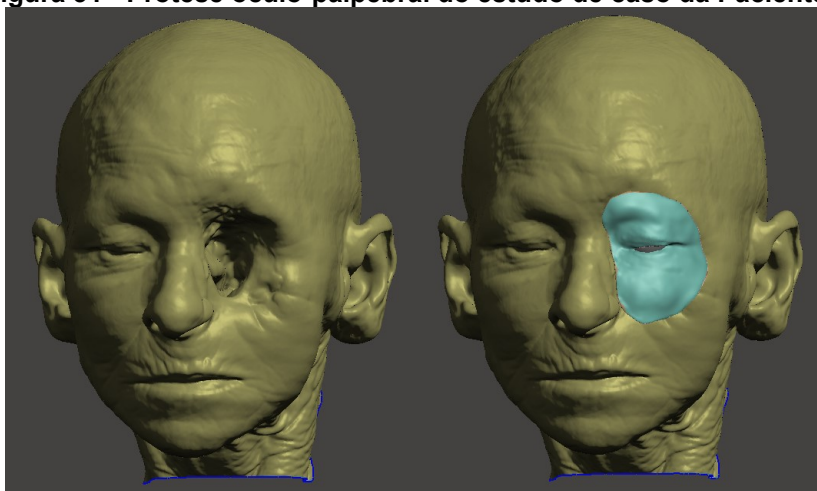


Fonte: Autoria própria

3.2.3 Aplicação do método em próteses óculo-palpebrais

O paciente que precisa passar por uma ressecção da região do olho é o que provavelmente passa pela mudança mais radical em sua fisionomia facial. A prótese óculo-palpebral tem suas peculiaridades em relação às outras duas, mas o processo é similar aos anteriores. Como exemplo, é apresentado o caso da Paciente 3, acometida por câncer de pele e candidata à reabilitação facial via prótese de silicone.

O método do espelhamento também foi utilizado, dado que a tomografia utilizada para o caso contemplava a anatomia do olho contralateral saudável. Assim, este foi utilizado como a anatomia de referência e não foi necessário recorrer a um banco externo. A prótese foi confeccionada criando-se uma cópia do rosto da paciente e espelhando-se a região do olho saudável. O posicionamento dela levou em conta a posição do nariz e das sobrancelhas para que o resultado final fosse harmônico e natural (Figura 31).

Figura 31 - Prótese óculo-palpebral do estudo de caso da Paciente 3

Fonte: Autoria própria

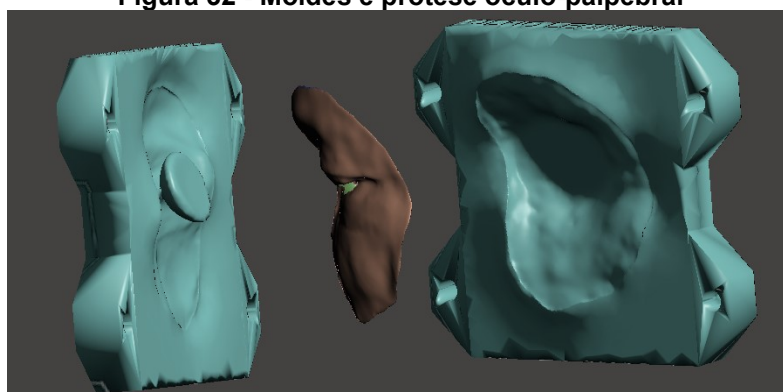
Diferentemente da prótese nasal e da auricular, a óculo-palpebral não precisou copiar a superfície da lesão para se adaptar ao rosto da paciente. Isso se deu pois, naqueles casos, a prótese foi colada em uma região pouco profunda e recoberta de pele, fazendo com que a reprodução da geometria da lesão ajudasse na fixação e no posicionamento das próteses. Já nas próteses óculo-palpebrais, a lesão se apresentou como um orifício grande, úmido, recoberto por mucosas e que podia também estar conectada fisicamente aos canais nasais, seios da face ou outras anatomias internas da região do crânio. Isso faria com que, no momento da implantação da prótese, sua superfície útil de colagem se concentrasse apenas na região ao redor do olho, composta de pele mais seca que os tecidos internos supracitados. Assim, a prótese precisou cobrir o orifício original da lesão e uma faixa de segurança ao redor dele, para que se pudesse obter uma boa fixação da prótese na pele do rosto. Os detalhes da impressão dos moldes são apresentados no Quadro 6

Uma vez que a parte traseira da prótese não precisou reproduzir a superfície do rosto, obteve-se uma redução de peso considerável na peça. Essa redução foi importante para que a peça ficasse bem afixada ao rosto mesmo com a menor área de colagem. Com isso em mente, foi modelada uma prótese pouco espessa, que apenas cobre a porção frontal da lesão e abriga o olho de resina acrílica, resultando em uma economia de silicone biocompatível utilizado. A Figura 32 mostra o molde da prótese óculo-palpebral com a geometria específica para modelagem do olho e a prótese com a redução de material aplicada.

Quadro 6 - Parâmetros de impressão dos moldes para prótese óculo-palpebral

Parâmetro	Valor
Programa de Planejamento	Simplify3D
Altura da Camada	0,08 mm
Preenchimento	8%
Perímetros	2
Temperatura de Impressão	210°C Extrusor 60°C Mesa
Velocidade de Impressão	50 mm/s
Material	PLA
Tempo de Impressão	6h25min (Inferior) 7h01min (Superior)
Filamento Utilizado	9,27 m (Inferior) 9,67 m (Superior)
Custo da impressão por par de moldes	R\$ 78,10

Fonte: Autoria própria

Figura 32 - Moldes e prótese óculo-palpebral

Fonte: Autoria própria

Outro ponto positivo da prótese mais leve é que a cola foi menos solicitada mecanicamente e fixou melhor a peça no rosto. Isso é importante em casos onde a prótese recebe pressão interna, como quando há, por exemplo, uma comunicação da lesão ocular com os canais nasais, e uma parte do ar expirado acaba se acumulando na região da lesão e aumentando sua pressão, assim "empurrando" a prótese por trás.

O modelo do olho também é uma característica exclusiva da prótese óculo-palpebral. Sua modelagem se iniciou medindo-se as medidas do globo ocular saudável da paciente pela tomografia, para um melhor senso de escala e realismo da prótese. Então, um corte plano transformou o olho em uma semiesfera que ocupava apenas o espaço da abertura do olho da prótese, simulando a porção

frontal do olho real. Este modelo do olho foi fundamental para a confecção da prótese, uma vez que delimitou o espaço ocupado pelo olho definitivo no momento em que foi adicionado o silicone no molde. Este modelo foi impresso e enviado para a protesista para utilizar na criação do olho em resina acrílica. Junto a ele, excepcionalmente para este caso, foi produzido também um rosto impresso da paciente para que a protesista pudesse prever os resultados da implantação da prótese antes da consulta. A Figura 33 mostra o conjunto de materiais enviados.

Figura 33 - Materiais enviados à protesista



Fonte: Autoria própria

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os modelos finais resultantes da aplicação do método virtual de confecção de próteses faciais. Inicialmente, são apresentados exemplos das próteses modeladas para o primeiro projeto ao Comitê de Ética. Em seguida, os resultados dos três estudos de caso são apresentados para que seja possível fazer uma análise das pacientes depois do recebimento de sua prótese.

Os casos modelados para o projeto ao Comitê de Ética resultaram no aprimoramento e na validação teórica do método virtual. Estas simulações de prótese foram muito importantes para a evolução da técnica proposta, por conferir robustez ao fluxo e experiência a quem as modelava.

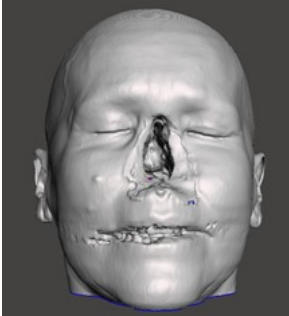
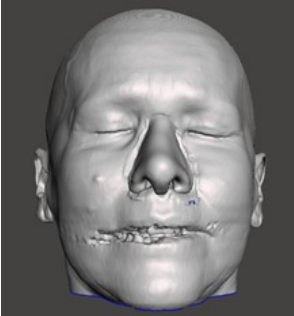
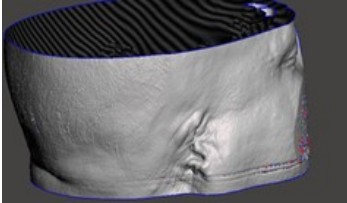


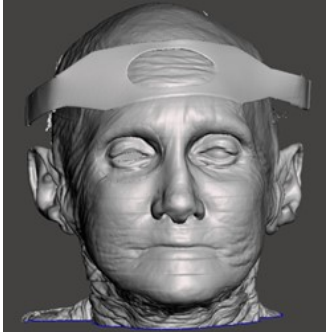
As próteses virtuais foram analisadas pela Dra. Karin Barczynszyn, dentista do Hospital Angelina Caron com experiência em próteses faciais, por meio do questionário aprovado junto ao estudo (Apêndice A). As próteses virtuais, em geral, obtiveram uma análise muito positiva e promissora, validando assim o fluxo de trabalho proposto. Os resultados combinados dos dez questionários estão compilados na Tabela 1. Três destes casos são apresentados no Quadro 7, um para cada modalidade de prótese.

Tabela 1 - Resultados da análise das dez próteses virtuais modeladas

Caso	Órgão	Harmonia	Cobertura	Bordas	Funcional	Nota
1	Olho	9,0	10,0	9,0	10,0	9,0
2	Olho	10,0	10,0	9,0	10,0	9,5
3	Olho	9,5	10,0	10,0	9,5	9,5
4	Nariz	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
5	Orelha	8,5	10,0	8,0	8,5	8,5
6	Olho	10,0	10,0	10,0	9,5	9,5
7	Nariz	10,0	10,0	9,5	10,0	9,5
8	Orelha	9,0	10,0	8,0	8,0	8,0
9	Nariz	10,0	10,0	9,5	10,0	9,5
10	Nariz	10,0	9,5	9,0	10,0	9,5
Média		9,60	9,95	9,20	9,55	9,25

Fonte: Autoria própria

Quadro 7 - Três próteses faciais modeladas a partir dos arquivos de TC

Órgão	Tomografia Original	Tomografia com Prótese
Nariz (Caso 10 na Tabela 1)		
Orelha Direita (Caso 8)		
Olho Direito (Caso 2)		

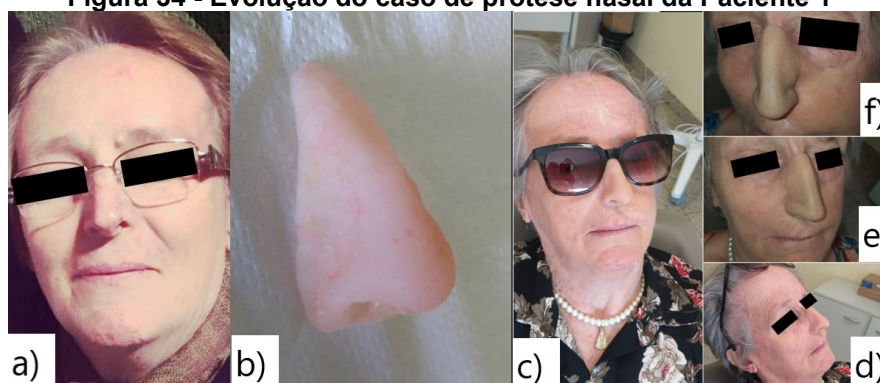
Fonte: Autoria própria

Com os resultados positivos da validação teórica, foi dado início ao processo de testes do fluxo digital com casos reais de pacientes que receberiam, de fato, sua prótese. Os três estudos de caso foram registrados em fotos e sua evolução é retratada nos parágrafos a seguir.

A evolução da prótese nasal da Paciente 1 é apresentada na Figura 34. Observa-se que ela possuía uma outra prótese nasal (Figuras 34(e) e 34 (f)), anterior à que foi feita pelo método virtual. Esta não combinava com seu rosto (Figura 34(a)) segundo a protesista que acompanhou o caso, tendo uma coloração bastante diferente da pele da paciente e sendo muito grande, especialmente se comparada à foto pré-cirúrgica. Estas características fizeram com que a prótese ficasse muito aparente no rosto da paciente, o que a motivou a procurar o serviço de reabilitação facial para a confecção de uma nova prótese.

Como a aparência virtual da prótese pode ser retrabalhada várias vezes sem gasto de material e testes de implantação, foi possível modelar a prótese de forma com que se aproximasse ao máximo do nariz antigo, principalmente nos quesitos de tamanho e harmonia com o rosto (Figuras 34(b), 34(c) e 34(d)). Ainda, necessitou-se refinar estes dois parâmetros, levando-se em conta a geometria da lesão facial pós-cirúrgica. Esta era bastante protuberante, o que limitou as opções possíveis de posicionamento, angulação e protrusão da prótese.

Figura 34 - Evolução do caso de prótese nasal da Paciente 1



Fonte: Autoria própria

As bordas da prótese, como requisitado pela protesista, foram afinadas para que a transição entre implante e pele fosse suavizada e a aparência geral se tornasse mais natural. O resultado do questionário referente à prótese nasal, disponível no Apêndice B, é apresentado no Quadro 8. A escala representa a satisfação relacionada à prótese em cada um dos critérios analisados, com 1 significando “insatisfeito”, 2, “pouco satisfeito”, 3, “mais ou menos satisfeito”, 4, “bastante satisfeito” e 5, “totalmente satisfeito”.

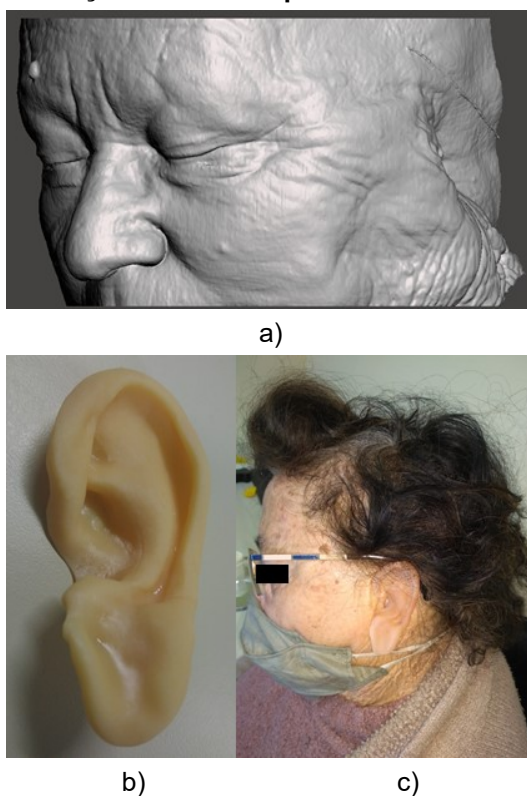
Quadro 8 - Avaliação da prótese nasal da Paciente 1

Critério	Grau de Satisfação				
	1	2	3	4	5
Formato				X	
Peso				X	
Facilidade de retirar e colocar				X	
Estabilidade				X	
Conforto				X	
Atente às necessidades?				X	

Fonte: Autoria própria

A prótese auricular da Paciente 2 é apresentada na Figura 35. A paciente precisou passar pela tomografia computadorizada duas vezes, pois seu cabelo obstruía a região da orelha saudável e impossibilitava a modelagem. A Figura 35(a) traz a tomografia pós-cirúrgica da paciente, a Figura 35(b) mostra o modelo prévio da prótese auricular impresso em resina fotossensível, e a Figura 35(c) exibe a prótese implantada. O resultado do questionário referente à prótese auricular, disponível no Apêndice B, é apresentado no Quadro 9.

Figura 35 – Evolução do caso de prótese auricular da Paciente 2



Fonte: Autoria própria

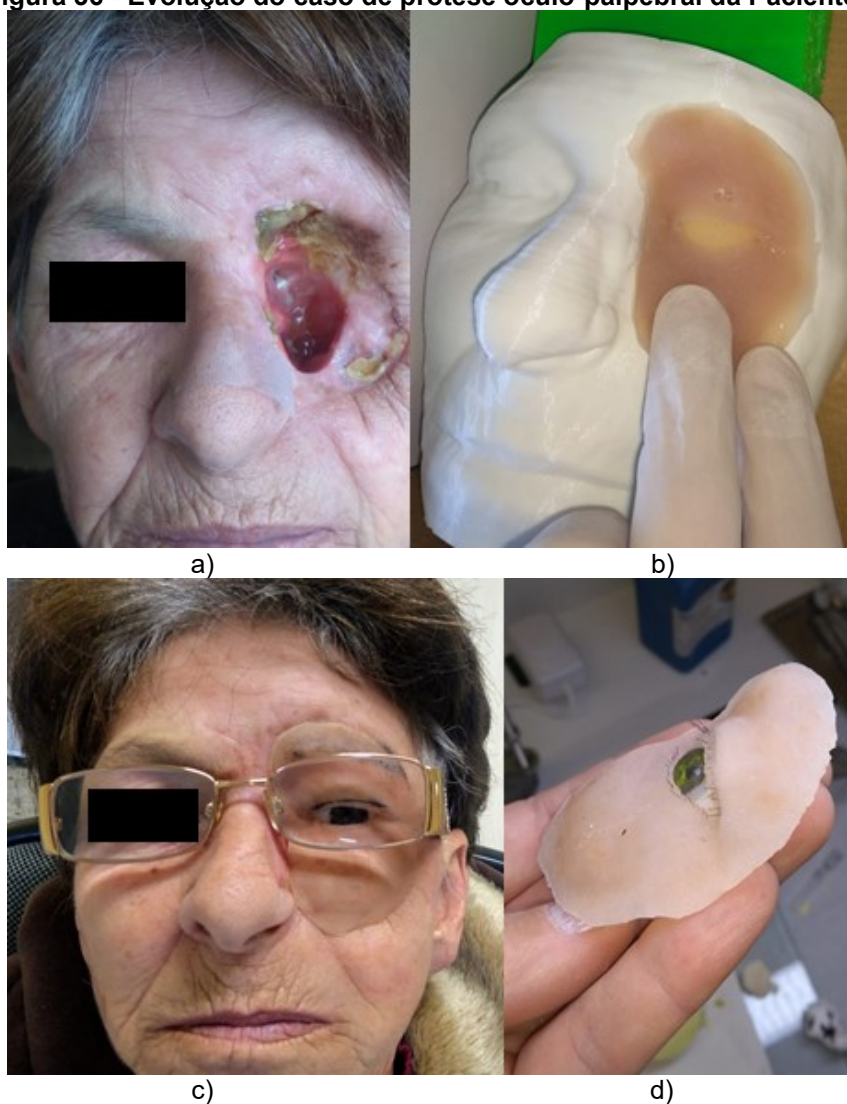
Quadro 9 - Avaliação da prótese auricular da Paciente 2

Critério	Grau de Satisfação				
	1	2	3	4	5
Formato				X	
Peso				X	
Facilidade de retirar e colocar				X	
Estabilidade			X		
Conforto				X	
Atente às necessidades?				X	

Fonte: Autoria própria

Por fim, a prótese óculo-palpebral da Paciente 3 é apresentada na Figura 36. Seu caso (Figura 36(a)) usou de outros recursos além apenas da impressão dos moldes da prótese. Foram fabricados, também, a face da paciente em tamanho real (Figura 36(b)), para que a protesista pudesse prever melhor o caso e continuar trabalhando nele sem a necessidade da presença da paciente, uma versão prévia em plástico da prótese que seria fabricada dentro pelos moldes, também para o estudo do caso e um modelo da geometria do olho da prótese, para guiar a confecção deste em um tamanho que coubesse dentro da cavidade ocular. Os resultados são mostrados nas Figuras 36(c) e 36(d).

Figura 36 - Evolução do caso de prótese óculo-palpebral da Paciente 3



Fonte: Autoria própria

Após a moldagem do silicone e a inserção do olho, ressalta-se que a prótese óculo-palpebral ainda necessitou de vários outros detalhes de acabamento na fase de caracterização, como cílios e sobrancelha, para que se adaptasse mais naturalmente à face da paciente. O resultado do questionário referente à prótese óculo-palpebral é apresentado no Quadro 10.

Quadro 10 - Avaliação da prótese óculo-palpebral da Paciente 3

Critério	Grau de Satisfação				
	1	2	3	4	5
Formato				X	
Peso				X	
Facilidade de retirar e colocar				X	
Estabilidade			X		
Conforto				X	
Atente às necessidades?				X	

Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÕES

O método virtual de confecção de próteses faciais utilizando modelagem virtual e manufatura aditiva desenvolvido foi validado em casos reais. O objetivo principal do trabalho, descrever detalhadamente e validar clinicamente um fluxo de trabalho para a confecção de próteses faciais, foi cumprido em dois momentos.

Na Fase 1 foi exposto todo o fluxo digital de confecção de próteses faciais desenvolvido no NUFER desde fevereiro de 2019. Ele incorporou a modelagem virtual e a manufatura aditiva, duas tecnologias que são extensamente utilizadas no ramo da engenharia e agora começam a encontrar espaço nas aplicações da saúde. A Fase 2 do trabalho mostrou a validação prática deste método, utilizando casos clínicos reais para demonstrar a eficácia do fluxo digital. Segundo a protesista que acompanhou os três casos, as próteses confeccionadas foram bem aceitas pelos pacientes e os ajudaram a elevar sua autoestima e a retornar à vida em sociedade após a mutilação.

O primeiro e o segundo objetivos específicos, sobre a descrição da modelagem das próteses e o detalhamento do desenvolvimento dos moldes respectivamente, foram atingidos com sucesso na seção de metodologia. Todos os moldes foram impressos em 3D e testados com silicone biocompatível, cumprindo assim também o terceiro objetivo específico. Finalmente, o último objetivo específico, sobre a validação do método em três casos, pôde ser atingido pelo trabalho realizado junto ao Hospital Angelina Caron e às duas pesquisas submetidas ao Comitê de Ética da instituição, com as próteses implantadas e os questionários respondidos.

Cabe ressaltar a importância do trabalho da protesista para a execução do método descrito neste trabalho. Pessoas sem habilitação na área de prótese bucomaxilofacial não podem atender pacientes ou implantar próteses faciais. Sendo assim, o apoio de uma profissional de saúde foi crucial para o desenvolvimento do fluxo e de sua validação na prática, que é onde ele realmente faz diferença. Esta parceria foi a responsável por permitir que fosse feita a reabilitação facial das pacientes, todas atendidas pelo SUS em casos de mutilações faciais causadas pelo câncer de pele, a um baixo custo operacional para o hospital.

Sem dúvidas, a aplicação dos conceitos da engenharia na modelagem das próteses faciais é uma ação nobre e que pode ser estendida a outros ramos da área

da saúde, proporcionando tratamentos de baixo custo e boa qualidade àqueles que mais precisam.

Trabalhos futuros no ramo das próteses faciais auxiliadas por tecnologias da engenharia podem focar no reconhecimento digital de tons de pele para uma caracterização mais fiel das peças de silicone. Outro ponto é o uso de moldes impressos em resina fotossensível, outra tecnologia que têm se popularizado recentemente e gera peças dimensionalmente mais precisas do que a impressão de filamentos plásticos tradicionais.

REFERÊNCIAS

ACKERMAN, A. J.; Maxillofacial prosthesis. **Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology**, v. 6, n. 1, p. 176–200, 1953. doi: 10.1016/0030-4220(53)90152-2.

ANGLE, B. Ear anomalies. *In*: KUMAR, P.; BURTON, B. K. **Congenital malformations**: evidence-based evaluation and management. Chicago: McGraw-Hill, 2008. cap. 16, p. 111-116.

AUTODESK. **Meshmixer**. 2021. Disponível em: <https://www.meshmixer.com/>. Acesso em: 02 mai. 2021.

BAILEY, L. W.; EDWARDS, D. Psychological considerations in maxillofacial prosthetics. **The Journal of Prosthetic Dentistry**, v. 34, n. 5, p. 533–538, 1975. Elsevier BV. doi: 10.1016/0022-3913(75)90041-4.

BELMONTE, R. **Trauma da face**. 2021. Disponível em: <http://www.rafaelbelmonte.com.br/trauma-da-face/>. Acesso em: 27 abr. 2021.

BERN, M., PLASSMANN, P. Mesh generation. *In*: SACK, J. R.; URRUTIA, J. **Handbook of computational geometry**. Oxford, England: North-Holland, 1999.

BERSCH, Rita; TONOLLI, José C. **Introdução ao conceito de tecnologia assistiva e modelos de abordagem da deficiência**. Porto Alegre: CEDI - Centro Especializado em Desenvolvimento Infantil, 2006. Disponível em: <http://www.bengalalegal.com/tecnologia-assistiva>. Acesso em: 8 mar. 2020.

BLENDER FOUNDATION. **Blender Foundation**. Disponível em: <https://www.blender.org/about/foundation/>. Acesso em: 20 nov. 2021.

BOCKEY, Sophia.; *et al.* Computer-aided design of facial prostheses by means of 3D-data acquisition and following symmetry analysis. **Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery**, v. 46, n. 8, p. 1320–1328, 2018. doi: 10.1016/j.jcms.2018.05.020.

BRYDEN, D. **CAD and rapid prototyping for product design**. London, England: Laurence King Publishing, 2014.

BUSHONG, Stewart Carlyle. **Ciência radiológica para tecnólogos**. 9. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. 728 p.

CARVALHO, Gabriella D.; *et al.* Prótese bucomaxilofacial: a odontologia além da boca. **Archives of Health Investigation**, v. 8, n. 6, 2019. doi: 10.21270/archi.v8i6.3223.

CARVALHO, Karla E. C. DE; GOIS JÚNIOR, Miburge B.; SÁ, Katia N. Tradução e validação do Quebec User Evaluation of Satisfaction with Assistive Technology (QUEST 2.0) para o idioma português do Brasil. **Revista Brasileira de Reumatologia**, v. 54, n. 4, p. 260–267, 2014. doi: 10.1016/j.rbr.2014.04.003.

CARVALHO, S.; ORLANDO, S.; CORSETTI, A. Reabilitação protética bucomaxilofacial: revisão de literatura e relato de caso. **Rev. Fac. Odontol. Porto Alegre**, v. 59, n. 2, jul./dez., 2018.

CHOONG, Y. Y. C.; TAN, H. W.; PATEL, D. C.; *et al.* The global rise of 3D printing during the COVID-19 pandemic. **Nature Reviews Materials**, v. 5, n. 9, p. 637–639, 2020.

CRERAND, C. E.; SARWER, D. B.; KAZAK, A. E.; CLARKE, A.; RUMSEY, N. Body Image and Quality of Life in Adolescents with Craniofacial Conditions. **The Cleft Palate-Craniofacial Journal**, v. 54, n. 1, p. 2–12, 2017. SAGE Publications. doi: 10.1597/15-167.

CRO-SP - Conselho Regional de Odontologia de São Paulo. **Prótese bucomaxilofacial**. 2021. Disponível em: http://www.crosp.org.br/camara_tecnica/apresentacao/20.html. Acesso em: 28 abr. 21

CTI. **InVesalius**. 2021. Disponível em: www.cti.gov.br/invesalius. Acesso em: 01 mai. 2021.

DA SILVA, Anna K. B. **Para uma psicossociologia da máscara**: sobre curativos, óculos e próteses faciais na trajetória de vida de pessoas que passaram por mutilações na face. 2008. 150 f. Dissertação (Mestrado em Psicologia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

DASSAULT SYSTÈMES. **SolidWorks**. 2021. Disponível em: <https://www.solidworks.com/>. Acesso em: 20 mai. 2021.

DE SOUSA, A. Psychological issues in acquired facial trauma. **Indian Journal of Plastic Surgery**, v. 43, n. 2, p. 200, 2010. Georg Thieme Verlag KG. doi: 10.4103/0970-0358.73452.

deformidade in **Dicionário Infopédia de Termos Médicos**. Porto: Porto Editora, 2021. Disponível em: <https://www.infopedia.pt/dicionarios/termos-medicos/deformidade>. Acesso em: 27 abr. 2021.

DROPKIN, M. J. Body image and quality of life after head and neck cancer surgery. **Cancer Practice**, v. 7, n. 6, p. 309–313, 1999. Wiley. doi: 10.1046/j.1523-5394.1999.76006.x.

ELIAS, Norbert. **A sociedade dos indivíduos**. Rio de Janeiro: Zahar, 1994.

EMBODI3D. **Embodi3D Home Biomedical 3D Printing**. Disponível em: <<http://embodi3d.com>>. Acesso em: 11/12/2021.

FRANCO, Felipe M.; FOGGIATTO, José A.; BARCZYSZYN, Karin; Método virtual para criação de próteses faciais de silicone com molde impresso 3D. *In: XXV Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR*. Toledo. 2020. Disponível em: <https://eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2020/paper/view/6727>. Acesso em: 8 mar. 2021.

FRANCO, Felipe M.; BARCZYSZYN, Karin; FOGGIATTO, José A.; Método para a confecção de próteses faciais de silicone usando moldes fabricados por impressão 3D. *In: Tecnologia Assistiva: projetos e aplicações*. Canal 6 Editora, 2021.

GODINHO, Francisco Alexandre Ferreira Biscaia. **Uma nova abordagem para a formação em engenharia de reabilitação em Portugal**. 2010. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2010. Disponível em: https://repositorio.utad.pt/bitstream/10348/572/1/Phd_fafbgodinho.pdf. Acesso em: 8 mar. 2021.

GODOY, Andres; *et al.* How facial lesions impact attractiveness and perception: differential effects of size and location. **The Laryngoscope**, v. 121, n. 12, p. 2542–2547, 2011. doi: 10.1002/lary.22334.

LOPES, C. I. A. **Estudo de materiais utilizando imagens de tomografia computadorizada para o desenvolvimento de objetos simuladores**. 2016. 55 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

LUHMANN, T.; ROBSON, S.; KYLE, S.; BOEHM, J. **Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging**. 2. ed. Berlim: De Gruyter, 2013.

MORAES, C. **Protocolo de Fotogrametria da Face**. 2020. Disponível em: http://www.ciceromoraes.com.br/doc/pt_br/OrtogOnBlender/Fotogrametria_Face.html. Acesso em: 01 mai. 2021.

NEVES A. C. C.; PATROCÍNIO, M. C.; MURGO, D. A.; CAMPOY, C. D.; HANGAI F; Prótese facial extensa. **Revista Ibero-americana de Prótese Clínica & Laboratorial** 2004; 6(34):545-7. 2004.

OBUDHO, B. **Is PLA Food Safe?**. 2020. Disponível em: <https://all3dp.com/2/is-pla-food-safe-what-you-really-need-to-know>. Acesso em: 02 mai. 2021.

OLADAPO, B. I.; ZAHEDI, S. A.; ISMAIL, S. O.; *et al.* 3D printing of PEEK–chAp scaffold for medical bone implant. **Bio-design and manufacturing**, v. 4, n. 1, p. 44–59, 2021.

PAWAR, R. P.; TEKALE, S. U.; SHISODIA, S. U.; TOTRE, J. T.; DOMB, A. J. Biomedical Applications of Poly(Lactic Acid). **Recent Patents on Regenerative Medicine**, v. 4, n. 1, p. 40–51, 2014. Bentham Science Publishers Ltd. doi: 10.2174/2210296504666140402235024.

REAL LIFE FACES. **Nose prosthesis before & after**. 2021. Disponível em: <https://reallifefaces.com/reallifefaces-nasal-prosthetics-nose-prosthesis-artificial-nose/>. Acesso em: 16 mar. 2021.

SANTANA, L.; ALVES, J. L.; SABINO NETTO, A. DA C.; MERLINI, C. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 4, 2018. FapUNIFESP (SciELO). doi:10.1590/s1517-707620180004.0601.

SMOOTH-ON. **Dragon skin series, high performance silicone rubber**. Disponível em: <https://www.smooth-on.com/product-line/dragon-skin/>. Acesso em: 20 nov. 2021.

STATISTA. **Most used 3D printing technologies 2020**. 2020. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies>. Acesso em: 02 mai. 2021.

VAN GESTEL, N.; CUYPERS, S.; BLEYS, P.; KRUTH, J.-P. A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 47, n. 3–4, p. 336–342, 2009. Elsevier BV. doi: 10.1016/j.optlaseng.2008.06.001.

VENTOLA, C. L. Medical applications for 3D printing: Current and projected uses. **P & T: a peer-reviewed journal for formulary management**, v. 39, n. 10, p. 704–711, 2014.

VOLPATO, N.; CARVALHO, J. **Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D**. In: VOLPATO, Neri. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D**. São Paulo: Editora Blucher, 2017. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521211518/>. Acesso em: 02 mai. 2021

WAKE, N.; ALEXANDER, A. E.; CHRISTENSEN, A. M.; *et al.* Creating patient-specific anatomical models for 3D printing and AR/VR: a supplement for the 2018 Radiological Society of North America (RSNA) hands-on course. **3D printing in medicine**, v. 5, n. 1, p. 17, 2019.

APÊNDICE A - Questionário de Pesquisa – Próteses Virtuais

INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS

Título do Projeto: “*Uso de imagens tomográficas para a modelagem 3D de moldes para próteses faciais*”.

CAAE 40889820.5.0000.5226

PRÉ-MODELAGEM			
Caso nº <i>(1 a 10)</i>			
Número de cortes no arquivo DICOM <i>Considerar sequência utilizada na modelagem</i>			
Região do rosto afetada pela lesão	<input type="checkbox"/> Nariz	<input type="checkbox"/> Orelha	<input type="checkbox"/> Olho

PÓS-MODELAGEM		
Foi possível a utilização da TC para a modelagem da prótese?	<input type="checkbox"/> Sim	<input type="checkbox"/> Não, Motivo: _____
Pontue a prótese modelada nos seguintes quesitos, de 1 (ruim) a 10 (bom):		
Harmonia Facial <i>Avaliar a aparência geral da prótese implantada no rosto virtual</i>		
Cobertura da Lesão <i>Avaliar se a prótese cobriu toda a lesão facial de forma a esconder cicatrizes, orifícios, entre outras imperfeições</i>		
Qualidade das Bordas <i>Avaliar as bordas da prótese, levando em conta a naturalidade do resultado e a espessura da borda</i>		
Modelagem Funcional <i>Avaliar a modelagem interna de narinas, canais auditivos e olhos, quanto à qualidade, obstrução ou outras características funcionais.</i>		
ANÁLISE CLÍNICA		
A prótese modelada virtualmente foi considerada uma opção viável pela protesista?	<input type="checkbox"/> Sim	<input type="checkbox"/> Não, Motivo: _____
Nota da Protesista <i>1 a 10</i>		
Comentários da Protesista <i>Caso necessário</i>	_____ _____ _____	

APÊNDICE B - Questionário de Pesquisa - Implantações

INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS

Título do Projeto: “*Validação de uma sistemática para a confecção de próteses faciais de silicone usando tecnologias de baixo custo*”.

CAAE 48174521.3.0000.5226

Recurso tecnológico: Prótese facial modelada virtualmente

Nome do(a) paciente: _____

Data da avaliação: _____

O objetivo deste questionário QUEST modificado é avaliar o grau de satisfação do paciente com sua prótese facial e os serviços que lhe foram prestados. Para cada um dos 6 itens, avalie a satisfação do paciente com o recurso de tecnologia assistiva e os serviços relacionados, usando a seguinte escala de 1 a 5:

1	2	3	4	5
Insatisfeito(a)	Pouco satisfeito(a)	Mais ou menos satisfeito(a)	Bastante satisfeito(a)	Totalmente satisfeito(a)

Circule ou marque o número que melhor descreve o grau de satisfação com cada um dos 6 itens. Não deixe nenhuma pergunta sem resposta. Em caso de algum item marcado fora da escala 4 ou 5, comente na seção comentários.

Nos diga o que achou das seguintes características da prótese:	Grau de Satisfação				
	1	2	3	4	5
Formato (como está o tamanho, forma, beleza?)					
Peso (está leve ou pesada?)					
Facilidade de retirar e recolocar					
Estabilidade (fica fixa ou fica se movendo?)					
Conforto (incomoda no uso ou é confortável?)					
Atende às necessidades?					

Comentários: _____
