



# Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

## **Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares**

Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica  
Especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos

Autor

**Francisco Ganhão dos Santos**

Orientador

**Cândida Maria dos Santos Pereira Malça**

Coimbra, Janeiro de 2025



INSTITUTO POLITÉCNICO  
DE COIMBRA



## **RESUMO**

O projeto apresentado nesta tese envolve o desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com um scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares. O método convencional para criar estes moldes baseia-se na injeção de silicone no canal auditivo, um processo que acarreta riscos para o paciente como a permanência de resíduos de silicone ou até danos na membrana timpânica. Para evitar estes riscos, este projeto apresenta um dispositivo inovador que permitirá captar a geometria do canal auditivo através de um scanner de alta precisão. As imagens adquiridas pelo scanner serão submetidas a um procedimento de processamento de imagem, com recurso a um software apropriado para o efeito, permitindo a geração de um modelo CAD 3D detalhado do canal auditivo. Tal modelo permitirá, posteriormente, a impressão 3D direta do molde auricular. Esta abordagem visa aumentar a segurança do paciente, eliminando os riscos associados à injeção de silicone e simplificando o processo de fabrico, reduzindo o tempo como o custo de produção de próteses auditivas personalizadas. Adicionalmente, o dispositivo desenvolvido oferece uma nova abordagem no que concerne à precisão e fiabilidade no estabelecimento de diagnósticos auriculares. O projeto incluiu as fases de conceção, prototipagem e testes, sendo os ensaios de validação realizados para avaliar a eficácia e precisão do sistema desenvolvido, garantindo a fiabilidade dos resultados e otimizando o seu desempenho. O objetivo final é proporcionar uma solução abrangente para melhorar a prática dos cuidados audiológicos.

**Palavras-chave:** vídeo-otoscópio, impressão 3D, geometria do canal auditivo, modelação CAD, moldes auditivos.

## **ABSTRACT**

The project presented in this thesis involves the development and construction of a video otoscope with an integrated scanner for 3D printing of ear molds. The conventional method for creating these molds relies on injecting silicone into the ear canal, a process that poses risks to the patient, such as residual silicone or even damage to the eardrum. To mitigate these risks, this project introduces an innovative device that captures the geometry of the ear canal using a high-precision scanner. The images acquired by the scanner undergo image processing through appropriate software, enabling the generation of a detailed 3D CAD model of the ear canal. This model subsequently allows for the direct 3D printing of the ear mold. This approach aims to enhance patient safety by eliminating the risks associated with silicone injection and simplifying the manufacturing process, thereby reducing both the time and cost of producing personalized hearing aids. Additionally, the developed device offers a novel approach in terms of precision and reliability in establishing auditory diagnoses. The project included the phases of design, prototyping, and testing, with validation trials conducted to assess the effectiveness and accuracy of the developed system, ensuring reliable results and optimizing its performance. The goal is to provide a comprehensive solution to improve audiological care practices.

**Keywords:** video-otoscope, 3D printing, ear canal geometry, CAD modeling, hearing aid molds.

## **AGRADECIMENTOS**

À Prof.<sup>a</sup> Doutora Cândida Malça, manifesto a minha profunda gratidão pela orientação e apoio constante ao longo desta jornada. A sua sabedoria, dedicação e encorajamento foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento académico e profissional.

Ao Prof. Doutor António Carvalho Santos, agradeço imensamente pela partilha de conhecimento e pelas valiosas contribuições que enriqueceram esta tese. A sua disponibilidade e conselhos foram indispensáveis para ultrapassar os desafios encontrados.

À Prof.<sup>a</sup> Doutora Carla Moura, um agradecimento especial pelo apoio imprescindível na impressão 3D das peças. A sua dedicação e conhecimento técnico foram fundamentais para a concretização desta etapa do trabalho.

À Prof.<sup>a</sup> Doutora Carla Matos, expresso a minha gratidão pelo suporte dedicado na execução dos ensaios de validação. A sua atenção ao detalhe e as suas orientações foram determinantes para garantir o rigor e o sucesso desta fase.

Aos meus amigos, pela companhia e incentivo nos momentos de maior exigência, e à minha família, pelo apoio incondicional e por acreditarem sempre nas minhas capacidades, deixo a mais sincera gratidão.

Por fim, à Telma, um especial agradecimento pelo carinho, paciência e motivação constante. A sua presença foi essencial em cada etapa desta jornada.

A todos, o meu muito obrigado!

## ÍNDICE

Resumo .....	i
<i>Abstract</i> .....	ii
Agradecimentos .....	iii
Índice.....	iv
Índice de figuras.....	vi
Lista de siglas e acrónimos .....	viii
1 Introdução .....	9
1.1 Enquadramento e Motivação .....	9
1.2 Objetivos .....	9
1.2.1 Objetivo Geral: .....	9
1.2.2 Objetivos Específicos: .....	10
1.3 Estrutura da Tese .....	10
2 Revisão Bibliográfica .....	12
2.1 Avanços e Aplicações em Audiologia: Da Perda Auditiva à Reabilitação Cognitiva e Motora.....	12
2.2 Desafios e Inovações na Adaptação de Aparelhos Auditivos: Do Molde Convencional ao Molde Digital .....	14
2.3 Fundamentos e Técnicas para Auriculares Personalizados: Avaliação, Material e Tipo .....	22
2.4 Identificação das Lacunas nos Sistemas de Digitalização Auricular Disponíveis.....	26
2.5 Softwares para Reconstrução 3D e Diagnóstico Auditivo Baseados em Inteligência Artificial .....	27
2.5.1 Meshroom: Software de Fotogrametria <i>Open-Source</i> .....	27
2.5.2 COLMAP: Software para Reconstrução 3D.....	28
2.5.3 Softwares de Reconhecimento de Patologias do Ouvido através de Inteligência Artificial.....	29
2.5.4 Aplicação Potencial dos Softwares na Solução Proposta.....	29
3 Desenvolvimento e conceção de um novo conceito de Vídeo-otoscópio .....	31
3.1 Descrição do Conceito .....	31
3.2 Design e Engenharia do Protótipo .....	31
3.3 Considerações Finais .....	41
4 Ensaios de Validação e Otimização do Equipamento .....	42
4.1 Descrição e Análise dos Ensaios de Validação .....	42
4.2 Propostas de Otimização .....	46
4.3 Considerações Finais .....	47

*Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para  
impressão 3D de moldes auriculares*

5	Conclusões e Trabalhos Futuros .....	48
	Referências bibliográficas .....	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figure 2.1 - Inserção do silicone no ouvido (Fonte: IStock, 2018).....	15
Figure 2.2 - Scanner auricular Otoscan (Fonte: Natus, 2024).....	17
Figure 2.3 - Scanner auricular Otoscan durante uma digitalização (Fonte: The Hearing Review, 2021).....	18
Figure 2.4 - Representação esquemática do ouvido (Fonte: Depositphotos, 2022). .....	19
Figure 2.5 - Sistema de Digitalização 3D Lantos (Fonte: Pinterest, 2013).....	19
Figure 2.6 - Representação esquemática do funcionamento do scanner 3D Lantos dentro do ouvido (Fonte: Audiologyonline, 2019).....	20
Figure 2.7 - Scanner 3D Artec Space Spider (Fonte: Artec3d, 2024). ....	21
Figure 2.8 - TinyScan360° próximo do canal auditivo e reconstrução 3D de um ouvido (Fonte: AIT, 2024). ....	21
Figure 2.9 - Estrutura interna do TinyScan360° (Fonte: AIT, 2024).....	22
Figure 2.10 - Relação da dureza dos materiais com a idade recomendada do utilizador (Fonte: Audiologyonline, 2018). ....	23
Figure 2.11 - Tipos de moldes auriculares e respetivas notas (Fonte: Audiologyonline, 2018).....	25
Figure 2.12 - Tipos de moldes auriculares e respetivas notas (continuação) (Fonte: Audiologyonline, 2018).....	25
Figure 2.13 - Moldes auriculares não oclusivos (Fonte: Audiologyonline, 2018)....	26
Figure 2.14 - Desenhos avançados de moldes auriculares (Fonte: Audiologyonline, 2018).....	26
Figure 3.1 – Vista explodida do sistema de suporte.....	33
Figure 3.2 - Desenho 3D do sistema de suporte.....	34
Figure 3.3 – Conjunto de peças do sistema.....	35
Figure 3.4 – Atuador e respetivas dimensões.....	36
Figure 3.5 – Arnês ajustável para a cabeça .....	37
Figure 3.6 – Caixa do controlador.....	37
Figure 3.7 - Sistema completo utilizado nos ensaios de validação .....	38
Figure 3.8 - Detalhe do dispositivo de captura de imagens .....	39
Figure 3.9 - Desenho da estrutura 3D do vídeo-otoscópico numa fase inicial do desenvolvimento.....	39

*Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*

Figure 3.10 - Protótipo com o sistema de fixação para a cabeça.....	40
Figure 4.1 – Exemplo de imagens recolhidas do CAE.....	43
Figure 4.2 - Exemplo de imagens recolhidas do CAE (cont.).....	43
Figure 4.3 - Resultados do inquérito aos audiologistas.....	44
Figure 4.4 - Resultados do inquérito aos pacientes.....	44

## **LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS**

BTE	Behind-the-ear
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Canal Auditivo Externo
CNNs	Redes Neurais Convolucionais
CROS	Contra-lateral Routing of Signal
DICEPs	Deep-insert custom earplugs
DP	Doença de Parkinson
FDM	Fused Deposition Modeling
IA	Inteligência Artificial
IROS	Ipsilateral Routing of Signal
ITE	In-the-ear
MVS	Multi-View Stereo
PE	Polietileno
RAS	Rhythmic auditory stimulation
RIC	Receiver-In-Canal
RNNs	Redes Neurais Recorrentes
SfM	Structure-from-Motion
TM	Tympanic membrane

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 Enquadramento e Motivação**

Atualmente, uma prótese auricular para reabilitação auditiva implica a criação do molde auricular, sendo a geometria do canal auditivo externo (CAE) de cada paciente obtida pela injeção de silicone diretamente no interior do CAE. Este método é feito com o uso de seringas ou pistolas elétricas ou manuais. No entanto, tal procedimento acarreta riscos, que vão desde a permanência de resíduos de silicone no CAE até à possibilidade de perfuração da membrana timpânica e infiltração de silicone no ouvido médio, o que pode exigir uma intervenção cirúrgica. Para evitar esses problemas graves, este projeto tem como objetivo desenvolver um vídeo-otoscópio equipado com um scanner de alta precisão para capturar, em tempo real, a geometria do CAE. Com o uso de *softwares* apropriados, será possível criar um modelo CAD tridimensional do canal, que depois pode ser usado para produzir diretamente a prótese auricular através de impressão 3D, eliminando a necessidade do molde de silicone. Este novo procedimento não só evitará os riscos associados à injeção de silicone, mas também permitirá a produção direta da prótese a partir do modelo CAD. Adicionalmente, o equipamento desenvolvido permitirá, como recurso a metodologias de inteligência artificial (IA) o estabelecimento de diagnósticos mais precisos e a monitorização eficiente de patologias pela comparação das imagens adquiridas com outras. Assim, espera-se que a implementação deste procedimento, objeto do presente projeto, resulte na: i) eliminação dos riscos para o paciente; ii) redução significativa no tempo necessário para obter uma prótese auricular; iii) redução substancial no custo das próteses devido à eficiência do processo de produção; v) maior rigor no estabelecimento de diagnóstico; vi) monitorização de patologias e, por fim, iv) a introdução no mercado de um vídeo otoscópio com scanner integrado a um custo acessível, proporcionando melhor resolução e reprodutibilidade na análise da imagem do CAE, superando os desafios de feedback comuns no processo de reabilitação auditiva.

### **1.2 Objetivos**

#### **1.2.1 Objetivo Geral:**

Desenvolver e construir um vídeo-otoscópio com scanner integrado que permitirá: i) a construção de modelos CAD 3D que, por sua vez permitirão ii) a fabricação, por impressão 3D, de moldes auriculares personalizados e iii) obviamente permitir uma melhor visualização e inspeção do CAE em sede de diagnóstico.

### **1.2.2 Objetivos Específicos:**

1. Desenvolver um vídeo-otoscópio com scanner integrado. Este objetivo compreende duas componentes principais: i) desenvolver um sistema de suporte para o vídeo-otoscópio que funcionará como referencial para a aquisição (mapeamento) da geometria do CAE; e ii) conceber um vídeo-otoscópio que integre um ou vários scanners, capazes de realizar uma aquisição de imagem a 360 graus, para mapear com precisão a geometria do CAE.
2. Aplicar metodologias associadas à engenharia inversa no tratamento das imagens captadas, transformando-as em ficheiros no formato stl, ou outros, adequados e suficientemente precisos para a produção de moldes auriculares customizados e que, adicionalmente, permitam aplicar mecanismos de comparação de imagens para estabelecimento de diagnóstico e monitorização de patologias.
3. Validar tanto o equipamento como o procedimento desenvolvido, assegurando a rápida obtenção de moldes auriculares personalizados. Esta tecnologia será aplicável em vários domínios, e.g. saúde, desporto, uso militar, músicos, etc., bem como ao cidadão comum.

### **1.3 Estrutura da Tese**

Esta tese está organizada em seis capítulos, conforme discriminado infra:

Capítulo 1 - Introdução: Este capítulo apresenta o enquadramento do tema, a justificação para o desenvolvimento do vídeo-otoscópio com scanner integrado e os objetivos do trabalho.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica: São aqui abordados os principais conceitos relacionados à otoscopia, tecnologias aplicadas na área e trabalhos anteriores relacionados ao desenvolvimento de dispositivos similares.

Capítulo 3 - Desenvolvimento e Conceção de um Novo Conceito de Vídeo-otoscópio: Este capítulo aborda o processo de desenvolvimento e conceção do novo conceito de vídeo-otoscópio, desde a fase de análise de requisitos até à criação de soluções para superar limitações existentes. São descritas as escolhas tecnológicas, o design do dispositivo e os desafios enfrentados ao longo do processo de engenharia.

Capítulo 4 - Ensaios de Validação e Otimização do Equipamento: Neste capítulo são apresentados os ensaios de validação realizados para verificar o desempenho do vídeo-otoscópio, incluindo testes de imagem, precisão e ergonomia. É detalhado o processo de otimização do equipamento com base nos resultados e nas sugestões de melhoria obtidas nos inquéritos, propondo melhorias.

Capítulo 5 - Conclusões e Trabalhos Futuros: Este capítulo resume as principais conclusões do projeto, destacando as contribuições do novo vídeo-otoscópio para a área. São discutidas também as limitações encontradas e são apresentadas propostas

*Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*

de trabalhos futuros que visam aperfeiçoar o equipamento e explorar novas aplicações tecnológicas.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Avanços e Aplicações em Audiologia: Da Perda Auditiva à Reabilitação Cognitiva e Motora**

Compreender a etiologia por detrás da necessidade de aparelhos auditivos envolve explorar as diferentes patologias que conduzem à perda auditiva. A perda auditiva condutiva é o resultado de obstruções ou disfunções no ouvido externo ou médio que impedem as ondas sonoras de alcançar o ouvido interno. Causas comuns incluem infecções, fluido no ouvido médio, bloqueio de cera e otosclerose. O tratamento foca-se na condição subjacente, variando desde a simples remoção de cera até intervenções cirúrgicas para problemas mais complexos como o colesteatoma. A perda auditiva neurosensorial, a forma mais comum de perda auditiva irreversível, surge de danos no ouvido interno ou no nervo auditivo. Fatores como o envelhecimento, exposição excessiva a ruídos, certas doenças e predisposição genética contribuem para este tipo de perda auditiva. Dependendo da severidade, as opções de tratamento incluem aparelhos auditivos, implantes cocleares e outras tecnologias assistivas. A perda auditiva mista combina elementos de perda auditiva condutiva e neurosensorial, requerendo uma abordagem abrangente para tratar ambos os aspetos da via auditiva (Anastasiadou & Al Khalili, 2023).

A avaliação da perda auditiva envolve testes audiométricos detalhados para diagnosticar com precisão o tipo e a extensão da perda auditiva. Isso inclui audiometria de tons puros e timpanometria, juntamente com os testes de Rinne e Weber para distinguir entre componentes de perda auditiva condutiva e neurosensorial (Tanna, Lin, & De Jesus, 2023). Globalmente, a perda auditiva afeta uma parte significativa da população, com projeções indicando que quase 2,5 mil milhões de pessoas podem experimentar algum grau de perda auditiva até 2050. A prevalência sublinha a necessidade crítica de serviços de cuidados auditivos acessíveis e eficazes em todo o mundo (WHO, 2024).

Os tampões auriculares personalizados, especialmente desenhados para atividades como desportos aquáticos, tiro, música e outras aplicações, oferecem vantagens significativas em termos de conforto e proteção, aumentando consequentemente a qualidade de vida dos utilizadores. Estes tampões são feitos à medida do canal auditivo do indivíduo, garantindo um ajuste confortável e seguro que melhora a experiência do utilizador durante atividades que requerem proteção auditiva. O processo de personalização implica a recolha de impressões precisas do canal auditivo, que são depois utilizadas para fabricar tampões que proporcionam um isolamento superior do ruído enquanto mantêm o conforto. Esta abordagem individualizada não só melhora a eficácia dos tampões na proteção contra níveis de ruído prejudiciais, mas também aumenta significativamente o conforto do utilizador, potencialmente melhorando a sua qualidade de vida geral (Fligor, 2012).

## *Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*

Para músicos e frequentadores de concertos, a disponibilização de tampões auriculares personalizados representou uma mudança de paradigma. Ao contrário dos tampões genéricos, que muitas vezes abafam o som, levando a distorções e perda da fidelidade musical, estes tampões especializados são projetados para reduzir os níveis de ruído de maneira uniforme em todas as frequências. Isto permite que músicos e audiências desfrutem da música em níveis de volume mais seguros sem comprometer a qualidade do som. A tecnologia por trás destes tampões inclui filtros sofisticados que atenuam o som para níveis seguros enquanto preservam a clareza e riqueza da música. Este equilíbrio é crucial em ambientes onde a exposição à música alta é frequente e prolongada, ajudando a prevenir a perda auditiva induzida por ruído, uma preocupação comum entre músicos e frequentadores regulares de concertos (Ramakers et al., 2016).

O desenvolvimento de tampões auriculares personalizados de inserção profunda (DICEPs) representa um avanço significativo na tecnologia de proteção auditiva. Os DICEPs são projetados para se ajustarem mais profundamente no canal auditivo do que os tampões tradicionais, alcançando ou até passando a segunda curvatura do canal auditivo. Esta inserção profunda oferece várias vantagens, incluindo uma melhor atenuação do ruído e um ajuste mais estável que resiste ao deslocamento durante atividades vigorosas. Tais tampões são, particularmente, benéficos para indivíduos que trabalham em ambientes de ruído extremamente perigosos ou envolvidos em atividades onde os tampões tradicionais podem não fornecer proteção suficiente. As capacidades de atenuação do ruído dos DICEPs, que podem exceder significativamente as dos tampões padrão, são cruciais para prevenir danos auditivos a longo prazo em ambientes de alto risco (Du, Homma, & Saunders, 2008).

Na audiologia pediátrica, a ênfase nas medidas de diagnóstico e intervenções precoces para a perda auditiva destaca o papel crítico dos dispositivos personalizados tanto em contextos preventivos como terapêuticos. Tecnologias como aparelhos auditivos e implantes cocleares revolucionaram o tratamento da perda auditiva em crianças, oferecendo oportunidades para melhorias nas capacidades de comunicação e qualidade de vida desde tenra idade. A personalização na audiologia pediátrica inclui também os tampões protetores, que são adaptados às necessidades individuais de cada criança, levando em conta o tipo específico e o grau de perda auditiva. Esta abordagem personalizada garante que as crianças recebam o tratamento mais eficaz, facilitando o seu desenvolvimento e integração no mundo auditivo. O compromisso com soluções personalizadas em toda a gama de audiologia sublinha a importância do cuidado individualizado para alcançar os melhores resultados possíveis para pacientes de todas as idades (Bower et al., 2023).

Pesquisas recentes têm revelado o potencial da audiologia, principalmente por meio do uso da estimulação auditiva rítmica (RAS) e da musicoterapia, no tratamento de doenças cognitivas e degenerativas, bem como no tratamento de distúrbios patológicos.

Para pacientes com doença de Parkinson (DP) foi demonstrado que sinais auditivos rítmicos melhoram significativamente os distúrbios da marcha. Destacou-se que o RAS aumenta efetivamente o comprimento da passada, acelera a velocidade da marcha e reduz a ocorrência de eventos de congelamento durante a caminhada. Este tratamento também demonstrou melhorias nas funções motoras e na qualidade de vida dos pacientes com DP, demonstrando o seu potencial como uma intervenção benéfica juntamente com as terapias convencionais (Ye et al., 2022; Braun Janzen et al., 2022).

No domínio das doenças cognitivas e degenerativas, como a demência, a musicoterapia tem se mostrado promissora. Uma avaliação abrangente indicou que as intervenções musicais poderiam potencialmente beneficiar a função cognitiva em indivíduos que vivem com demência. Embora os ensaios tenham apresentado alta heterogeneidade, indicando resultados variados, os resultados gerais sugerem que a musicoterapia, tanto interativa quanto passiva, pode oferecer melhorias na função cognitiva. Além disso, a qualidade de vida e os estados depressivos em pacientes com demência também podem ser influenciados positivamente por intervenções musicais, embora sejam necessárias mais pesquisas para explorar estes efeitos em maior detalhe (Moreno-Morales et al., 2020).

Estas descobertas destacam as especificidades da audiologia e dos estímulos auditivos em aplicações terapêuticas além dos usos tradicionais das próteses auditivas. Ao integrar a RAS e a musicoterapia nos planos de tratamento, os profissionais de saúde podem potencializar as melhorias na qualidade de vida e nas capacidades funcionais de indivíduos com deficiências cognitivas, degenerativas ou motoras.

## **2.2 Desafios e Inovações na Adaptação de Aparelhos Auditivos: Do Molde Convencional ao Molde Digital**

A produção de moldes auriculares personalizados é uma componente crucial no processo de adaptação de dispositivos auditivos, com mais de 60% destes dispositivos a necessitar de um molde específico para garantir uma fixação adequada no ouvido do utilizador, de acordo com uma investigação recente realizada nos Estados Unidos (Stewart C, 2020). Este molde é essencial não só para assegurar um isolamento acústico eficaz, mas também para promover uma transmissão sonora de alta qualidade e evitar a perda de áudio. Para obter este molde é necessária uma impressão precisa do canal auditivo externo (CAE) e da concha auricular a qual é, posteriormente, digitalizada para criar um modelo 3D. Este modelo serve como base para a impressão aditiva do molde auricular, ao qual são integrados os componentes eletrónicos do aparelho auditivo. Uma vez montado, o aparelho é enviado de volta ao audiologista, que ajusta o dispositivo ao paciente. Contudo, se o ajuste não for perfeito, o processo de obtenção de um novo molde deve ser repetido, resultando

*Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*

em custos e tempos adicionais significativos (Covestro, 2019). Essa complexidade sublinha a necessidade de métodos mais eficientes e acessíveis no campo da audiologia.

O método tradicional para a criação de moldes do CAE envolve a inserção de uma mistura de silicone no ouvido do paciente, como mostra a Figura 2.1, à qual se adiciona um catalisador para solidificar o material e formar a geometria desejada. Este procedimento deve ser realizado em clínicas especializadas por profissionais qualificados, como audiologistas, para garantir segurança e precisão. No entanto, em casos onde o molde obtido carece de exatidão, torna-se necessário repetir o processo. A qualidade do molde pode ser comprometida por fatores como a presença excessiva de cera, infecções, ou feridas no ouvido, além da possível inexperiência do audiólogo. Estas circunstâncias não só aumentam a probabilidade de um molde inadequado, como também podem levar a complicações como inflamações, hematomas e, em casos raros, perfurações do tímpano (S.-D. Cho et al, 2021).

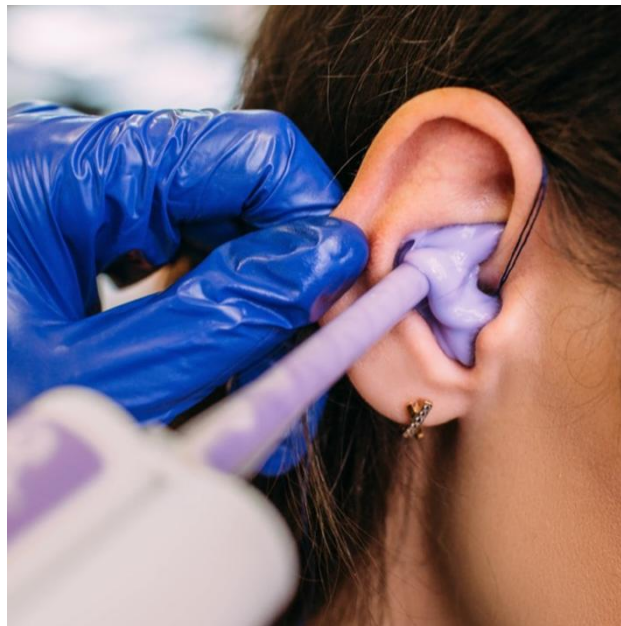


Figure 2.1 - Inserção do silicone no ouvido (Fonte: IStock, 2018).

Embora a literatura médica contenha poucos registros de lesões associadas à impressão auricular, profissionais experientes na área reconhecem os desafios significativos que o uso de silicone pode representar. A realização de impressões do CAE é vista por alguns especialistas como o procedimento mais arriscado realizado pelos audiologistas, devido à sua natureza invasiva e ao potencial para complicações inesperadas, incluindo abrasões, traumas ou lesões na membrana timpânica e nas estruturas auditivas internas (Beyer & Younker, 2011). Além disso, a existência de cavidades mastoideas ocultas pode trazer riscos graves quando preenchidas com

material de moldagem, e há relatos de moldes que ficaram retidos no ouvido, necessitando de remoção cirúrgica (S.-D. Cho et al, 2021; S. Yoshioka et al, 2017; F. Verdam et al, 2016; H.-M. Lee et al, 2017; Boer C et al, 2019). Diante destes desafios, a adoção de um método de digitalização do CAE que seja não invasivo e sem contacto direto com o ouvido surge como uma alternativa mais segura e confortável, oferecendo vantagens significativas tanto para os pacientes quanto para os profissionais da saúde auditiva.

Um estudo realizado pelo exército dos EUA, mais especificamente pelo Laboratório de Pesquisa Aeromédica do Exército dos EUA (USAARL), associou o conforto como sendo a chave para a adesão dos utilizadores que precisam de usar produtos auriculares por períodos prolongados. A pesquisa intitulada "Avaliação da Proteção Auditiva Personalizada Fabricada a partir de Digitalização de Orelhas e Métodos Tradicionais, Relatório USAARL N° 2020-06" destaca o aspeto crucial da tecnologia de proteção auditiva: a importância do conforto para garantir a adesão do utilizador por longos períodos. Este estudo apresenta uma análise comparativa entre os métodos tradicionais de criação de moldes auriculares *versus* aqueles que empregam tecnologias de digitalização de orelhas. A ênfase no conforto surge do entendimento de que quanto mais confortável for o dispositivo de proteção auditiva, mais provável é que os utilizadores o usem de forma consistente e pelas durações necessárias, especialmente em ambientes com níveis de ruído considerados como perigosos (J.R. Stefanson e W. Ahroon, 2019).

Em contextos militares, onde a exposição a ruídos altos de máquinas, veículos e armamentos é frequente, o risco de dano auditivo é uma preocupação constante. Os métodos tradicionais de criação de moldes auriculares, embora eficazes até certo ponto, podem nem sempre proporcionar o melhor ajuste para cada indivíduo, deixando potencialmente lacunas que podem reduzir a eficácia da proteção auditiva e levar a desconforto com o tempo. Por outro lado, a digitalização do CAE promete uma abordagem mais personalizada, oferecendo um ajuste preciso que não só aumenta o conforto, mas também melhora a eficácia da proteção ao minimizar a fuga de som. O foco do estudo no conforto é um apelo à ação para investir em tecnologias e metodologias avançadas. Ao adotar uma abordagem mais personalizada para a proteção auditiva, baseada na anatomia única do CAE de um indivíduo, existe um potencial para melhorar significativamente os esforços de conservação auditiva. Tais avanços poderiam ser particularmente impactantes na prevenção da perda auditiva induzida por ruído, um problema prevalente em ambientes onde os riscos de ruído ocupacional são inevitáveis. Esta abordagem está alinhada com estratégias mais amplas de saúde e segurança que priorizam o bem-estar e a prontidão operacional de indivíduos em ambientes intensivos em ruído (J.R. Stefanson e W. Ahroon, 2019).

Recentemente, eliminando a necessidade de moldes físicos, foram desenvolvidas novas tecnologias alternativas à tradicional impressão auricular. Uma dessas inovações é o Otoscan da Otometrics, um scanner auricular 3D portátil capaz de criar impressões 3D digitais do ouvido. Todavia, o Otoscan ainda requer a

## *Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*

introdução de uma sonda no canal auditivo, o que pode causar desconforto ao paciente. Além disso, para manusear eficazmente o Otoscan, é necessária uma aprendizagem aprofundada sobre o funcionamento do equipamento, o que levou a sua comercializadora, a Otometrics, a criar um programa de treino com 27 módulos, incluindo vídeos e questionários, para capacitar os profissionais de saúde no uso do aparelho (Phillips J, 2019). De acrescentar ainda que o sistema Otoscan tem um custo elevado, cerca de 12 500 dólares, mais 1 250 dólares para acesso ao portal OTOcloud, que inclui serviços de armazenamento de dados, pedidos, atualizações de *software* e manutenção do dispositivo, tornando o seu uso limitado em clínicas com recursos financeiros reduzidos (Chell A, 2019).

Embora o uso de lasers para imagens 3D seja uma prática consolidada em diversas indústrias, a aplicação desta tecnologia na replicação das complexidades do CAE só recentemente foi pesquisada e implementada. Dispositivos de digitalização auricular, como o Otoscan e a instrumentação Lantos, empregam técnicas de mapeamento 3D a laser para criar uma imagem digital precisa do canal auditivo à semelhança do que é prática corrente dos dentistas na construção de implantes dentários personalizados (Strom, 2012).

O scanner auricular Otoscan, ilustrado nas Figura 2.2 e 2.3, emite impulsos de luz a laser e regista as suas reflexões para calcular a distância percorrida. Com recurso a um *software* adequado, o *scanner* compila milhões de pontos de dados para reproduzir a geometria da orelha e criar a imagem. Quanto mais completa for a digitalização, mais precisa é a representação geométrica do sistema digitalizado (Strom, 2012).



Figure 2.2 - Scanner auricular Otoscan (Fonte: Natus, 2024).



Figure 2.3 - Scanner auricular Otoscan durante uma digitalização (Fonte: The Hearing Review, 2021).

Na interface do *software* Otoscan, conforme mostrado na Figura 2.4, a área digitalizada da orelha muda frequentemente de cor à medida que a digitalização percorre o canal auditivo. O procedimento completo demora cerca de 2 a 3 minutos. A digitalização do canal auditivo é a etapa inicial, com o laser de anel orientando mais luz para os lados, mapeando rapidamente as paredes do canal auditivo. Para o pavilhão, o *scanner* utiliza um sinal mais amplo voltado para a frente, capturando toda a forma dessa área mais plana. A antélice e a fossa triangular, ilustradas na Figura 2.4, são digitalizadas usando a tecnologia de laser de anel para capturar os detalhes mais finos dessa área ampla. Após a conclusão destas três etapas, a digitalização é considerada completa e a imagem pode ser armazenada num servidor remoto (Strom, 2012).

O Sistema de Digitalização 3D Lantos, mostrado na Figura 2.5, emprega tecnologia inovadora para criar modelos 3D precisos do canal auditivo. O sistema tem como base uma membrana especial que é crucial para o processo de digitalização. Para começar, esta membrana, juntamente com uma solução, é colocada no *scanner*. O operador, então, insere a câmara equipada com a membrana no canal auditivo. Uma característica importante da membrana é a sua janela transparente, permitindo a visualização direta do canal auditivo durante a inserção, garantindo um posicionamento e navegação precisos da câmara dentro do ouvido. No ecrã de exibição, os operadores são auxiliados por um círculo amarelo que serve como um guia visual para alinhar corretamente a câmara com o anel da membrana timpânica (TM). Este círculo atua como um medidor de distância, indicando em que momento é que a câmara está aproximadamente a quatro ou cinco milímetros de distância do TM, facilitando o posicionamento preciso sem ocorrência de contato direto (Gregoret, 2019).

*Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*

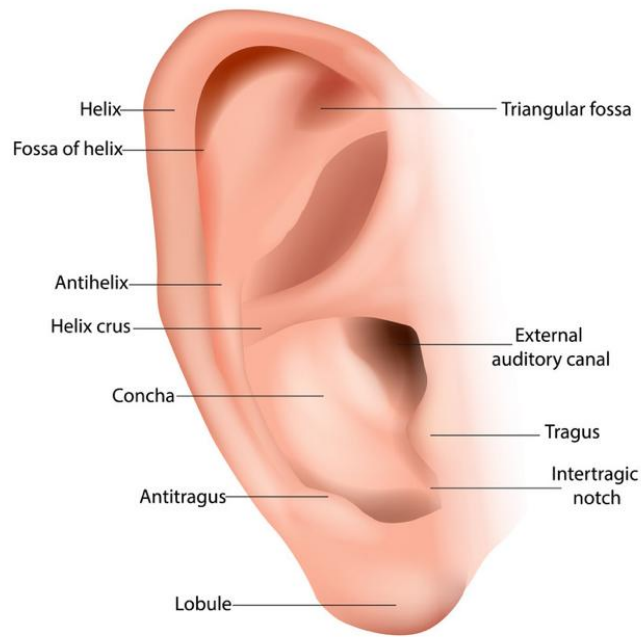


Figure 2.4 - Representação esquemática do ouvido (Fonte: Depositphotos, 2022).



Figure 2.5 - Sistema de Digitalização 3D Lantos (Fonte: Pinterest, 2013).

Ao alcançar a profundidade ótima, a membrana expande com uma solução vermelha à base de água enquanto a câmara simultaneamente retrai. A câmara emite uma luz azul, como mostra a Figura 2.6, fazendo com que o interior da membrana se ilumine de amarelo devido às suas propriedades fluorescentes. Este brilho amarelo, em combinação com a solução vermelha, permite que o scanner meça com precisão a

distância da ponta da câmara até à superfície interna da membrana, que está posicionada próxima à superfície do ouvido. Esta interação complexa de luz e cor é essencial para capturar medidas precisas do interior do canal auditivo. Este método faz a captura de uma série de imagens 2D que são então transformadas num modelo 3D com o auxílio do *software* LantosView. Este *software* desempenha um papel crítico neste processo, convertendo as imagens 2D numa varredura 3D coesa, unindo-as, semelhante à criação de uma foto panorâmica, mas em três dimensões. Esta abordagem abrangente garante que as estruturas intrincadas do ouvido sejam representadas com precisão no modelo 3D final, permitindo a criação de dispositivos auriculares perfeitamente ajustados (Gregoret, 2019).

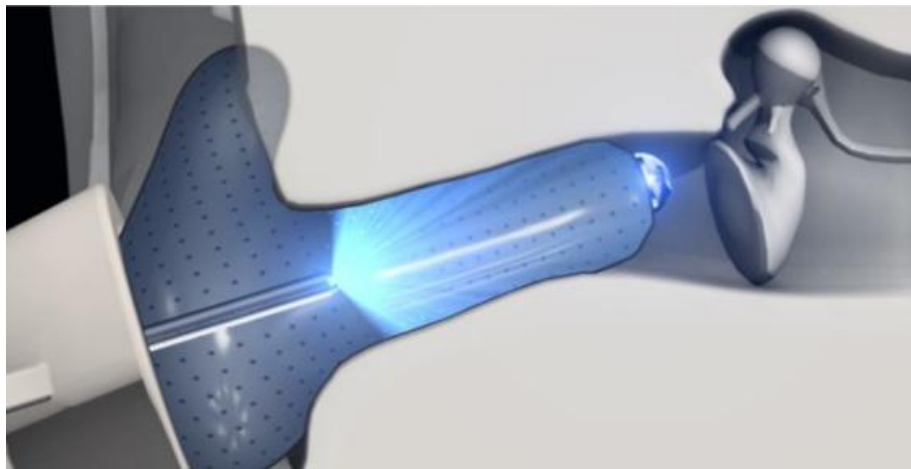


Figure 2.6 - Representação esquemática do funcionamento do scanner 3D Lantos dentro do ouvido (Fonte: Audiologyonline, 2019).

O Artec Space Spider da Artec 3D, mostrado na Figura 2.7., é outra tecnologia comercialmente disponível. Esta tecnologia integra um scanner 3D portátil que utiliza luz azul estruturada para digitalizar objetos pequenos, como chaves, moedas ou orelhas humanas, transformando-os em modelos 3D. Um caso de estudo da Artec 3D destacou o uso do Artec Space Spider para digitalizar a estrutura externa de um ouvido, com o objetivo de criar próteses auriculares personalizadas para casos de deformidade (McMillion M, 2021). Este dispositivo, acompanhado do *software* Artec Studio para processamento e renderização das digitalizações, tem um custo elevado de cerca de 24 800 dólares, o que pode limitar o seu uso em ambientes com menos recursos (Europe A, 2018).

Outra inovação é o TinyScan360°, um dispositivo projetado para a medição de canais auditivos. Este scanner já foi testado com sucesso e demonstrou ser extremamente útil para o ajuste de aparelhos auditivos modernos, permitindo uma personalização fácil e individualizada para o utilizador. A capacidade do TinyScan360° de medir com precisão espaços tão pequenos quanto o canal auditivo, como mostra a Figura 2.8, ilustra bem a flexibilidade e a eficácia destas tecnologias

*Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*

em aplicações médicas. O sistema de medição estereoscópico 3D, com um diâmetro de design de apenas 3 mm, permite a medição, visualização e reconstrução 3D, sem contato, de objetos pequenos como tubos e furos com diâmetros inferiores a 10 mm (AIT Austrian Institute of Technology GmbH, 2023).



Figure 2.7 - Scanner 3D Artec Space Spider (Fonte: Artec3d, 2024).



Figure 2.8 - TinyScan360° próximo do canal auditivo e reconstrução 3D de um ouvido (Fonte: AIT, 2024).

O TinyScan360° é notável não apenas pelo seu tamanho compacto, mas também pela sua capacidade de capturar imagens de superfícies com texturas fracas ou ausentes. Isso é possível graças a um projetor de padrão de luz estática adaptado especificamente para aplicações de medição 3D. Além disso, o seu design modular permite a combinação de várias cabeças de sensores para medições em diferentes direções, enquanto um sistema de câmara orientadora assegura a máxima precisão

de medição, como se pode ver na Figura 2.9. Esta capacidade de realizar medições portáteis de superfície 3D a uma distância entre 3 mm e 10 mm do objeto é um marco significativo na tecnologia de medição. A miniaturização do sensor 3D, como exemplificado pelo TinyScan360°, torna possível inspecionar locais anteriormente inacessíveis a outros sensores. A capacidade de medir e visualizar objetos pequenos, como tubos e furos com um diâmetro superior a 5 mm, destaca a versatilidade e a aplicabilidade desta tecnologia numa ampla gama de contextos (AIT Austrian Institute of Technology GmbH, 2023).

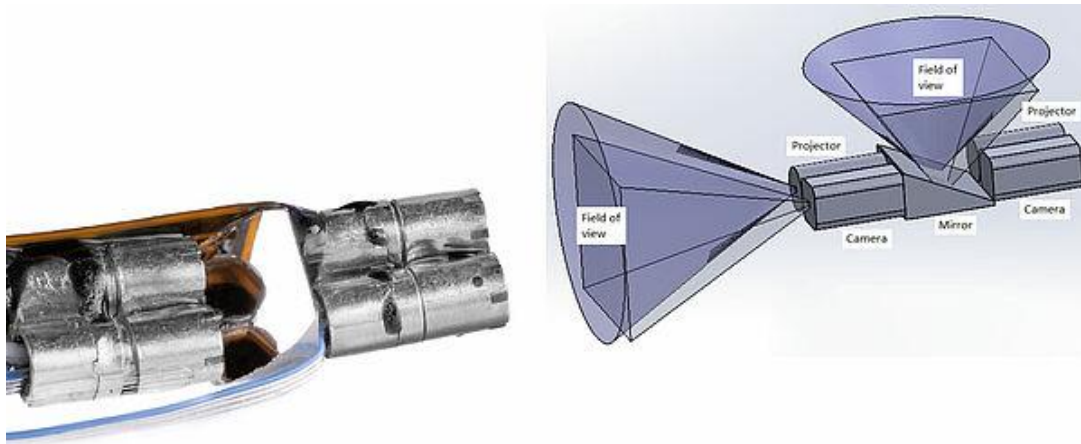


Figure 2.9 - Estrutura interna do TinyScan360° (Fonte: AIT, 2024).

### 2.3 Fundamentos e Técnicas para Auriculares Personalizados: Avaliação, Material e Tipo

Para um aparelho auditivo personalizado é essencial uma peça que liga o dispositivo ao canal auditivo, tanto em termos acústicos como físicos. Nos aparelhos auditivos que se situam atrás da orelha (BTE), esta peça denomina-se molde auricular; já nos aparelhos intra-auriculares (ITE), trata-se de uma concha auricular. Os moldes podem ser feitos de diversos materiais como silicone, acrílico e vinil, apresentando cada um destes materiais vantagens e desvantagens. A escolha acertada do material e da sua viscosidade é crucial para o sucesso do molde. Os moldes são desenhados para assegurar uma vedação acústica eficaz no canal auditivo, evitando feedback acústico. A viscosidade do material não é um indicador de qualidade, uma vez que existe uma grande variação entre os produtos disponíveis. Ao selecionar o material, é importante considerar aspetos como a contração, o alívio de tensões e a durabilidade. O silicone de impressão tem tipicamente um prazo de validade de um ano, não devendo ser usado após essa data (C. Pirzanski, 2006).

Um auricular personalizado é um dispositivo desenhado para direcionar o som de um aparelho auditivo através do canal auditivo. Para atingir os objetivos deste dispositivo, é necessário avaliar quatro fatores-chave: a qualidade da impressão, a escolha do material, o estilo e a acústica do auricular. Os objetivos de um auricular

*Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*

personalizado incluem garantir uma vedação acústica adequada, retenção no ouvido, modificação acústica do sinal, conforto e estética agradável. Estas são as vantagens dos auriculares personalizados em comparação com as peças universais (O. Uslu, 2018).

A qualidade da impressão auricular é vital para o sucesso do auricular personalizado. Impressões de má qualidade podem levar a problemas de vedação, conforto e retenção. A seleção do material do auricular varia consoante a idade do paciente e a textura do pavilhão auricular. Materiais mais macios são recomendados para crianças, enquanto os mais duros são preferíveis para idosos. A Figura 2.10 mostra materiais utilizados e a relação da sua dureza com a idade recomendada. O material deve ser escolhido tendo em conta a facilidade de limpeza, as atividades do paciente e possíveis alergias, como por exemplo:

- Vinil macio: Ideal para bebés, mas tende a encolher ao longo do tempo.
- Silicone: Versátil e duradouro, apropriado para adultos.
- Vinil duro: Adequado para idosos, pois pode ser cimentado.
- Acrílico: Transparente, apropriado para dispositivos RIC (Receptor-In-Canal).
- Polietileno (PE): Altamente hipoalergénico, mas disponível apenas em bege opaco.
- Combinação de Materiais: Por vezes, dois materiais são usados em conjunto para um ajuste ideal. Por exemplo, um material rígido na concha para retenção e um mais macio no canal para melhor vedação.

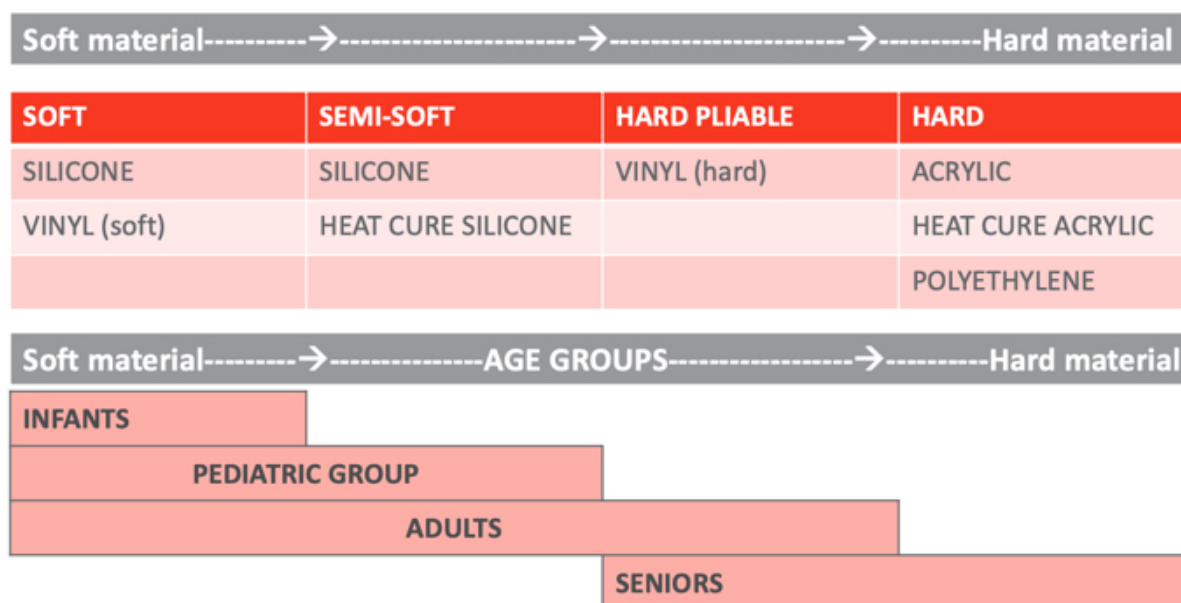


Figure 2.10 - Relação da dureza dos materiais com a idade recomendada do utilizador (Fonte: Audiologyonline, 2018).

A seleção de moldes auriculares é um aspeto crítico na adaptação de aparelhos auditivos de tipo BTE, abordando tanto desafios físicos como acústicos que os pacientes podem enfrentar. Existem principalmente dois tipos de estilos de moldes auriculares: oclusivos e não oclusivos, cada um servindo necessidades distintas dos pacientes com base no seu grau de perda auditiva, forma do canal auditivo e preferências pessoais.

Os moldes auriculares oclusivos são essenciais para indivíduos com perda auditiva severa a profunda ou para pacientes pediátricos. Nas Figuras 2.11 e 2.12 estão representados estes moldes e algumas observações de utilização. Estes moldes selam completamente o canal auditivo, aumentando a eficácia do aparelho auditivo. Entre os estilos oclusivos, os moldes de canal são populares devido ao seu design menos visível e selagem eficaz, embora a sua retenção possa ser um problema em canais retos. Os moldes de concha oferecem uma alternativa com melhor retenção, mas são mais visíveis. Os estilos Canal-Lok combinam a invisibilidade dos moldes de canal com retenção adicional, tornando-os uma escolha preferida por razões estéticas, apesar dos potenciais desafios para utilizadores pela primeira vez. O molde esqueleto é uma opção para aqueles preocupados com a aparência, com o seu design minimizando a visibilidade enquanto aborda questões de inserção e retenção. Para pacientes com formas únicas de orelha ou problemas de destreza, os moldes auriculares podem ser personalizados. Por exemplo, moldes semi-esqueleto ou Canal-Lok com secções de hélice modificadas são recomendados para indivíduos com uma borda de concha plana, melhorando o ajuste e conforto. Além disso, para pacientes com movimento mandibular excessivo, moldes auriculares feitos de materiais mais macios com canais escavados podem manter uma selagem segura enquanto acomodam movimentos da mandíbula.

Os moldes auriculares não oclusivos, ilustrados na Figura 2.13, por outro lado, são projetados para um ajuste aberto, permitindo que o som natural se misture com o som amplificado, adequados para pacientes com perda auditiva leve a moderada ou aqueles com drenagem crónica do ouvido, pois promovem a aeração do canal.

Desenhos avançados de moldes auriculares como os estilos CROS atendem a estratégias de adaptação específicas, reduzindo as frequências baixas para ajustes CROS e IROS e estão disponíveis em diferentes materiais e desenhos para melhorar a retenção e conforto. Moldes de Campo Livre e estilos IROS com as maiores ventilações suportam aparelhos auditivos de tubo fino ou estilo RIC, oferecendo um ajuste aberto para maximizar a qualidade do som natural enquanto controlam o feedback.

Alguns desenhos avançados de moldes auriculares estão ilustrados na Figura 2.14. A seleção do estilo, material e design do molde auricular é, portanto, um fator chave na personalização da adaptação do aparelho auditivo às necessidades do indivíduo, garantindo tanto o desempenho quanto o conforto (O. Uslu, 2018).

*Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*






	STYLE NAME	SPECIAL NOTES
	CANAL	Occluding Available in all materials Fills only the canal portion of the ear Helix and concha areas are removed
	STYLE NAME	SPECIAL NOTES
	SHELL	Occluding Available in all materials Deeply shelled out in the concha area Used when acoustic seal is an essential factor
	STYLE NAME	SPECIAL NOTES
	CANAL-LOK	Occluding Available in all materials Similar to canal style, easier to insert and remove
	STYLE NAME	SPECIAL NOTES
	CANAL-LONG LOK	Occluding Available in all materials Provides additional retention without sacrificing the cosmetic advantages of the Canal-Lok style
	STYLE NAME	SPECIAL NOTES
	SKELETON	Occluding Available in all materials Open space in concha for appearance
	$\frac{3}{4}$ SKELETON $\frac{1}{2}$ SKELETON	Occluding Available in all materials Helix is reduced (3/4) or removed (1/2) Recommended Skeleton styles for dexterity issues

Figure 2.11 - Tipos de moldes auriculares e respectivas notas (Fonte: Audiologyonline, 2018).




	STYLE NAME	SPECIAL NOTES	
	SEMI-SKELETON	Occluding Available in all materials Recommended for ears with flat concha rim to avoid earmold sticking out from ear	
	STYLE NAME	SPECIAL NOTES	
	CANAL-LOK W/HELIX	Select appropriate style based on the location of flat region on concha rim.	
	STYLE NAME	SPECIAL NOTES	
	CANAL-SHELL (Half-Shell)	Concha bowl only. Helix area is completely removed	Occluding Available in all materials Performs as Shell style Ideal for dexterity issues (easy insertion & removal)
	$\frac{3}{4}$ SHELL	Concha bowl and part of helix. Helix tip is significantly reduced	

Figure 2.12 - Tipos de moldes auriculares e respectivas notas (continuação) (Fonte: Audiologyonline, 2018).

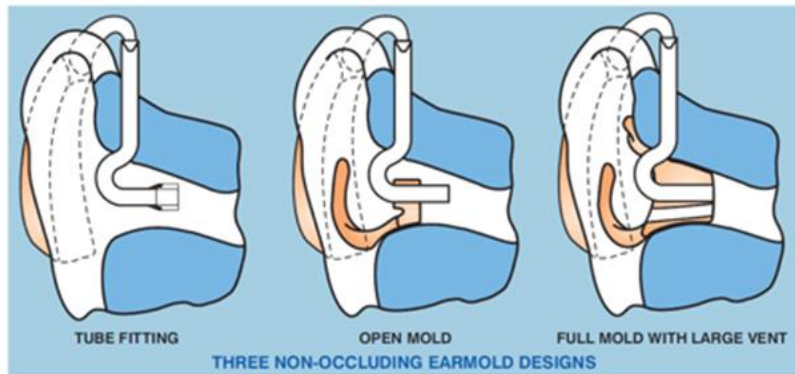


Figure 2.13 - Moldes auriculares não oclusivos (Fonte: Audiologyonline, 2018).


	STYLE NAME	SPECIAL NOTES	
	ADVANCED DESIGN FREE FIELD	Minimum occlusion	Available in all materials Seals canal entrance while leaving the canal itself un-occluded Assembled with selective vent (SAV) plug Eliminates feedback
		Moderate occlusion	
			

Figure 2.14 - Desenhos avançados de moldes auriculares (Fonte: Audiologyonline, 2018).

## 2.4 Identificação das Lacunas nos Sistemas de Digitalização Auricular Disponíveis

Apesar dos avanços significativos e das inovações no campo da digitalização auricular, os sistemas disponíveis atualmente ainda apresentam limitações substanciais que restringem a sua aplicabilidade e eficácia em contextos mais amplos. Uma das deficiências reside no potencial desconforto que muitos pacientes possam sentir durante o uso de dispositivos como o Otoscan e o Sistema Lantos. Pese embora sejam tecnologicamente avançados e precisos, estes dispositivos continuam a exigir a inserção de sondas ou membranas no canal auditivo. Além disso, o elevado custo desses sistemas representa um obstáculo significativo à sua adoção, especialmente em clínicas com recursos financeiros limitados, restringindo assim o acesso a essas tecnologias em regiões com menor poder aquisitivo.

Outro aspeto crítico é a complexidade operacional desses dispositivos. Muitos exigem formação especializada para serem manuseados de forma eficaz. Por exemplo, o Otoscan requer um programa de formação que inclui 27 módulos, o que

pode representar uma limitação considerável para a sua utilização em clínicas com menores dimensões ou com elevada rotatividade de profissionais. Adicionalmente, apesar da sofisticação tecnológica dos processos de digitalização atuais, os riscos médicos associados à inserção de dispositivos no canal auditivo, como lesões no canal ou perfurações no tímpano, como já referido anteriormente, não são completamente eliminados, continuando a ser uma preocupação.

Estes sistemas também enfrentam limitações em termos de aplicabilidade. Embora sejam projetados para situações específicas, como o ajuste de aparelhos auditivos ou a criação de próteses auriculares, eles podem não ser adequados para outras aplicações necessárias em audiologia ou otorrinolaringologia. A inexistência de um sistema verdadeiramente multifuncional que possa ser utilizado de forma eficaz em diferentes contextos clínicos é ainda uma limitação significativa. Diante deste cenário, torna-se imperativo o desenvolvimento de uma nova solução que não só colmate estas lacunas, mas que também seja mais acessível do ponto de vista económico, confortável e eficiente. O capítulo seguinte explorará a solução inovadora proposta, que visa superar as limitações mencionadas, oferecendo uma ferramenta mais adaptável e segura para a digitalização auricular e outros usos clínicos associados.

## **2.5 Softwares para Reconstrução 3D e Diagnóstico Auditivo Baseados em Inteligência Artificial**

### **2.5.1 Meshroom: Software de Fotogrametria *Open-Source***

O Meshroom é uma plataforma de fotogrametria *open-source* desenvolvida pela AliceVision, com o objetivo de permitir a criação de modelos 3D a partir de um conjunto de imagens 2D. A fotogrametria é uma técnica amplamente utilizada na engenharia, arquitetura e ciências da computação para reconstrução de objetos tridimensionais a partir de fotografias tiradas de diferentes ângulos (Dumont et al., 2017). O Meshroom, que utiliza o algoritmo AliceVision, permite que os utilizadores processem imagens de forma eficiente para gerar modelos 3D de alta qualidade sem a necessidade de *hardware* especializado.

O *software* opera em torno de um *pipeline* de processamento de imagens dividido em várias etapas, que incluem a correspondência de pontos, a reconstrução densa, a modelação e a texturização (AliceVision, 2020). As imagens podem ser tiradas com câmaras convencionais, sendo as únicas condições exigidas um número suficiente de fotos bem distribuídas ao redor do objeto a ser modelado. Este processo é facilitado pela interface gráfica amigável do Meshroom que simplifica a utilização do *software* para utilizadores sem experiência avançada em fotogrametria.

Um dos maiores benefícios do Meshroom é a sua natureza *open-source*, o que permite aos investigadores e profissionais adaptar o *software* às suas necessidades específicas, bem como contribuir para o seu desenvolvimento contínuo. A acessibilidade do

Meshroom é especialmente relevante no contexto da educação e da investigação, onde os custos associados a soluções proprietárias de fotogrametria podem ser um obstáculo. Além disso, o Meshroom é compatível com várias plataformas, como Windows e Linux, o que amplia as suas possibilidades de utilização em diferentes ambientes de trabalho (Meshroom, 2023).

A precisão do Meshroom depende da qualidade das imagens fornecidas, do número de pontos de referência e da configuração do processo de reconstrução, que pode ser ajustado conforme as necessidades do utilizador. Estudos demonstraram que, quando bem calibrado, o Meshroom é capaz de gerar modelos com alta fidelidade, competindo com soluções comerciais de fotogrametria, como o Agisoft Metashape (Zhang et al., 2018).

### 2.5.2 COLMAP: Software para Reconstrução 3D

O COLMAP é um *software* de reconstrução 3D baseado em fotogrametria, desenvolvido por Johannes L. Schönberger e outros investigadores na Universidade Técnica de Munique (Schönberger et al., 2016). Este *software* foi projetado para processar grandes conjuntos de imagens e reconstruir modelos tridimensionais de alta qualidade, sendo amplamente utilizado em áreas como visão computacional, robótica e realidade aumentada. O COLMAP integra diversos algoritmos de reconstrução visual, permitindo a recuperação de geometria 3D a partir de imagens bidimensionais, sem a necessidade de informações adicionais sobre a cena, como pontos de controle ou sistemas de navegação externos.

A principal vantagem do COLMAP é a sua capacidade de realizar o processo de reconstrução 3D utilizando apenas imagens de uma cena, o que o torna altamente útil em contextos em que a aquisição de dados geoespaciais detalhados é difícil ou impraticável. O *software* oferece dois principais métodos de reconstrução: a Structure-from-Motion (SfM) e a Multi-View Stereo (MVS). A técnica de SfM é responsável por estimar as posições relativas das câmaras e pela reconstrução de um modelo 3D a partir de um conjunto de imagens com sobreposição. Já a técnica MVS realiza a geração densa de pontos 3D, criando uma reconstrução mais precisa e detalhada (Schönberger et al., 2016; Furtado et al., 2021).

Uma das características muito positiva do COLMAP é a sua interface gráfica intuitiva, que facilita a sua utilização por investigadores e profissionais da área. Além disso, o *software* permite a exportação de resultados para vários formatos, sendo compatível com outras ferramentas de modelação e análise, como o Blender e o CloudCompare. A versatilidade e eficiência do COLMAP tornaram-no numa ferramenta popular em projetos de reconstrução 3D em áreas como arqueologia, arquitetura e engenharia, sendo também utilizado em ambientes académicos e de pesquisa (Agarwal et al., 2011; Schonberger & Frahm, 2016).

### **2.5.3 Softwares de Reconhecimento de Patologias do Ouvido através de Inteligência Artificial**

A utilização de inteligência artificial (IA) para o diagnóstico e reconhecimento de patologias no ouvido tem vindo a crescer significativamente nos últimos anos. Com o avanço das técnicas de aprendizagem automática e redes neurais profundas, tem-se tornado possível criar sistemas capazes de identificar com precisão diversas condições auditivas, muitas vezes com resultados comparáveis aos dos profissionais da saúde. Estes *softwares* utilizam principalmente imagens médicas, como audiogramas, ressonâncias magnéticas, tomografias computadorizadas, ou mesmo sinais acústicos, como as emissões otoacústicas, para realizar diagnósticos automáticos de condições como perda auditiva, e.g. otite, e outras doenças características do ouvido interno.

Entre as aplicações mais relevantes, destaca-se o uso de redes neurais convolucionais (CNNs) que têm sido amplamente utilizadas para a análise de imagens médicas. Estes algoritmos são treinados em grandes bases de dados de imagens otoscópicas e outras imagens relacionadas, de forma a identificar padrões que indicam a presença de patologias. Uma pesquisa notável é a realizada por Hassaan et al. (2021) que desenvolveu um sistema de IA para detetar automaticamente a otite média aguda através de imagens otoscópicas, alcançando uma precisão de diagnóstico superior à dos médicos em alguns casos.

Além disso, *softwares* como o DeepHear (2019), desenvolvido por Zhou et al., utilizam IA para analisar sinais de audiometria e ajudar na deteção precoce de perda auditiva. O sistema é baseado em redes neurais recorrentes (RNNs) e tem sido utilizado para prever a evolução da perda auditiva em pacientes, contribuindo para tratamentos mais personalizados. Estes sistemas são particularmente úteis para diagnóstico em áreas remotas ou em locais com escassez de profissionais especializados. Outros exemplos incluem o *software* OtoAI que aplica algoritmos de IA para detetar e classificar patologias do ouvido interno a partir de ressonâncias magnéticas. O *software* foi projetado para ser usado em ambientes hospitalares, ajudando os médicos a fazer diagnósticos mais rápidos e precisos.

O uso de IA no diagnóstico de patologias do ouvido oferece grandes vantagens, como a redução de erros humanos, maior precisão e a capacidade de análise em tempo real de grandes volumes de dados. Contudo, a implementação generalizada desses sistemas ainda enfrenta desafios, como a necessidade de bases de dados amplas e a validação clínica rigorosa para garantir a fiabilidade e a segurança dos resultados.

### **2.5.4 Aplicação Potencial dos Softwares na Solução Proposta**

Os *softwares* descritos anteriormente, além de apresentarem elevado potencial para o diagnóstico auditivo, podem também desempenhar um papel crucial na produção de moldes auriculares personalizados através de impressão 3D. Este processo seria

particularmente relevante para a criação de dispositivos como aparelhos auditivos, protetores auriculares, ou até implantes médicos ajustados às características anatômicas específicas de cada paciente.

O Meshroom, com a sua capacidade de gerar modelos tridimensionais a partir de imagens bidimensionais, poderia ser utilizado para digitalizar e reconstruir a forma exata do canal auditivo e da orelha externa de um paciente. Estas reconstruções detalhadas seriam obtidas a partir de imagens captadas por dispositivos de captura ótica, como câmaras ou scanners portáteis, permitindo a criação de um modelo digital fiel às particularidades anatômicas de cada indivíduo. Este modelo seria, posteriormente, exportado para *software* de modelação ou impressão 3D, possibilitando a criação de moldes auriculares altamente personalizados.

O COLMAP, por sua vez, poderia ser aplicado para criar reconstruções tridimensionais ainda mais detalhadas e densas, utilizando técnicas como Structure-from-Motion (SfM) e Multi-View Stereo (MVS). Estas técnicas seriam especialmente úteis para capturar as formas complexas das estruturas auriculares internas e externas, assegurando um elevado grau de precisão na modelação dos moldes. Os modelos produzidos poderiam ser refinados em *softwares* de modelação 3D, garantindo que o design final seja ergonómico e funcional para o objetivo pretendido, como no caso de protetores auditivos ou próteses específicas.

No âmbito da produção de moldes, a integração de reconstruções 3D com inteligência artificial, utilizando ferramentas como o OtoAI, poderia otimizar o processo. Por exemplo, o OtoAI poderia analisar as características anatômicas extraídas dos modelos 3D para identificar automaticamente as áreas críticas que necessitam de maior adaptação ou suporte no molde auricular. Este tipo de análise automatizada reduziria o tempo de desenvolvimento e aumentaria a precisão na adaptação dos dispositivos.

Após a modelação dos moldes, o modelo tridimensional seria exportado num formato compatível com *softwares* de impressão 3D (como STL ou OBJ) e enviado para uma impressora 3D de alta precisão. Materiais como resinas biocompatíveis ou polímeros flexíveis poderiam ser utilizados para garantir que os moldes sejam confortáveis e adequados ao uso prolongado.

A utilização combinada destes *softwares* e tecnologias de impressão 3D permitiria criar uma solução integrada, capaz de melhorar a eficiência e a personalização de dispositivos auditivos. Além de atender às necessidades individuais de cada paciente, este processo poderia ser aplicado em larga escala, reduzindo os custos de produção e aumentando a acessibilidade a soluções auditivas personalizadas. Assim, a combinação do Meshroom, COLMAP, OtoAI, e impressão 3D destaca-se como uma abordagem inovadora para a produção de moldes auriculares e dispositivos relacionados, promovendo avanços significativos na área da saúde auditiva.

### **3 DESENVOLVIMENTO E CONCEÇÃO DE UM NOVO CONCEITO DE VÍDEO-OTOSCÓPIO**

#### **3.1 Descrição do Conceito**

O vídeo-otoscópio proposto neste trabalho representa uma evolução em relação aos dispositivos tradicionais de otoscopia. A sua conceção integra um conjunto de inovações tecnológicas destinadas a melhorar a precisão do diagnóstico auricular e a personalização do tratamento. O conceito baseia-se num sistema de suporte para o vídeo-otoscópio que funcionará como referencial para a aquisição da geometria do CAE e que, adicionalmente, tem um atuador acoplado para fazer o movimento linear longitudinal de dentro para fora do CAE, permitindo a captura de imagens do canal auditivo e das estruturas associadas, bem como a obtenção de modelos digitais tridimensionais.

#### **3.2 Design e Engenharia do Protótipo**

A fase inicial concentrou-se na definição dos requisitos técnicos e funcionais do dispositivo, seguida pelo design detalhado do *hardware*. Foram considerados aspetos ergonómicos, como o conforto do utilizador e a facilidade de manuseamento, bem como a integração de tecnologias para garantir a eficácia e a precisão do sistema.

O protótipo desenvolvido consiste numa estrutura mecânica projetada para atuar como um sistema de captura de imagens do CAE, integrando vários componentes que permitem o ajuste e a fixação dos elementos envolvidos. A arquitetura do protótipo foi concebida para ser modular e facilmente ajustável, o que facilita a sua adaptação a diferentes cenários de teste e aplicação.

O sistema é composto por vários componentes principais que se listam infra:

- **Esfera:** Elemento que permite ter os graus de liberdade necessários para inserir o dispositivo de captura no CAE;
- **Tampa de encaixe da esfera:** Este componente atua como uma cobertura que se encaixa na esfera, permitindo acoplá-la dentro do sistema e garantindo que a esfera permaneça posicionada durante o movimento;
- **Estrutura principal (*Mainframe*):** A estrutura principal serve de base para todos os outros componentes e circunda a orelha;
- **Parafuso de fixação:** Responsável por fixar os componentes móveis do sistema, garantindo que a configuração selecionada permaneça estável durante a operação;

- **Acoplamento ao dispositivo de captura:** Parte do sistema que permite o encaixe do dispositivo de captura;
- **Suporte de acoplamento do atuador:** Componente que serve como suporte do atuador e da peça deslizante, estando conectado diretamente à esfera;
- **Guia acoplada ao atuador:** Componente que permite o movimento linear segundo o eixo do atuador.

O *design* modular do protótipo permite a fácil substituição e ajuste de cada componente, facto que se mostrou determinante na fase de testes e validação. Todos os elementos foram projetados para serem montados e desmontados de forma rápida, facilitando a manutenção e possíveis modificações durante o processo de desenvolvimento. Nas Figuras 3.1 e 3.2 estão representadas, respetivamente, a vista explodida e o desenho 3D do sistema de suporte.

Os desafios enfrentados durante o processo de desenvolvimento estavam intrinsecamente ligados à adaptação do sistema a diversas morfologias auriculares. A solução encontrada foi a introdução de parafusos estrategicamente posicionados que não apenas garantem a estabilidade do sistema, mas também possibilitam o ajuste personalizado e a inserção manual no canal auditivo.

O procedimento de ajuste é simplificado e eficiente. Após a inserção, os parafusos (Figura 3.3 (b)) são utilizados para fixar o sistema, enquanto o atuador acoplado permite o recuo do vídeo-otoscópico. Esta funcionalidade procura facilitar a recolha precisa de imagens ao longo do canal auditivo, garantindo uma experiência confiável e adaptável para profissionais de saúde e pacientes.

Ao longo das várias iterações de *design* e teste, o protótipo viu a sua jornada marcada por uma série de melhorias significativas, impulsionando a sua eficiência e usabilidade. Uma das áreas-chave de melhoria foi aprimorar a facilidade na impressão 3D do protótipo, por exemplo, com a simplificação da geometria através do uso de linhas retas ou superfícies no mesmo plano, tornando o processo mais acessível e eficiente. Além disso, a necessidade de uma maior adaptabilidade do sistema foi identificada e implementada ao longo das iterações, garantindo uma adaptação mais precisa às diferentes necessidades e cenários de uso. Uma mudança significativa ocorreu quando o protótipo ganhou mais graus de liberdade com a introdução de uma esfera, permitindo uma maior flexibilidade e amplitude de movimento. A utilização de parafusos para a fixação do sistema também representou um marco importante, proporcionando uma montagem mais robusta e estável.

A configuração e ajuste do vídeo-otoscópico são fundamentais para garantir um exame auditivo preciso e confortável. A afinação da posição vertical do vídeo-otoscópico é realizada através da interface suporte-arnês. Este sistema permite ajustar a altura do vídeo-otoscópico de forma precisa utilizando um parafuso que fixa a ligação entre o suporte (Figura 3.3 (a)) e o arnês (Figura 3.5). O arnês de per si pode ser reposicionado e ajustado, proporcionando uma adaptação personalizada ao utilizador, garantindo que o vídeo-otoscópico esteja sempre na altura desejada para o

*Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*

exame. Além disso, a afinação angular do vídeo-otoscópio, tanto na vertical como na horizontal, é conseguida através de um mecanismo esférico (Figura 3.3 (c) e (d)).

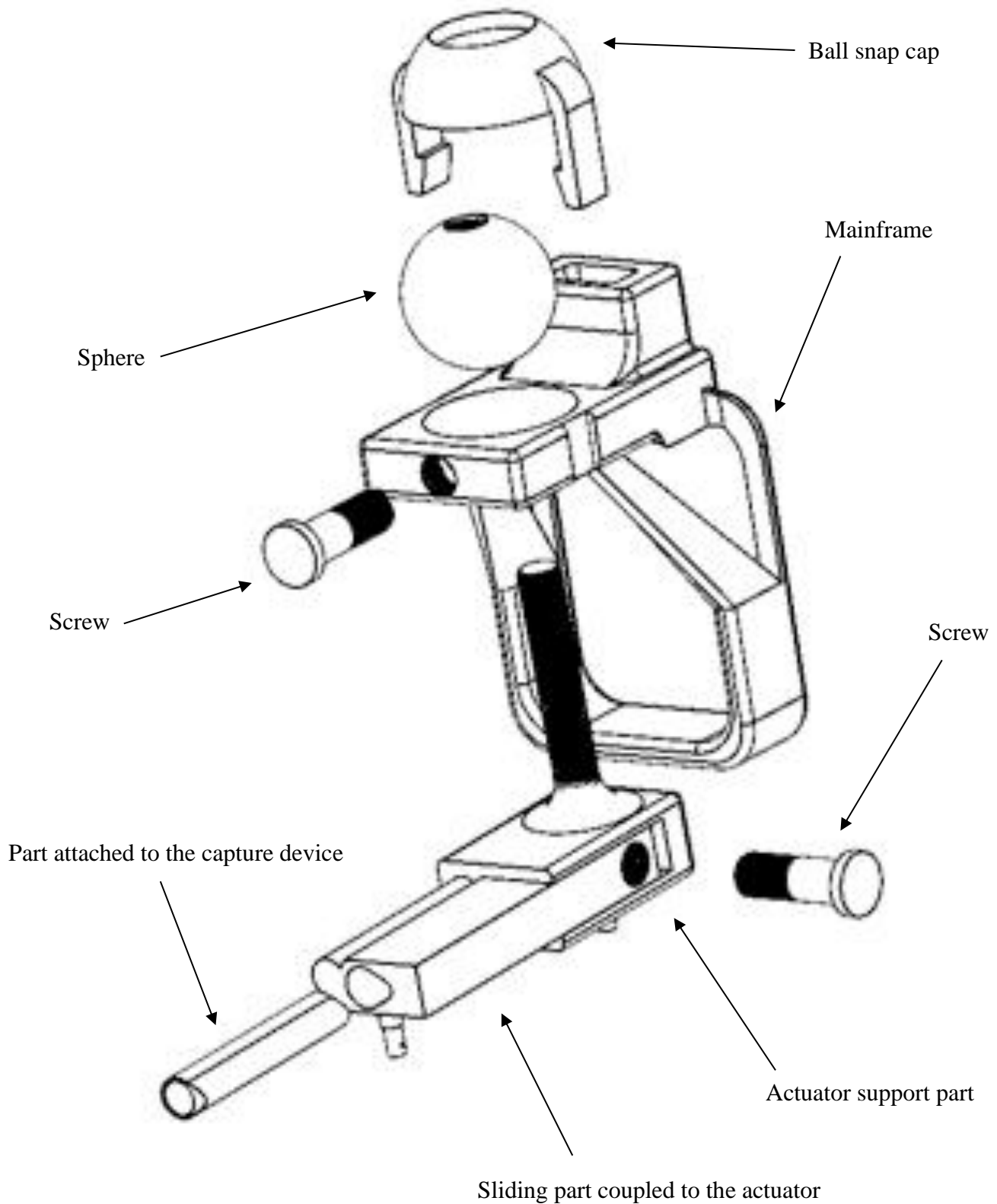


Figure 3.1 – Vista explodida do sistema de suporte

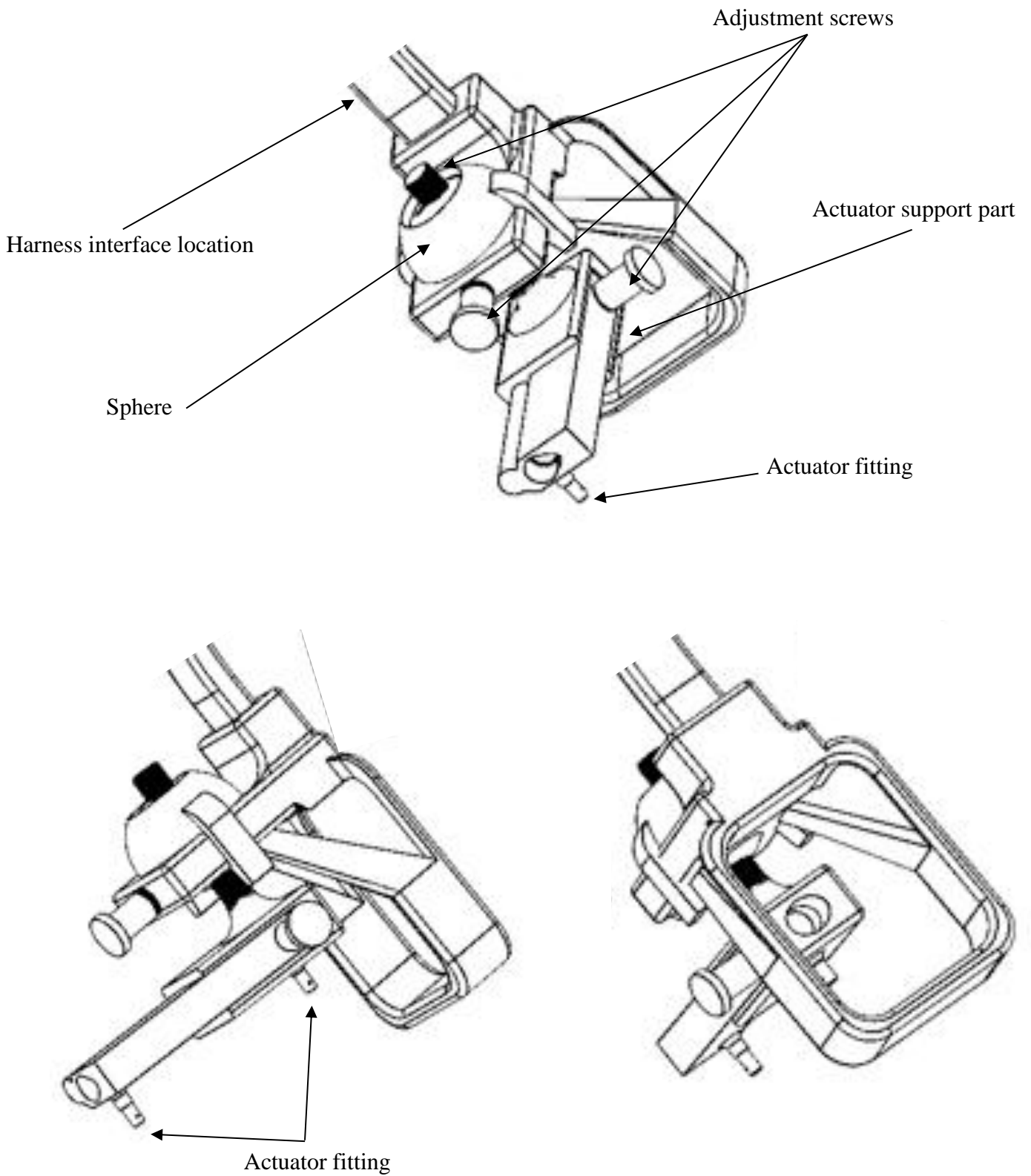


Figure 3.2 - Desenho 3D do sistema de suporte

*Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*

Uma esfera é utilizada para conectar a peça que suporta o encaixe do vídeo-otoscópio (Figura 3.3 (f)) o que permite ajustes precisos nos ângulos necessários. Esta configuração assegura que o vídeo-otoscópio possa ser orientado em várias direções, adaptando-se à anatomia específica do canal auditivo de cada paciente e assegurando que o exame seja realizado com o ângulo correto.

Para garantir que o vídeo-otoscópio se desloque apenas ao longo de um eixo fixo é essencial que o *design* da geometria do encaixe entre a peça acoplada ao atuador (Figura 3.3 (e)) e a peça que a suporta o permita. Este *design* específico garante que o movimento do vídeo-otoscópio seja linear e limitado a um único eixo. Isto evita qualquer desvio lateral ou angular, ficando assim assegurando que o dispositivo mantenha a precisão do posicionamento durante a utilização, mesmo em movimentos repetidos ou prolongados.

O sistema foi projetado para ser versátil, permitindo a utilização de vídeo-otoscópios com diferentes dimensões. Para isso, o suporte do vídeo-otoscópio é composto por um conjunto de peças facilmente permutáveis (Figura 3.3). Estas peças intercambiáveis permitem que o dispositivo seja adaptado para acomodar vídeo-otoscópios de várias dimensões sem comprometer a estabilidade ou a precisão do equipamento. A troca das peças é simples, garantindo que o processo de adaptação a diferentes vídeo-otoscópios seja rápido e eficaz.

Adicionalmente, para garantir que o vídeo-otoscópio é sempre colocado da mesma forma no equipamento, a peça onde ele é acoplado (Figura 3.3 (g)) desempenha um papel crucial. A geometria desta peça foi cuidadosamente projetada para impedir qualquer rotação do vídeo-otoscópio ao longo do seu eixo longitudinal. Este design garante que o vídeo-otoscópio seja sempre posicionado da mesma maneira, mantendo a consistência na colocação e, conseqüentemente, na qualidade do exame.

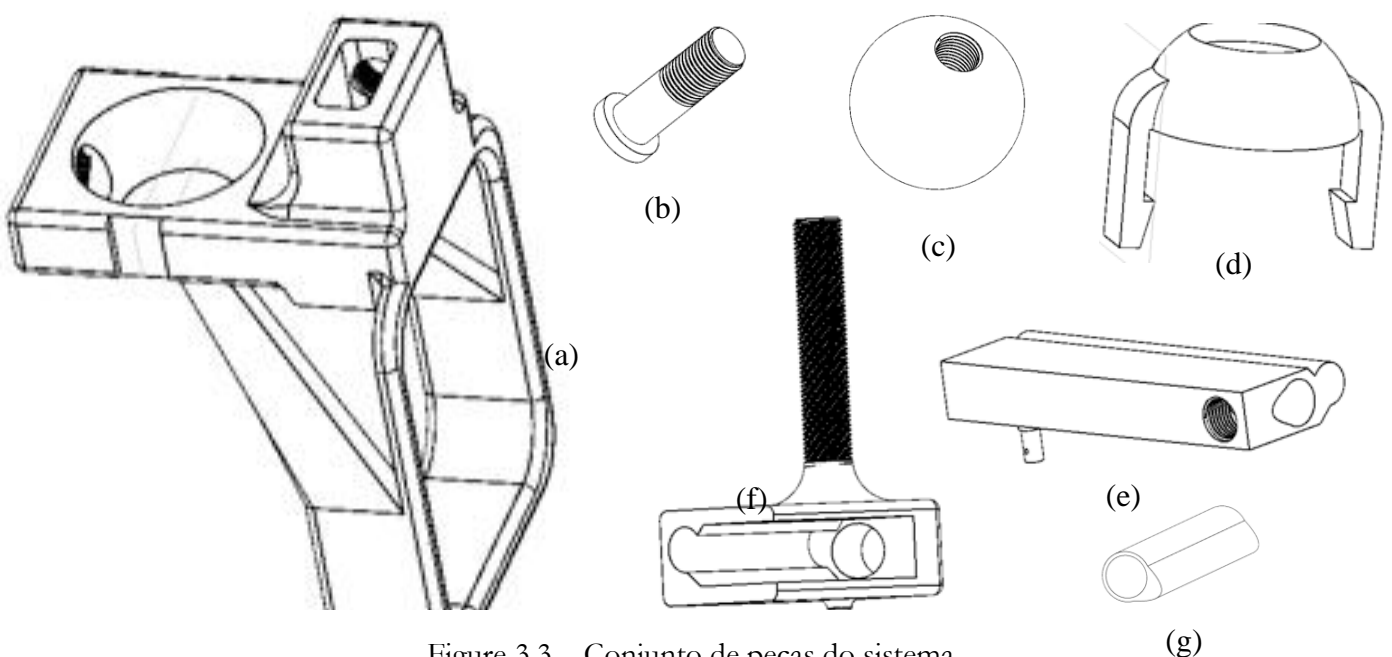


Figure 3.3 – Conjunto de peças do sistema

O ajuste do vídeo-otoscópio para acomodar diferentes comprimentos do canal auditivo externo é feito de forma manual. O utilizador posiciona o vídeo-otoscópio na profundidade correta dentro do canal auditivo e, em seguida, fixa-o no lugar utilizando um parafuso. Uma vez fixado, o atuador (Figura 3.4) entra em ação para realizar um movimento de recuo controlado, retirando o vídeo-otoscópio do canal auditivo enquanto recolhe imagens. Este procedimento garante que o vídeo-otoscópio se ajusta a diferentes comprimentos do canal auditivo, assegurando a captura de imagens de alta qualidade ao longo do exame.



Figure 3.4 – Atuador e respetivas dimensões

Para adaptar o sistema a diferentes posicionamentos relativos do pavilhão auricular, o *design* inclui múltiplos pontos de ajuste. O arnês pode ser ajustado permitindo que o dispositivo se alinhe corretamente com a anatomia específica do pavilhão auricular de cada paciente. Além disso, a peça que liga à esfera, que também é um parafuso, permite um ajuste vertical adicional, proporcionando um controle rigoroso sobre o posicionamento do vídeo-otoscópio em relação ao canal auditivo. Estas opções de ajuste garantem que o dispositivo possa ser adaptado a uma ampla gama de variações anatômicas do pavilhão auricular.

O sistema considera, adicionalmente, a necessidade de se ajustar a diferentes tamanhos de cabeça. Este ajuste é realizado através de um arnês, como o ilustrado na Figura 3.5, que é completamente ajustável. O arnês pode ser facilmente modificado para se adaptar ao tamanho da cabeça do utilizador, garantindo um encaixe confortável e seguro. Esta adaptabilidade é crucial para assegurar que o vídeo-otoscópio permaneça corretamente posicionado durante todo o exame, independentemente das variações do tamanho da cabeça do paciente.

O *design* do sistema é simétrico para permitir a utilização do vídeo-otoscópio tanto no ouvido esquerdo como no direito sem a necessidade de ajustes adicionais. Esta simetria no *design* evita a necessidade de componentes específicos para cada lado, simplificando o processo de exame e garantindo que o dispositivo possa ser usado de forma prática e eficiente em ambos os ouvidos.

O movimento linear do vídeo-otoscópio no sentido de dentro para fora do canal auditivo é controlado através de um sistema acionado por um controlador. Ao pressionar um botão no controlador, o atuador é ativado para realizar a sua extensão, ou seja, o recuo do vídeo-otoscópio em relação ao ouvido. Este mecanismo permite que o movimento seja realizado de forma precisa e suave, assegurando que o recuo

*Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*

do vídeo-otoscópio seja feito de maneira controlada, garantindo a continuidade da recolha de imagens de alta qualidade durante todo o processo de exame. A Figura 3.6 ilustra o modelo virtual da caixa que foi impressa para colocar o controlador.

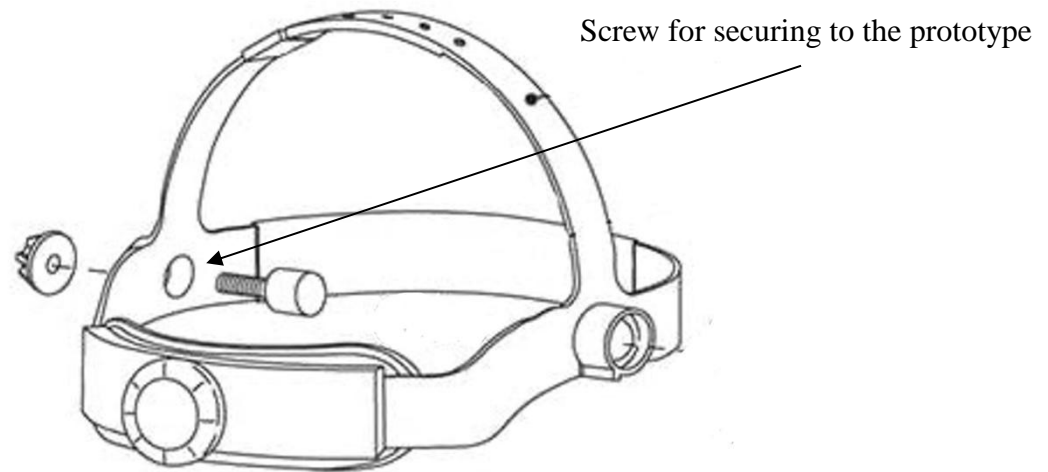


Figure 3.5 – Arnês ajustável para a cabeça

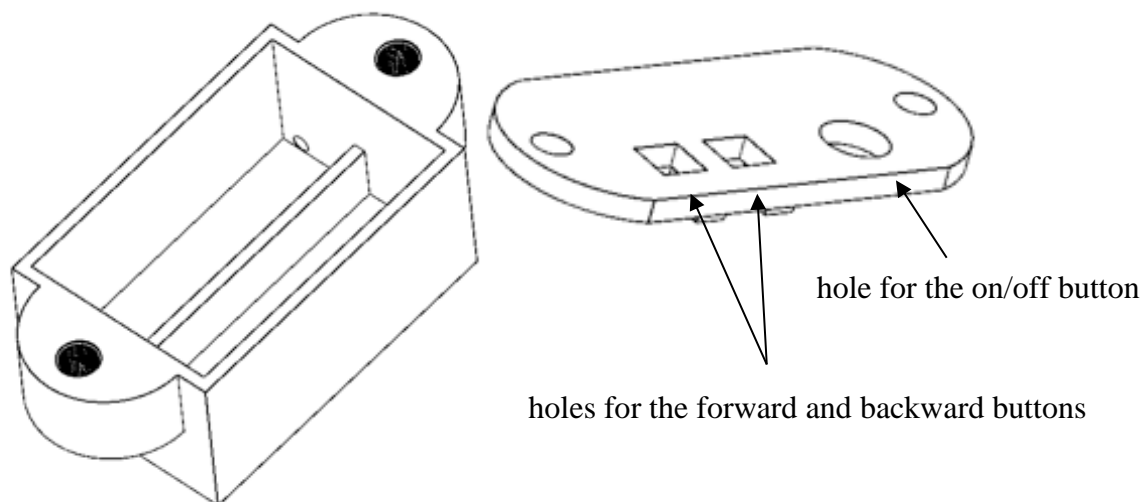


Figure 3.6 – Caixa do controlador

A recolha de imagens para este projeto foi realizada utilizando uma câmara USB destinada à inspeção otológica. Este dispositivo, caracterizado pela sua simplicidade e portabilidade, foi conectado a um microcomputador Raspberry Pi, que serviu como unidade de controlo e processamento. A escolha deste sistema visou alcançar

um equilíbrio entre baixo custo, flexibilidade e eficiência na aquisição das imagens necessárias para a validação do trabalho desenvolvido.

Para facilitar a operação da câmara e a aquisição das imagens, foi desenvolvido um *software* simples em Python. O programa permitiu controlar a câmara de forma eficaz, capturando imagens diretamente no sistema do Raspberry Pi. Este processo automatizado simplificou a recolha de dados, reduzindo a intervenção manual e assegurando uma maior consistência nos resultados. Na Figura 3.7 é apresentado o sistema completo, incluindo a câmara USB conectada ao Raspberry Pi. A Figura 3.8 ilustra o detalhe do dispositivo de captura de imagens. Estas fotografias visam proporcionar uma compreensão visual da montagem e funcionamento do sistema desenvolvido.

O FDM foi, pela versatilidade que o caracteriza, o processo aditivo selecionado para produzir os vários protótipos do sistema desenvolvido. Inicialmente, concebido como uma estrutura mais compacta, como mostra a Figura 3.9, o vídeo-otoscópio foi dividido em várias partes para proporcionar maior flexibilidade. A opção por imprimir peças separadas, em vez de uma única peça, apresenta várias vantagens significativas. Permite maior flexibilidade no design e na montagem, facilitando ajustes ou substituições de componentes específicos. Além disso, reduz a probabilidade de falhas na impressão, otimiza o uso de materiais e permite orientações ideais para obter melhor qualidade nas superfícies. Esta abordagem também simplifica o transporte, armazenamento e manutenção, já que peças individuais podem ser facilmente substituídas ou reparadas. Por fim, promove um desenvolvimento mais ágil, permitindo testes e ajustes iterativos em cada componente do projeto. Esta decisão foi impulsionada pela necessidade de oferecer mais graus de liberdade, essenciais para garantir uma ajustabilidade ótima.



Figure 3.7 - Sistema completo utilizado nos ensaios de validação

*Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*



Figure 3.8 - Detalhe do dispositivo de captura de imagens

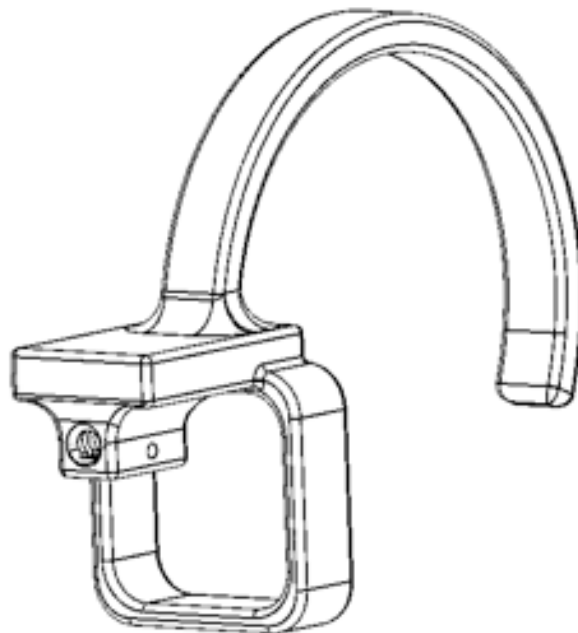


Figure 3.9 - Desenho da estrutura 3D do vídeo-otoscópio numa fase inicial do desenvolvimento

Os testes desempenharam um papel fundamental ao longo do processo de desenvolvimento e otimização do sistema. O feedback obtido a partir desses testes

foi cuidadosamente integrado no processo de *design*, tendo sido identificadas as alterações necessárias para o aprimoramento do protótipo. No desenvolvimento inicial do protótipo, foi concebido o sistema de fixação, representado na Figura 3.10, para a cabeça com o objetivo de garantir a estabilidade e precisão necessárias durante a utilização do dispositivo. Este sistema consistia numa estrutura desenhada para se ajustar à anatomia do crânio, utilizando materiais leves e ajustáveis que procuravam aliar o conforto à funcionalidade.

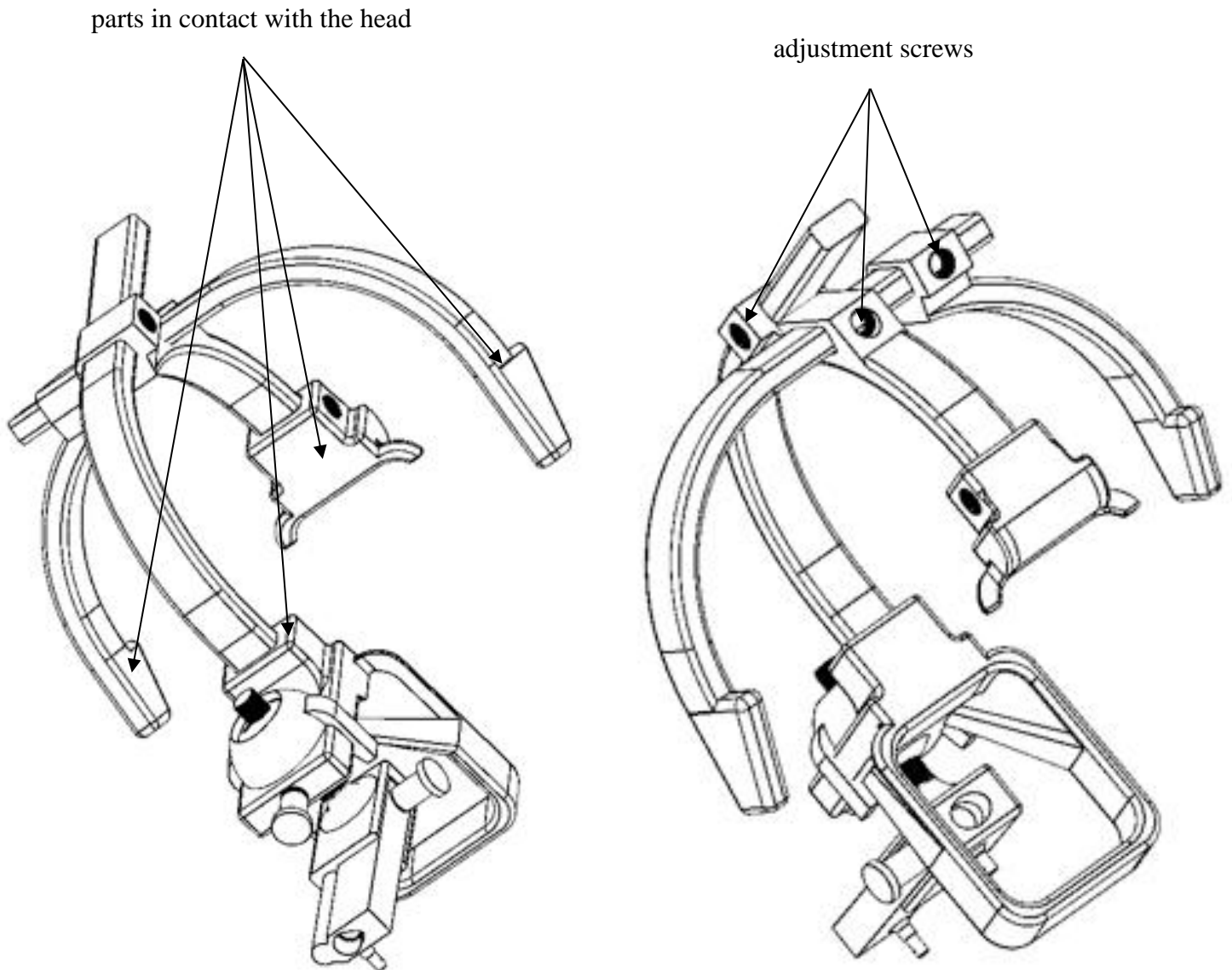


Figure 3.10 - Protótipo com o sistema de fixação para a cabeça

Apesar dos esforços no *design*, os testes revelaram limitações significativas deste sistema de fixação. O sistema apresentava tendência a escorregar quando utilizado diretamente sobre o cabelo do paciente, comprometendo a sua eficácia e tornando-o menos prático para utilização em situações reais. Além disso, o processo de ajuste revelou-se menos intuitivo do que o desejável, introduzindo complexidade

desnecessária. Devido a estas limitações, o sistema foi substituído pelo arnês apresentado anteriormente. O arnês oferece uma indiscutível melhor aderência e estabilidade, sendo a sua aplicação e ajuste mais rápidos e fáceis para o utilizador.

Assim, a evolução do protótipo não apenas reflete um processo de aprimoramento técnico, mas também uma jornada de aprendizagem e inovação contínua, alimentada pela determinação em superar obstáculos e oferecer soluções cada vez mais eficazes e adaptáveis às necessidades do utilizador.

### **3.3 Considerações Finais**

O desenvolvimento do novo conceito de vídeo-otoscópio apresentado neste trabalho marca um avanço significativo na área da otoscopia, respondendo a necessidades clínicas não atendidas pelos dispositivos tradicionais. Desde a fase inicial de conceção até à prototipagem, cada etapa foi cuidadosamente planeada e executada para garantir que o dispositivo não apenas cumprisse os requisitos técnicos, mas também oferecesse uma experiência de utilização intuitiva e eficiente.

A introdução de um sistema de suporte ajustável, com parafusos que permitem a adaptação precisa a diferentes morfologias auriculares, representa uma inovação crucial. Este sistema garante a estabilidade necessária para a captura de imagens de alta qualidade, ao mesmo tempo que se adapta às variações anatómicas de cada paciente. Além disso, a capacidade de ajustar o vídeo-otoscópio para diferentes comprimentos e posições do canal auditivo, combinada com o movimento linear controlado por um atuador, assegura que o exame seja realizado de forma precisa e consistente.

O processo de iteração contínua e a integração do *feedback* obtido durante os testes foram fundamentais para o melhoramento do protótipo. A escolha de utilizar o processo de impressão 3D (FDM) para a produção dos diferentes componentes do protótipo permitiu a necessária flexibilidade no *design* que se revelou crucial para a rápida adaptação e melhoria do sistema, resultando num dispositivo que não só é tecnologicamente avançado, mas também prático e fácil de usar.

Em suma, o vídeo-otoscópio desenvolvido neste projeto não é apenas uma evolução dos dispositivos existentes, mas sim uma reimaginação completa do processo de otoscopia. Ele proporciona uma solução mais adaptável, precisa e eficiente, com potencial para melhorar significativamente a qualidade dos diagnósticos auditivos e o conforto do paciente. As inovações introduzidas, como o sistema de suporte ajustável e o mecanismo de movimento linear, demonstram o compromisso em superar as limitações dos dispositivos tradicionais, oferecendo um contributo valioso para a prática clínica. O sucesso deste protótipo abre caminho para futuras inovações na área, destacando a importância da adaptação tecnológica às necessidades reais dos utilizadores.

## 4 ENSAIOS DE VALIDAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Neste capítulo serão descritos e analisados os ensaios de validação do vídeo-otoscópio proposto, tendo como base as respostas obtidas aos inquéritos realizados a audiologistas e pacientes. Estes ensaios de validação envolveram tanto a avaliação do desempenho técnico do vídeo-otoscópio como a percepção dos utilizadores em relação ao seu conforto e facilidade de uso durante o exame. Estes ensaios abrangeram um conjunto diversificado de condições, incluindo a análise da adaptabilidade do equipamento a diferentes morfologias auriculares. Além disso, foram realizadas análises qualitativas e quantitativas para identificar as principais lacunas do equipamento e propor melhorias.

As avaliações incluíram não apenas questões relacionadas com o conforto do paciente, mas também a facilidade de manuseamento por parte dos profissionais de saúde, considerando diferentes perfis de utilizadores e os desafios enfrentados em contextos clínicos reais. Adicionalmente, serão, de acordo com as lacunas identificadas durante o processo de validação, propostas otimizações no equipamento. O principal objetivo é garantir que o vídeo-otoscópio satisfaça as necessidades dos profissionais de saúde e dos pacientes, proporcionando-lhes uma experiência de utilização eficiente, confortável e adaptável a diferentes contextos clínicos e às várias especificidades anatómicas dos pacientes.

### 4.1 Descrição e Análise dos Ensaios de Validação

Os ensaios de validação do vídeo-otoscópio foram realizados considerando um grupo de 8 alunos de audiologia e 5 profissionais de audiologia, com os seguintes anos de experiência: 28, 15, 17, 21 e 20 anos. Primeiro, os participantes utilizaram um otoscópio convencional em cada ouvido para visualizar o CAE e, em seguida, o procedimento foi repetido utilizando o protótipo do vídeo-otoscópio desenvolvido. Neste caso, foi feita a recolha de imagens do CAE. As Figuras 4.1 e 4.2 ilustram exemplos das imagens recolhidas.

Os ensaios de validação envolveram uma recolha detalhada de *feedback* dos utilizadores, incluindo audiologistas e pacientes, através de um inquérito baseado numa escala de Likert de 1 a 5. Esta avaliação abrangeu vários aspetos do equipamento, como o ajuste e fixação, a eficácia no uso, a facilidade de manuseamento, o conforto do paciente e a satisfação geral com o dispositivo. Os resultados obtidos podem ser observados nos gráficos da Figura 4.3 e 4.4, que apresentam visualmente os principais aspetos avaliados, bem como dificuldades de utilização, satisfação e conforto.

*Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*

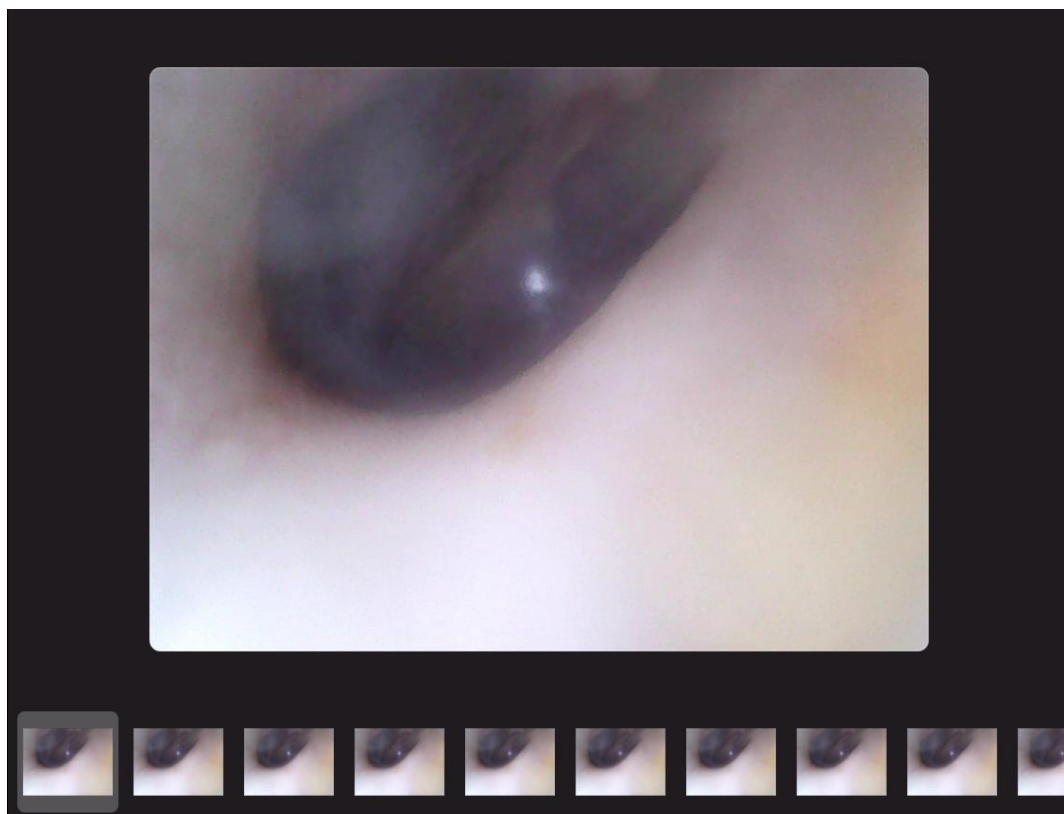


Figure 4.1 – Exemplo de imagens recolhidas do CAE

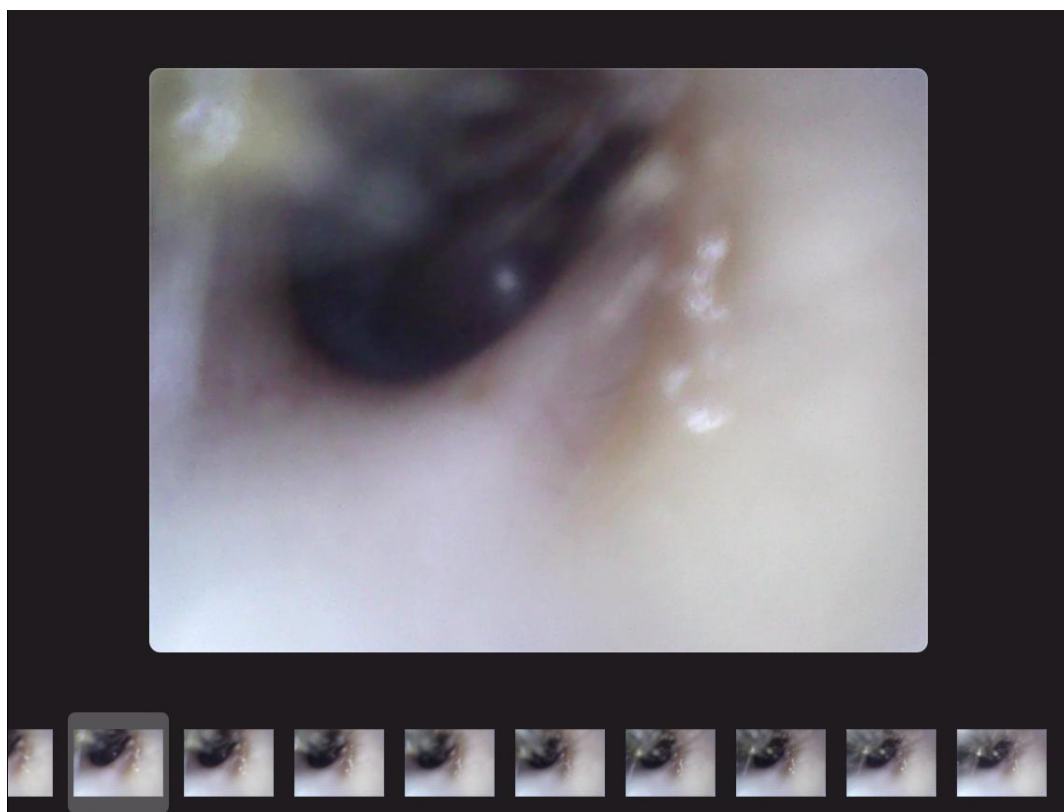


Figure 4.2 - Exemplo de imagens recolhidas do CAE (cont.)

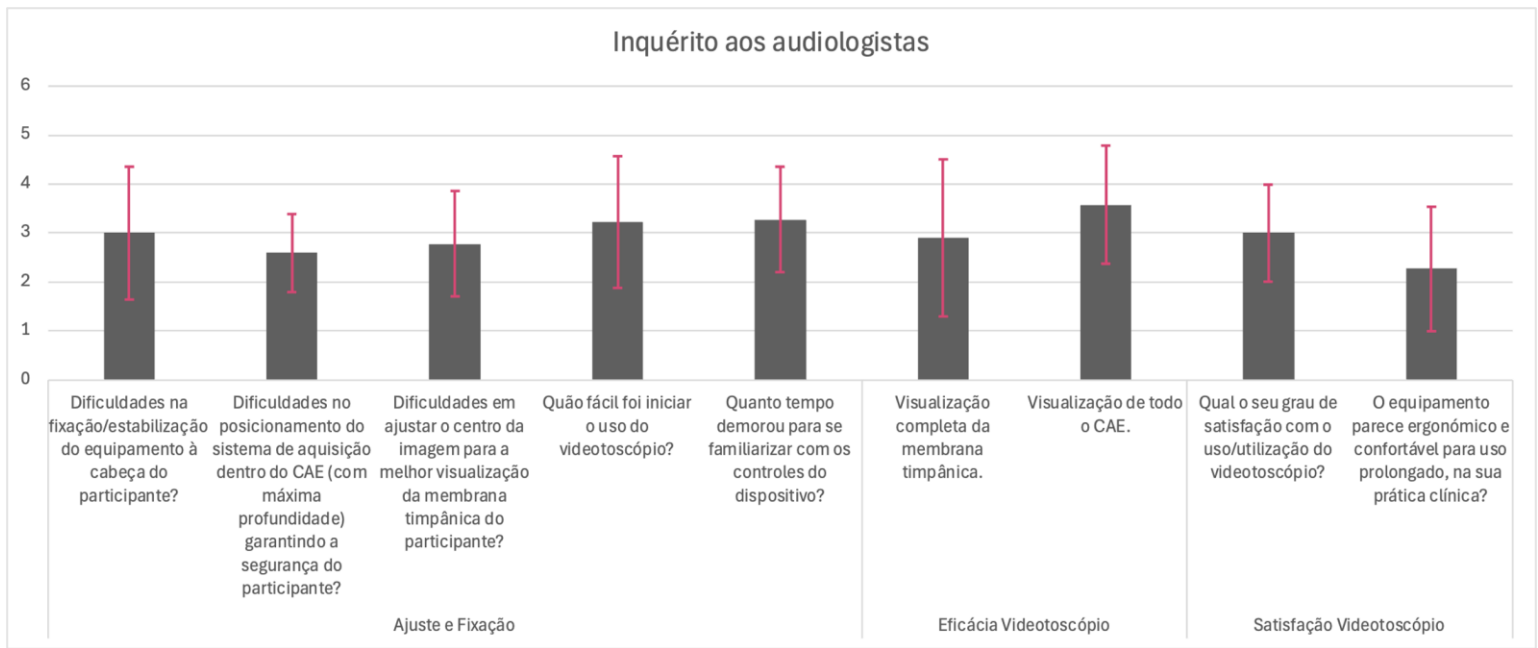


Figure 4.3 - Resultados do inquérito aos audiologistas

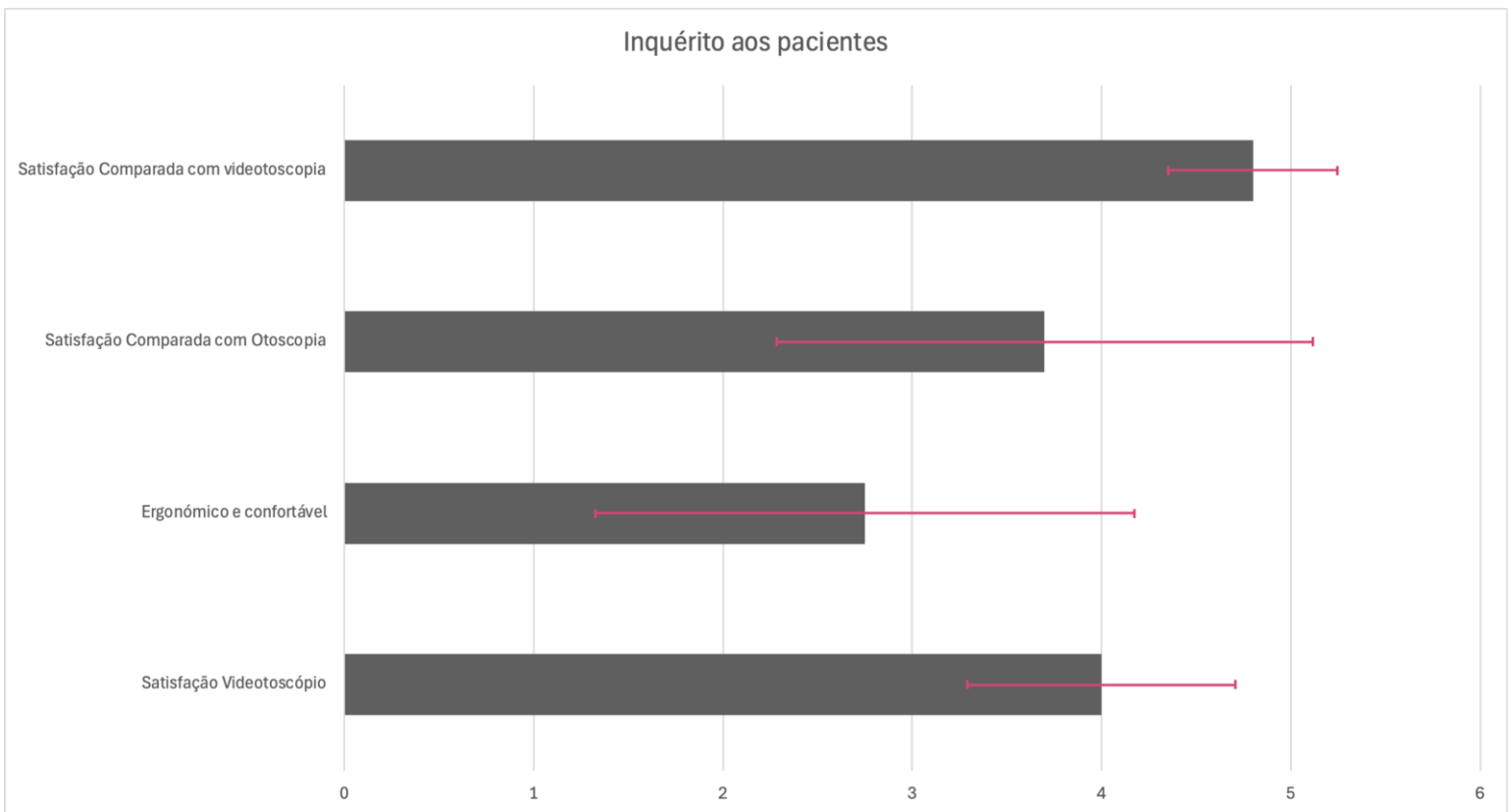


Figure 4.4 - Resultados do inquérito aos pacientes

*Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*

A distribuição dos valores mostrou uma variação entre 1 (muito insatisfeito) e 5 (muito satisfeito), com a maior concentração de respostas no valor 3. A análise dos dados revelou que a satisfação média dos audiologistas em relação ao vídeo-otoscópio situou-se nos 2.64, enquanto que a satisfação média dos pacientes se situou à volta dos 4. Em relação ao ajuste e fixação, a satisfação dos audiologistas situa-se nos 2.98, com um desvio padrão 1.16 e, em relação à eficácia do vídeo-otoscópio, obteve-se uma média de 3.24, com um desvio padrão de 1.44, o que indica uma ampla dispersão nas perceções de eficácia. Já os pacientes avaliaram o conforto e ergonomia do dispositivo com uma média de 2.75 e da comparação da satisfação entre o vídeo-otoscópio e a otoscopia tradicional obteve-se uma média de 3.7. Estes resultados apontam para uma necessidade clara de melhorias em diversos aspetos do dispositivo desenvolvido. A perceção dos utilizadores, tanto profissionais quanto pacientes, é fundamental para orientar as melhorias necessárias a implementar no protótipo de modo a garantir que o equipamento atenda às reais necessidades de todos os envolvidos.

Os comentários qualitativos fornecidos nos inquéritos ajudaram a identificar diversas limitações significativas do equipamento atual. Uma das principais limitações mencionadas foi a dificuldade de fixação do dispositivo, particularmente do arnês. Além disso, vários utilizadores relataram dificuldades em realizar a retração do pavilhão auricular. Esta dificuldade impactou negativamente o posicionamento da câmara, resultando numa inserção menos eficiente e numa visualização limitada do tímpano.

Outra limitação apontada foi o tamanho da câmara do vídeo-otoscópio, que era demasiado grande para canais auditivos estreitos, dificultando a introdução e comprometendo a eficácia do exame. Os utilizadores sugeriram que a câmara fosse de menor diâmetro e que tivesse uma ponteira mais fina para melhorar a inserção, particularmente em pacientes com canais auditivos estreitos.

A ergonomia do vídeo-otoscópio também foi identificada como uma área de melhoria. Foi sugerido que a estrutura de suporte fosse mais confortável e ajustável, utilizando materiais mais suaves e flexíveis.

Outra limitação destacada foi a dificuldade em manipular o ângulo de inclinação da câmara, o que dificultava a visualização da membrana timpânica, especialmente em canais auditivos que não tinham uma abertura direta. O aumento da flexibilidade do vídeo-otoscópio, permitindo um ajuste mais fácil do ângulo de inserção, foi considerada essencial para uma visualização completa do canal auditivo externo.

Além disso, os utilizadores mencionaram que a captação de imagens implicava manter uma mão livre, o que dificultava a realização simultânea de outras ações, como a retração do pavilhão auricular. Foi sugerido integrar um botão no próprio vídeo-otoscópio para facilitar a captação de imagens, permitindo uma operação mais fluida e eficiente.

## **4.2 Propostas de Otimização**

A primeira proposta de otimização é a alteração da geometria do vídeo-otoscópio para desobstruir a retração manual da orelha por parte do profissional de saúde, aumentando o espaço que já era destinado a esse efeito. Durante os ensaios de validação, constatou-se que a configuração atual do dispositivo dificultava o acesso manual ao pavilhão auricular, comprometendo a realização do exame. A modificação da geometria permitirá uma melhor execução da retração manual, facilitando o procedimento e a visualização das estruturas auditivas.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de validação, foram identificadas várias outras áreas de melhoria com o objetivo de otimizar o vídeo-otoscópio, tornando-o mais eficaz, confortável e adaptável para os utilizadores. Uma das propostas é a redução do diâmetro da câmara em cerca de 2-3 milímetros, uma vez que a configuração atual apresenta dificuldades de inserção em canais auditivos estreitos. A criação de uma câmara de menor diâmetro, juntamente com uma ponteira mais fina, permitirá uma introdução mais confortável e uma visualização mais eficaz das estruturas internas do canal auditivo.

A flexibilidade do vídeo-otoscópio deve também ser aprimorada, permitindo um ajuste mais fácil do ângulo de inserção da câmara. Isto poderá ser alcançado, por exemplo, através da adição de um ou mais componentes maleáveis (e possivelmente removendo componentes que se tornem desnecessários), mantendo a rigidez necessária para garantir a estabilidade do sistema. Esta melhoria facilitará a visualização da membrana timpânica, especialmente em canais auditivos que não apresentem uma abertura direta, garantindo uma visualização mais completa e precisa das estruturas auditivas.

Adicionalmente, sugere-se a integração de um botão para captação de imagens diretamente no vídeo-otoscópio, de forma a tornar a operação mais eficiente. Durante os ensaios, verificou-se que a necessidade de manter uma mão livre para captar imagens dificultava a execução de outras ações simultâneas, como a retração do pavilhão auricular. A integração deste botão permitirá ao profissional de saúde realizar o exame de forma mais fluida, melhorando a eficiência e a qualidade do processo.

Por fim, o sistema de fixação do arnês deve ser simplificado. A dificuldade em garantir uma fixação adequada comprometeu a eficácia do dispositivo durante os exames. Assim, a introdução de um sistema de suporte mais robusto e intuitivo, que se adapte facilmente às diferentes anatomias dos pacientes, será essencial para garantir um exame estável e confortável. Funcionalidades como ajustes automáticos e pontos de fixação de fácil manipulação poderão facilitar a utilização do sistema e garantir um ajuste rápido e eficiente.

Estas propostas de otimização têm como objetivo resolver as limitações identificadas, tornando o vídeo-otoscópio uma ferramenta mais eficaz, adaptável e

fácil de utilizar, garantindo uma melhor experiência tanto para os profissionais de saúde como para os pacientes.

### **4.3 Considerações Finais**

As propostas de otimização apresentadas neste capítulo têm como objetivo superar as limitações identificadas durante os ensaios de validação do vídeo-otoscópio, de modo a melhorar a sua eficácia, conforto e adaptabilidade. As mudanças sugeridas, como a alteração da geometria para desobstruir a retração manual, a redução do diâmetro da câmara, a melhoria da flexibilidade do ângulo de inserção, a integração de um botão para captação de imagens e a simplificação do sistema de fixação do arnês, visam tornar o dispositivo mais funcional e fácil de utilizar tanto para os profissionais de saúde como para os pacientes.

A implementação destas propostas é um passo importante para garantir que o vídeo-otoscópio responda às necessidades clínicas de forma mais robusta, facilitando o trabalho dos audiologistas e aumentando o bem-estar dos pacientes.

Assim, a otimização do vídeo-otoscópio deve ser encarada como um processo contínuo, onde o *feedback* dos utilizadores desempenha um papel essencial. Através de uma abordagem iterativa de desenvolvimento e validação, será possível assegurar que o dispositivo evolua constantemente, adaptando-se às exigências da prática clínica e promovendo melhorias contínuas na qualidade dos cuidados de saúde.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento do vídeo-otoscópio apresentado neste trabalho visa contribuir para a melhoria dos métodos de diagnóstico otorrinolaringológicos, proporcionando um dispositivo mais eficiente, adaptável e confortável tanto para os profissionais de saúde como para os pacientes. Além disso, o vídeo-otoscópio foi desenvolvido com o objetivo de possibilitar a reconstrução 3D do canal auditivo externo. Durante os ensaios de validação, foram identificadas limitações que indicaram a necessidade de alterações no design e na funcionalidade do vídeo-otoscópio, resultando em propostas concretas de otimização, descritas no capítulo anterior.

Contudo, o trabalho não se encerra com as propostas de melhoria apresentadas. Para garantir que o vídeo-otoscópio atenda, de forma eficaz e segura, às necessidades clínicas, é essencial dar continuidade ao processo de desenvolvimento, aplicando as mudanças sugeridas e realizando novos ensaios de validação. Testes futuros devem incluir uma amostra maior de utilizadores, de modo a assegurar que o dispositivo seja testado em diferentes cenários e perfis de pacientes, permitindo um refinamento contínuo do design e da funcionalidade.

Além disso, deve ser explorada a integração de novas tecnologias que possam melhorar ainda mais o desempenho do vídeo-otoscópio, tornando-o uma ferramenta ainda mais eficiente e versátil para a utilização clínica. Por exemplo, a incorporação de inteligência artificial para a análise automática das imagens obtidas poderia facilitar significativamente o diagnóstico. Através de algoritmos avançados de aprendizagem automática e redes neurais, o sistema seria capaz de identificar padrões associados a patologias auriculares, destacando possíveis anomalias de forma rápida e precisa. Esta funcionalidade não só reduziria o tempo necessário para a análise por parte dos profissionais de saúde, como também minimizaria a possibilidade de erros humanos durante a interpretação das imagens. Para além disso, a utilização de inteligência artificial poderia contribuir para o desenvolvimento de uma base de dados dinâmica e em constante evolução, alimentada por diagnósticos anteriores e novas descobertas médicas, permitindo um processo de aprendizagem contínuo do sistema. Desta forma, o vídeo-otoscópio não seria apenas uma ferramenta de diagnóstico, mas também uma plataforma de apoio à decisão clínica. Além disso, a utilização de sensores adicionais para monitorizar o posicionamento do vídeo-otoscópio durante o exame poderia proporcionar feedback em tempo real, melhorando a precisão do procedimento.

Adicionalmente, a utilização das imagens capturadas para a reconstrução 3D do canal auditivo é uma possibilidade promissora. Este processo pode ser realizado através da aquisição de imagens do canal auditivo utilizando um dispositivo de captura, como um vídeo-otoscópio equipado com uma câmara de alta resolução. As imagens são então processadas por um *software* especializado, que utiliza algoritmos de visão computacional para gerar um modelo tridimensional preciso do canal auditivo. Este modelo é construído a partir da sobreposição de várias imagens 2D

## *Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*

capturadas em diferentes ângulos, permitindo assim uma representação fidedigna da geometria do canal auditivo do paciente.

Uma vez obtida a reconstrução 3D, o modelo pode ser utilizado para produzir moldes auriculares personalizados. Este processo começa pela conversão do modelo digital num ficheiro adequado para impressão 3D, como um ficheiro STL. A partir deste ficheiro, uma impressora 3D é utilizada para produzir um molde físico que replica precisamente a anatomia do canal auditivo do paciente. Dependendo do material utilizado na impressão, o molde pode ser diretamente usado ou servir como base para fabricar dispositivos como aparelhos auditivos ou protetores auriculares.

Esta abordagem acarreta grandes vantagens, como a maior precisão na adaptação dos dispositivos ao canal auditivo e conseqüente aumento do conforto e eficácia para o paciente. Além disso, o uso da impressão 3D permite uma produção rápida e personalizada, reduzindo o tempo entre o diagnóstico e a disponibilização dos dispositivos ao paciente, bem como aumentando a qualidade dos mesmos, dado que o ajuste é baseado na anatomia específica de cada indivíduo.

Por fim, é fundamental que o processo de desenvolvimento do vídeo-otoscópio seja colaborativo, envolvendo não apenas engenheiros, mas também profissionais de saúde e pacientes. O feedback contínuo dos utilizadores será essencial para identificar novas áreas de melhoria e garantir que o dispositivo se adapte às práticas clínicas em constante evolução. A otimização do vídeo-otoscópio deve ser encarada como um processo iterativo e dinâmico, visando sempre a melhoria da qualidade dos cuidados de saúde e a satisfação dos pacientes.

Assim, este trabalho apresenta uma base sólida para o desenvolvimento contínuo do vídeo-otoscópio, com propostas de melhorias concretas e caminhos claros para futuras investigações e avanços tecnológicos. Através de um esforço colaborativo e da aplicação das sugestões apresentadas, espera-se que o vídeo-otoscópio evolua para se tornar uma ferramenta indispensável na prática clínica, oferecendo diagnósticos mais precisos e melhorando a experiência dos pacientes durante o exame auditivo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agarwal, S., Mierle, K., & outros. (2011). VisualSFM: A visual structure-from-motion system. Recuperado de <http://ccwu.me/vsfm/>

AIT Austrian Institute of Technology GmbH. (2023). 3D non-contact measurement of ear canals and small holes. Recuperado de <https://www.ait.ac.at/news-events/single-view/detail/7709?cHash=1f2d12750ac20f4e2d97b96e63bf4e03>

AliceVision. (2020). AliceVision: 3D Reconstruction Framework. Recuperado de <https://alicevision.org/>

Anastasiadou, S., & Al Khalili, Y. (2023). Hearing loss - StatPearls. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK542323/>

Beyer, C., & Younker, S. (2011, 26 de setembro). Preventing medical errors for audiologists-2011 update. *AudiologyOnline*. Recuperado de <https://www.audiologyonline.com/articles/preventing-medical-errors-for-audiologists-806>

Boer, C., e outros. (2019). Clinical approach after complicated ear mold fitting: A case series of six patients and evaluation of literature. *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology*, 128.

Bower, C., Reilly, B. K., Richerson, J., Hecht, J. L., Committee on Practice & Ambulatory Medicine, & Section on Otolaryngology–Head And Neck Surgery. (2023). Hearing assessment in infants, children, and adolescents: Recommendations beyond neonatal screening. *Pediatrics*, 152(3), e2023063288. <https://doi.org/10.1542/peds.2023-063288>

Braun Janzen, T., Koshimori, Y., Richard, N. M., & Thaut, M. H. (2022). Rhythm and music-based interventions in motor rehabilitation: Current evidence and future perspectives. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.789467>

Chell, A. (2019). Natus Otometrics Otoscan: Clinical review. *Hearables Online*. Recuperado de <https://hearablesonline.co.uk/natusotometricsotoscan-review/>

Cho, S.-D., e outros. (2021). Earmold foreign bodies in the middle ear necessitating surgical removal: Why otology specialists should screen candidates for hearing aids. *Clinical and Experimental Otorhinolaryngology*, 14(2), 235-239.

*Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*

- Covestro. (2019). Customizable materials for 3D printed hearing aids. Recuperado de <https://solutions.covestro.com/en/highlights/articles/stories/2019/3d-hearing-aids>
- Dumont, E., e outros. (2017). *Photogrammetry and 3D Modeling for Engineering Applications*. Springer.
- Du, Y., Homma, K., & Saunders, W. R. (2008). Noise attenuation performance of deep-insert custom earplugs under single and double hearing protection. *Noise Control Engineering Journal*, 56(3), 183-202. <https://doi.org/10.3397/1.2920707>
- Fligor, B. (2012). Clinical verification of custom-fitted musicians' earplugs. *AudiologyOnline*. Recuperado de <https://www.audiologyonline.com/articles/clinical-verification-custom-fitted-musicians-11373>
- Furtado, E., & Pinho, D. (2021). Aplicações do COLMAP em reconstrução 3D de ambientes complexos. *Revista Brasileira de Engenharia e Tecnologia*, 15(2), 153-167.
- Gregoret, L. (2019). How does the Lantos 3D scanning system work? *AudiologyOnline*. Recuperado de <https://www.audiologyonline.com/ask-the-experts/does-lantos-3d-scanning-system-26157>
- Hassaan, M., e outros. (2021). Automatic detection of acute otitis media using deep learning techniques. *Journal of Otolaryngology–Head & Neck Surgery*, 50(1), 1-10.
- Lee, H.-M., e outros. (2017). Hearing aid silicone impression material as a foreign body in the middle ear. *American Journal of Otolaryngology*, 38(1), 108-111.
- McMillion, M. (2021). How Dr. Sheryl Lewin uses Artec Space Spider to create beautiful new ears for microtia patients. Artec Europe. Recuperado de <https://www.artec3d.com/cases/lewin-ear>
- Meshroom. (2023). Meshroom: A Free Open-Source Photogrammetry Software. Recuperado de <https://meshroom-manual.readthedocs.io/>
- Moreno-Morales, C., Calero, R., Moreno-Morales, P., & Pintado, C. (2020). Music therapy in the treatment of dementia: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Medicine*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmed.2020.00160>
- OtoAI. (2021). AI-powered software for the diagnosis of inner ear disorders. *Journal of Medical Systems*, 45(8), 89.

Phillips, J. (2019). Otoscan - 3D ear scanning: The future is now! *AudiologyOnline*. Recuperado de <https://www.audiologyonline.com/articles/otoscan-3d-ear-scanning-future-24421>

Pirzanski, C. (2006, 1 de abril). Earmolds and hearing aid shells: A tutorial. *The Hearing Review*. Recuperado de <https://hearingreview.com/hearing-products/accessories/earmolds/earmolds-and-hearing-aid-shells-a-tutorial>

Ramakers, G. G., Kraaijenga, V. J., Cattani, G., van Zanten, G. A., & Grolman, W. (2016). Effectiveness of earplugs in preventing recreational noise-induced hearing loss: A randomized clinical trial. *JAMA Otolaryngology–Head & Neck Surgery*, 142(6), 551-558. <https://doi.org/10.1001/jamaoto.2016.0225>

Schönberger, J. L., & Frahm, J. M. (2016). Structure-from-Motion Revisited. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016.

Stefanson, J. R., & Ahroon, W. (2019, dezembro). Evaluation of custom hearing protection fabricated from digital ear scanning and traditional methods. USAARL Report No. 2020-06. U.S. Army Aeromedical Research Laboratory, Warfighter Performance Group. Recuperado de <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1090021.pdf>

Stewart, C. (2021). Use of various hearing aids by market share in U.S. *Statista*. Recuperado de <https://www.statista.com/statistics/664453/different-hearing-aids-used-by-the-market-in-us/>

Strom, K. (2012). 3DM scans the future of hearing care. *Hearing Review*, 19(7), 28-35.

Tanna, R. J., Lin, J. W., & De Jesus, O. (2023). Sensorineural hearing loss - *StatPearls*. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK565860/>

Uslu, O. (2018, 26 de novembro). Earmolds primer: Custom earmolds essentials. *AudiologyOnline*. Recuperado de <https://www.audiologyonline.com/articles/earmolds-primer-custom-earmolds-essentials-24101>

Verdam, F., Tange, R., & Thomeer, H. (2016). Impression material in the external and middle ear: An overview of the literature and a stepwise approach for removal. *Journal of International Advanced Otolaryngology*, 12(3), 345-352.

World Health Organization (WHO). (2024). Deafness and hearing loss. Recuperado de <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>

*Desenvolvimento e construção de um vídeo-otoscópio com scanner integrado para impressão 3D de moldes auriculares*

Ye, X., Li, L., He, R., Jia, Y., & Poon, W. (2022). Rhythmic auditory stimulation promotes gait recovery in Parkinson's patients: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Neurology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.940419>

Yoshioka, S., e outros. (2017). Surgical removal of hearing aid ear mold impression material from the middle ear: A report of two cases. *Fujita Medical Journal*, 3(3), 72-75.

Zhang, L., e outros. (2018). Comparison of photogrammetric software for 3D model reconstruction. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(4), 1-10.

Zhou, Y., e outros. (2019). DeepHear: An artificial intelligence approach to hearing loss detection. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 27(4), 746-754.