

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS SILVA COELHO

**TÉCNICAS E FERRAMENTAS CAD 3D PARA TRATAMENTO DE  
SUPERFÍCIES COMPLEXAS VISANDO A FABRICAÇÃO DE  
ÓRTESES POR MANUFATURA ADITIVA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

LUCAS SILVA COELHO

**TÉCNICAS E FERRAMENTAS CAD 3D PARA TRATAMENTO DE  
SUPERFÍCIES COMPLEXAS DIGITALIZADAS VISANDO A  
FABRICAÇÃO DE ÓRTESES POR MANUFATURA ADITIVA**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. José Aguiomar Foggiatto

Co-orientador: Mateus Weigert

CURITIBA

2016

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa " TÉCNICAS E FERRAMENTAS CAD 3D PARA TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES COMPLEXAS DIGITALIZADAS VISANDO A FABRICAÇÃO DE ÓRTESES POR MANUFATURA ADITIVA ", realizado pelo aluno Lucas Silva Coelho, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. José Aguiomar Foggiatto

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR

Orientador

Prof. Antonio Verguetz Silva

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR

Avaliador

Prof. M.e Nilton Luiz Cararo

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 06 de novembro de 2016.

Aos meus pais que sempre me apoiaram e me possibilitaram chegar até onde cheguei. A eles, serei eternamente grato.

## RESUMO

COELHO, Lucas Silva. Técnicas e ferramentas CAD 3D para o tratamento de superfícies complexas digitalizadas visando a fabricação de órteses por manufatura aditiva. 2016. 88 f. Monografia – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Este trabalho apresenta a proposição de um procedimento para a correção manual de malhas obtidas a partir da digitalização 3D de moldes representativos de membros superiores. Atualmente o processo de aquisição de uma órtese pelo SUS (Sistema Único de Saúde) chega a levar 6 meses, devido a diversos fatores burocráticos e tecnológicos. Grande parte da população que necessita de produtos assistivos vive em situações de carência social associadas a baixa renda familiar, o que dificulta a aquisição de órteses de modo particular através de clínicas especializadas. Neste contexto, observa-se a necessidade de um procedimento de confecção de órteses que permita uma redução do tempo de espera, uma diminuição dos custos associados ao processo e uma maior fidelidade à anatomia do paciente. Dentro desta linha de pesquisa, desenvolvida pelo NUFER (Núcleo de Prototipagem e Ferramental da UTFPR), verifica-se uma deficiência de literatura sobre correção manual de malhas visando a confecção do produto por Manufatura Aditiva. Para isso, desenvolveu-se um estudo sobre correção de malhas através de dois programas: Meshmixer e 3Ds Max. As malhas foram obtidas por meio de digitalização 3D de moldes de gesso com uso de duas técnicas: uma utilizando o sensor do kinect e outra com o programa ReMake, que utiliza fotos do objeto para gerar o modelo 3D. Em seguida elas foram comparadas, corrigidas e validadas, de modo que os resultados finais são adequados para fabricação pelos processos de Manufatura Aditiva. Com o estudo desenvolvido, pôde-se concluir que somente o programa Meshmixer foi eficaz na correção das malhas com o procedimento de correção proposta.

**Palavras-chave:** Tratamento de superfícies 3D. Arquivos STL. Ferramentas CAD 3D. Órteses. Manufatura aditiva.

## ABSTRACT

COELHO, Lucas Silva. Técnicas e ferramentas CAD 3D para tratamento de superfícies complexas digitalizadas visando a fabricação de órteses por manufatura aditiva. 2016. 88 f. Monografia – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

This paper presents a proposal of a procedure for manual correction of meshes obtained from 3D digitalization of representative molds of superior members. Currently, the process of acquisition of an orthosis from SUS (Health Unic System) can come up to 6 months due to many bureaucratic and technological factors. The most part of the population who need assistive products live in situations of social deprivation associated with low income, fact that makes it difficult to have access to orthosis through specialized clinics. In this context, it can be observed the need for an orthosis manufacturing procedure which allows a reduction in time and costs as well as a better representation of the patient real geometry. Within this line of research developed by NUFER (Core of Prototyping and Tooling of UTFPR), it can be observed a lack of literature about mesh manual correction aiming the production through Additive Manufacturing technologies. Therefore it has been developed a study on mesh correction through two softwares: Meshmixer and 3Ds Max. The meshes were obtained by 3D scanning of plaster molds using two techniques: the first one using the kinect sensor and second on using the software Remake, which uses pictures of the object to generate the 3D model. Then they were compared, validated and corrected, so that the final results are suitable for Additive Manufacturing processes. With the study developed, it could be concluded that only Meshmixer was effective in correcting meshes with the proposed correction procedure.

**Key words:** 3D Surfaces correction. STL File. 3D CAD software. Additive Manufacturing.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquematisação do Processo de Produção de Órteses por Manufatura Aditiva.....	18
Figura 2 - Exemplo de Fabricação por Adição de Aaterial em Camadas. ....	23
Figura 3 - Influência da Espessura das Camadas na Forma Final do Produto. ....	24
Figura 4 - Triângulo no Formato STL. ....	27
Figura 5 - Exemplo de Aplicações do Pprograma Meshmixer.....	28
Figura 6 - Exemplificação da Tela Inicial do Programa Meshmixer.....	29
Figura 7 - Exemplos (a) e (b) de Modelagens com o Meshmixer. ....	30
Figura 8 - Exemplos (a) e (b) de Modelagens com o 3Ds Max. ....	31
Figura 9 - Influência da Quantidade de Faces na Representação da Forma. ....	32
Figura 10 - Exemplos de Defeitos que Podem Ser Encontrados em Superfícies. (a) Ruído, (b) Chanfro, (c) Vértice Compartilhado, (d) Orientação Inconsistente, (e) Auto-interseção, (f) Lacunas e (g) Espaçamentos. ....	33
Figura 11 - Fluxograma Geral da Metodologia de Trabalho.....	37
Figura 12 - Moldes de Gesso Usados na Digitalização 3D. (a) Molde A, (b) Molde B e (c) Molde C. ....	38
Figura 13 - (a) Kinect ONE. (b) Exemplo de Posicionamento dos Moldes. ....	39
Figura 14 - Exemplo de Posicionamento do Molde com Objetos Aleatórios ao Seu Redor.....	40
Figura 15 - Escalonamento das Malhas no Programa Remake com o Auxílio da Reta de Rferência de 70 mm.....	40
Figura 16 - Exemplo de Medição de Um Par de Pontos. (a) Indicação dos Pontos 5-5 no Molde, (b) Medição dos Pontos 5-5 com Paquímetro e (c) Medição dos Pontos 5-5 no Programa ReMake.....	42
Figura 17 - Fluxograma Geral dos Procedimentos de Correção e Modelagem Propostos Para Correção de Malhas. ....	43

Figura 18 - Fluxograma do Processo de Correção e Modelagem Proposto Para Correção de Malhas Pelo Programa Meshmixer.....	44
Figura 19 - (a) Tela Inicial do Programa Meshmixer Com a Visualização do MakerBot Replicator, (b) Tela Inicial do Programa Meshmixer Sem a Visualização do MakerBot Replicator.....	45
Figura 20 - Exemplo de Reposicionamento de uma Malha pelo Programa Meshmixer. (a) Ferramenta "Select". (b) Seleção Inicial. (c) Eixo de Translação e Rotação. (d) Malha Reposicionada.....	46
Figura 21 - Exemplificação da Etapa de Limpeza Geral da Malha. (a) Seleção da Região Desnecessária. (b) Resultado Final da Limpeza.....	48
Figura 22 - Exemplificação da Aplicação da Ferramenta "Remesh". (a) Configuração Inicial Sem "Remesh". (b) Refinamento Após "Remesh".	49
Figura 23 - Processo de Definição do Contorno da Superfície. (a) Delimitação Inicial do Contorno. (b) Suavização do Contorno. (c) Seleção da Malha Exterior ao Contorno. (d) Resultado Final da Limpeza da Malha Para Definição do Contorno. ....	50
Figura 24 - Exemplo de Aplicação da Ferramenta "Erase & Fill" (a) na Correção de um Furo, (b) na Correção de uma Deformidade da Superfície.....	51
Figura 25 - Exemplo de Aplicação da Ferramenta "RobustSmooth". ....	52
Figura 26 - Exemplo da Aplicação da Ferramenta "Smooth". (a) Detalhe da Malha do Molde de Gesso. (b) Superfície da Malha Digitalizada. (c) Malha Antes do <i>Smooth</i> (d) Malha Após o <i>Smooth</i> . ....	53
Figura 27 - Exemplo da Aplicação da Ferramenta "RobustSmooth" na Suavização do Contorno da Malha.....	53
Figura 28 - Exemplo da Aplicação de Espessamento na Malha. ....	54
Figura 29 - Exemplo de Correção de um Defeito de Borda Após a Extrusão.....	54
Figura 30 - Exemplo de Suavização das Arestas das Bordas Pela Aplicação da Ferramenta "RobustSmooth".....	55
Figura 31 - Fluxograma dos Procedimentos de Correção e Modelagem Propostos Para Correção de Malhas Pelo Programa 3Ds Max.....	56

Figura 32 - Menu de Importação de Malhas STL Pelo 3Ds Max.....	56
Figura 33 - Eixos de Translação e Rotação Para Reposicionamento de Malhas Pelo Programa 3Ds Max. ....	57
Figura 34 - (a) Conversão da Malha Em Um Polígono Editável. (b) Menu de Seleção (c) Ferramentas de Seleção.....	58
Figura 35 - Exemplo de Utilização da Ferramenta de Seleção Por Laço Para Limpeza Geral da Malha. ....	59
Figura 36 - Exemplo da Definição do Contorno da Malha Através da Ferramenta de Seleção por Laço.....	60
Figura 37 - Exemplo de Suavização do Contorno Com a Aplicação da Ferramenta "Cut". ....	60
Figura 38 - Exemplo da Correção de (a) Um Defeito do Tipo <i>Hole</i> , (b) Uma Deformidade na Malha. ....	61
Figura 39 - Exemplo da Aplicação da Ferramenta " <i>Relax</i> ".....	62
Figura 40 - Exemplo da Aplicação da Ferramenta " <i>Shell</i> " Para Espessamento da Malha.....	62
Figura 41 - Comparação Entre o Molde (a) e os Resultados de Digitalização de Geometrias Negativas Pelo Kinect (b) e Pelo ReMake (c).....	68
Figura 42 – Exemplo de Erro de Leitura da Superfície pela Digitalização Com o Kinect. ....	69
Figura 43 - Exemplo da Aplicação da Influência do Valor de Escala de Suavização. (a) Valor de Escala de 1%. (b) Valor de Escala de 10%. (c) Valor de Escala de 25%. (d) Valor de Escala de 50%.....	71
Figura 44 - Exemplo de Borda com Auto-interseção Após Espessamento da Malha.....	72
Figura 45 - Comparação do Resultado de Suavização de Borda pelo Meshmixer (a) e Pelo 3Ds Max (b). ....	73
Figura 46 - Direção Obrigatória de Espessamento de Malhas Corrigidas.....	74

Figura 47 - Exemplo da Comparação Entre as Malhas Pelo Programa Geomagic. (a) Malha Sem Correção. (b) Malha Corrigida e Espessada. (c) Resultado Comparativo Entre as Malhas. ....	76
Figura 48 - Resultado da Comparação Pelo Geomagic Entre as Malhas Original e o Resultado Final Referentes à Malha A1 Corrigida Pelo Programa Meshmixer. ....	78
Figura 49 - Resultado da Comparação Pelo Geomagic Entre a Malha Original e o Resultado Final Referentes à Malha A1 Corrigida Pelo Programa 3Ds Max. ....	78
Figura 50 - Resultado da Comparação Pelo Geomagic Entre a Malhas Original e o Resultado Final Referentes à Malha B1 Corrigida Pelo Programa Meshmixer. ....	79
Figura 51 - Resultado da Comparação Pelo Geomagic Entre a Malha Original e o Resultado Final Referentes à Malha B1 Corrigida Pelo Programa 3Ds Max. ....	79
Figura 52 - Resultado da Comparação Pelo Geomagic Entre as Malhas Original e o Resultado Final Referentes à Malha C1 Corrigida Pelo Programa Meshmixer. ....	80
Figura 53 - Resultado da Comparação Pelo Geomagic Entre a Malha Original e o Resultado Final Referentes à Malha C1 Corrigida Pelo Programa 3Ds Max. ....	80
Figura 54 - Exemplo de Validação do Sólido Final Pela Ferramenta de Inspeção do Programa Meshmixer. ....	81
Figura 55 - Órtese Impressa. ....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados das Medições Comparativas dos Pares de Pontos Analisados no Molde A.....	64
Tabela 2 - Resultados das Medições Comparativas dos Pares de Pontos Analisados no Molde B.....	65
Tabela 3 - Resultados das Medições Comparativas dos Pares de Pontos Analisados no Molde C. ....	65

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultados das Medições Comparativas dos Pares de Pontos Analisados no Molde A.....	65
Gráfico 2 - Resultados das Medições Comparativas dos Pares de Pontos Analisados no Molde B.....	66
Gráfico 3 - Resultados das Medições Comparativas dos Pares de Pontos Analisados no Molde C.....	66

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS**

AM – Additive Manufacturing (Manufatura Aditiva)

ASTM – American Society for Testing and Materials

CAD – Computer Aided Design

CAM – Computer Aided Manufacturing

CCD – Coupled Charged Devices

IGES - Initial Graphic Exchange Specification

NUFER – Núcleo de Prototipagem e Ferramental

NURBS – Non-Uniform Rational B-Splines

OMS – Organização Mundial da Saúde

RP – Rapid Prototyping (Prototipagem Rápida)

STL – STereoLithography

SET - Standard d'Echange et de Transfert

SUS – Sistema Único de Saúde

TCC 2 – Trabalho de Conclusão de Curso 2

VDA - FS - Verband der Automobilindustrie – Flächen Schnittstell

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	Contexto do Tema	15
1.2	Caracterização do Problema	17
1.3	Objetivos	20
1.3.1	Objetivo Geral	20
1.3.2	Objetivos Específicos	20
1.4	Justificativa	21
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>22</b>
2.1	Manufatura Aditiva	22
2.2	Digitalização 3D	24
2.3	Arquivo de Formato STL	26
2.4	Ferramentas para Manipulação de Superfícies 3D	27
2.4.1	Meshmixer	28
2.4.2	3Ds Max	30
2.5	Superfícies 3D	31
2.6	Defeitos de Malhas Poligonais	33
2.7	Correção de Malhas Poligonais	35
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>37</b>
3.1	Aquisição das Superfícies	38
3.2	Validação das Malhas	41
3.3	Comparação Entre as Malhas Geradas	42
3.4	Procedimentos de Correção e Modelagem das Malhas	43
3.4.1	Procedimentos de Correção Pelo Programa Meshmixer	44
3.4.2	Procedimentos de Correção Pelo Programa 3Ds Max	55
3.5	Validação das Metodologias de Correção	62
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>64</b>
4.1	Avaliação das Malhas	64
4.2	Comparação das Malhas	67
4.3	Discussão Sobre os Procedimentos Utilizados	69
4.3.1	Correção de Defeitos	69
4.3.2	Suavização da Superfície	70
4.3.3	Suavização do Contorno da Malha	71
4.3.4	Extrusão da Superfície	73
4.4	Validação Final dos Resultados	75
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>83</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>84</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto do Tema

De acordo com a OMS (Organização Mundial da Saúde), 10% da população mundial é portadora de algum tipo de deficiência. Estudos estatísticos apontam que no Brasil esse número é de aproximadamente 14,5%. Filho (2011) apresenta um estudo que mostra que grande parte destas pessoas vive em uma realidade de carência social associada à baixa renda e baixo nível de escolaridade. Segundo Lima et al. (2014) isso potencializa os problemas enfrentados em função de barreiras sociais, preconceitos, desigualdade e desinformação.

Segundo Oliveira et al. (2008), dentre as deficiências, destaca-se a Paralisia Cerebral que apresenta cerca de 30 a 40 mil novos casos por ano, com incidência estimada de 7 em cada 1000 nascidos vivos em países em desenvolvimento contra 1,5 a 2,5 em cada 1000 nascidos vivos em países desenvolvidos.

De forma resumida, a Paralisia Cerebral conceitua-se por manifestações clínicas que têm em comum a desordem sensório-motora como consequência de uma lesão cerebral durante o período de desenvolvimento estrutural e funcional do cérebro (LIMA et al., 2014).

Com o intuito de possibilitar a independência de pessoas com deficiência, gradativamente são feitos investimentos em tecnologias que visam desenvolver produtos específicos para essa parcela da população. A estes resultados atribuiu-se o nome Tecnologia Assistiva (ALVES, 2011).

O termo Tecnologia Assistiva apresenta-se com uma grande abrangência, fazendo referência às ações de política pública e serviços e produtos desenvolvidos em benefício da autonomia e independência de pessoas com deficiência, como pode ser observado em sua denominação pelo Comitê Brasileiro de Tecnologia Assistiva.

“Tecnologia Assistiva é uma área do conhecimento, de característica interdisciplinar, que engloba produtos, recursos, metodologias, estratégias, práticas e serviços que objetivam promover a funcionalidade, relacionada à atividade e participação de pessoas com deficiência, incapacidades ou mobilidade reduzida, visando sua autonomia, independência, qualidade de vida e inclusão social (BRASIL, 2010).”

Um dos produtos assistivos de maior destaque em processos de tratamento de deficiências sensório-motoras para pessoas com Paralisia Cerebral são as órteses. Órteses são, de maneira geral, dispositivos empregados de modo terapêutico em distúrbios neuromusculoesqueléticos visando, principalmente, a correção de deformações articulares, proteção de áreas em processo de cicatrização, promover ou facilitar a amplitude de certos movimentos, promover repouso articular e reduzir a dor (TROMBLY, 2005).

De modo geral, a fabricação de uma órtese é um processo bastante artesanal, devido, em parte, aos custos envolvidos no processo e/ou à disponibilidade de recursos financeiros do paciente para o tratamento (AGNELLI; TOYODA, 2003). Uma das técnicas mais utilizadas baseia-se no aquecimento e moldagem de placas de termoplásticos, porém os resultados obtidos nem sempre apresentam uma boa fidelidade à anatomia do paciente. Uma das causas deste problema são as temperaturas de moldagem dos termoplásticos, já que eles se tornam moles e moldáveis quando em temperaturas entre 149°C e 177°C (AGNELLI; TOYODA, 2003), impossibilitando a modelagem da órtese diretamente no membro do paciente. Para amenizar este problema, terapeutas especializados fazem uso de termoplásticos de baixa temperatura, que são aquecidos em água com temperaturas entre 60°C e 77°C (TOYOFUKO; TOYODA, 2000), no entanto, este tipo de material acaba gerando o aumento dos custos do produto final.

Parte do problema enfrentado por crianças com Paralisia Cerebral diz respeito ao tempo de espera pela fabricação da órtese que auxiliará no tratamento. Atualmente o processo de fabricação de uma órtese chega a levar de 6 a 12 meses. A concessão de órteses pelo Sistema Único de Saúde (SUS) é bastante limitada devido a processos burocráticos e outros problemas que foram citados em um relatório do Conselho Nacional de Saúde em 2010 (BRASIL, 2010). De acordo com o documento, o SUS disponibiliza alguns modelos de órteses, no entanto elas não passam por nenhum tipo de teste sobre suas características funcionais. Deste modo, além do longo tempo para a obtenção das órteses, que pode acarretar em inadequação dimensional ao usuário, estes dispositivos podem não cumprir com o objetivo funcional proposto e assim entrar em desuso, considerando que estes não são fabricados com base nas especificações

anatômicas e funcionais de cada pessoa (BRASIL, 2010). A não customização da órtese, frequentemente acarreta em problemas como a existência de pontos de pressão que podem gerar úlceras e desconforto, fatores que são decisivos no desuso da órtese. Cerca de um terço dos produtos assistivos são abandonados pelo usuário devido a desconforto (PHILIPS, 1993).

Neste contexto, nota-se a necessidade de um processo de fabricação que permita não somente a customização de acordo com a anatomia de cada paciente, mas também propicie uma redução do tempo e dos custos de aquisição de uma órtese.

Um das tecnologias que merece destaque pelo grande avanço tecnológico que vem tendo nos últimos anos é a Manufatura Aditiva (AM, do inglês, *Additive Manufacturing*), também conhecida como Impressão 3D. Segundo Fernandes et. al. (2015) a Manufatura Aditiva pode favorecer o processo de confecção das órteses, trazendo como uma das principais vantagens a diminuição no tempo de fabricação.

## 1.2 Caracterização do Problema

Atualmente o NUFER (Núcleo de Prototipagem e Ferramental) da UTFPR vem desenvolvendo pesquisas com o intuito de estudar a viabilidade da introdução de processos de Manufatura Aditiva na confecção de órteses. Estas pesquisas visam propor um fluxo de processos para o desenvolvimento de órteses que auxilie na redução do tempo de produção, dos custos envolvidos no processo e ainda permita garantir uma maior fidelidade à anatomia do paciente.

A metodologia de desenvolvimento de órteses estudada no NUFER pode ser dividida basicamente em quatro etapas distintas: a aquisição da geometria do segmento corporal através da confecção de moldes de gesso; a digitalização destes moldes para geração de uma superfície 3D; o tratamento e correção da superfície gerada pela digitalização que dará origem a uma malha passível de ser espessada gerando um corpo sólido através de ferramentas CAD 3D e, por fim, a confecção da órtese através do processo de Manufatura Aditiva. A figura 1 exemplifica o passo-a-passo dos processos estudados.



**Figura 1 - Esquemática do processo de produção de órteses por manufatura aditiva.**

Fonte: Autoria Própria

No processo de aquisição da anatomia existem diversos métodos de digitalização empregando diferentes tecnologias que, de modo sucinto, transformam a leitura da superfície do objeto real em uma nuvem de pontos que passa por um algoritmo de tecelagem, que a transforma em uma malha. No entanto, independentemente da tecnologia utilizada na geração da nuvem de pontos, defeitos sempre estão presentes nas malhas e precisam ser corrigidos antes de a superfície poder ser usada para suas possíveis aplicações. Tecnologias como a Manufatura Aditiva, classificadas como “*downstream applications*” usam malhas triangulares fechadas e livres de defeitos como “*input*” (BISCHOFF; KOBELT, 2005).

Ao longo do desenvolvimento tecnológico de representações de modelos 3D, várias soluções foram propostas, no entanto as malhas poligonais e triangulares se tornaram padrão na maior parte das aplicações. Isto se deve basicamente ao fato de estas malhas apresentarem grande flexibilidade e terem sido diretamente suportadas durante muitos anos por hardwares de gráficos acelerados (ATTENE; CAMPEN; KOBELT, 2013).

No que se refere à correção e tratamento de malhas poligonais ou triangulares, o primeiro ponto de grande importância a ser observado é que sem essas ações corretivas e tendo como base superfícies provenientes de digitalização 3D, a utilização de processos de AM fica impossível. É pré-requisito para arquivos de entrada aos processos de AM que eles representem objetos 3D fechados e livres de defeitos. Deste modo, fica claro que o objeto de estudo deste trabalho, ressaltado pela Figura 1, é imprescindível ao sucesso dos estudos realizados pelo NUFER. Além disso, existem diversos estudos que elucidam os principais tipos de erros ou

defeitos que possam estar presentes nas superfícies digitalizadas, além de propor procedimentos para sua correção. Estes procedimentos são, basicamente, rotinas de análise e correção através de algoritmos computacionais. A utilização destes algoritmos requer programas específicos para o tratamento de superfícies que, além de serem, em sua grande maioria, pagos, necessitam de conhecimentos prévios sobre programação computacional por parte do usuário. Esta característica da utilização de algoritmos corretores foge ao objetivo da linha de pesquisa desenvolvida no NUFER, que visa propor um novo fluxo de ações para o desenvolvimento de órteses que auxilie na redução do tempo de produção, bem como nos altos custos envolvidos no processo e ainda permita garantir a fidelidade à anatomia do paciente.

Durante o desenvolvimento deste novo fluxo de ações para fabricação de órteses, extensas pesquisas foram feitas nos mais diversos bancos de dados de trabalhos, teses, dissertações, “*journals*” e revistas de tecnologia e todas apontam para a utilização de algoritmos para o tratamento e correção de malhas. Não foram encontrados resultados significativos sobre correções de malhas de forma manual através de programas de fácil uso e de licença gratuita, ou de baixo custo.

Como exemplo, pode-se citar a pesquisa feita no banco de dados *Scopus* e *ISI Web of Knowledge*, dois dos mais completos em termos de teses, artigos, dissertações e livros, abrangendo uma grande multidisciplinaridade. A busca por bibliografia através do *Scopus* e no *ISI Web of Knowledge* foi feita limitando-se trabalhos publicados entre os anos 2000 e 2016, nas áreas de engenharia, ciência da computação, matemática e medicina. Os termos chave foram pesquisados em inglês e em diversas combinações. Utilizou-se como palavras-chave: *mesh*, *triangular mesh*, *poligonal mesh*, *mesh repair*, *mesh completion*, *mesh reconstruction*, *CAD*, *3D surfaces*, *polygonal model*, *geometrical erros*, *point clouds*, *algorithms*, *orthesis*, *aditive manufacturing* e *rapid prototyping*. Em todas as combinações de palavras e suas derivadas usadas como base para a pesquisa, ficou claro a predominância de trabalhos relacionados à correção de malhas triangulares ou poligonais baseada em algoritmos matemáticos computacionais.

Visto essa carência de material que possa auxiliar na correção de malhas seguindo os preceitos da linha de pesquisa do NUFER, fica clara a necessidade do

desenvolvimento de um procedimento de correção de malhas de forma mais simples e de baixo custo.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem por objetivo geral descrever os procedimentos necessários para o tratamento e correção de superfícies 3D digitalizadas para possibilitar a fabricação de órteses através de tecnologias de Manufatura Aditiva.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos deverão ser alcançados:

- Contextualizar a situação problema, apresentando as dificuldades encontradas no processo de aquisição e desenvolvimento de órteses, pela população que vivencia situações de carência social associada à baixa renda.
- Embasar teoricamente à situação problema, apresentando suas possibilidades e limitações quanto aos seus aspectos tecnológicos e financeiros.
- Comparar as malhas geradas pela digitalização 3D, listando suas diferenças e pontos em comum, frente ao método de aquisição de superfície empregado.
- Caracterizar as malhas quanto aos seus principais defeitos a serem corrigidos.
- Caracterizar os programas CAD a serem utilizados quanto às suas ferramentas e suas funcionalidades.
- Desenvolver um procedimento para tratamento e correção das malhas, que permita a maior fidelidade à forma original possível, para cada ferramenta CAD utilizada.
- Comparar os resultados dos procedimentos propostos, visando determinar qual é o melhor.

- Validar os procedimentos propostos através da análise da malha final pelo programa GeoMagic.

#### **1.4 Justificativa**

A temática escolhida para este trabalho é sustentada por dois pilares principais: contribuir com a pesquisa desenvolvida pelo NUFER, que visa oferecer uma alternativa à solução de um problema de conjuntura social e a possibilidade da elaboração de um roteiro que possa servir como base para o desenvolvimento de futuros trabalhos relacionados à correção de malhas 3D.

O desenvolvimento de um fluxo de processos para a correção das superfícies e sua posterior modelagem para possibilitar a confecção de órteses customizadas através da Manufatura Aditiva, gerando uma redução do tempo, dos custos e que apresente maior fidelidade à anatomia real do paciente, é de grande importância, pois pode trazer novas possibilidades e perspectivas de tratamento a pessoas que necessitam de órteses e vivem uma situação de baixa renda e carência social. Deste modo, o sucesso das pesquisas desenvolvidas pelo NUFER deve ser encorajado. Para tal sucesso, é indispensável que seja feito um estudo aprofundado sobre cada processo que compõe a metodologia estudada. A correção de malhas provenientes de superfícies 3D digitalizadas se apresenta com grande importância dentro dessa linha de pesquisa, uma vez que sem um devido tratamento e correção destas malhas, não é possível a aplicação da Manufatura Aditiva na confecção de órteses.

Um segundo ponto que justifica a realização deste trabalho é a possibilidade do desenvolvimento de um material que possa servir como base para futuros trabalhos relacionados à correção de malhas provenientes de digitalizações de superfícies 3D. Como já dito anteriormente, as pesquisas mostraram a falta de trabalhos relacionados à correção de malhas utilizando programas de CAD 3D.

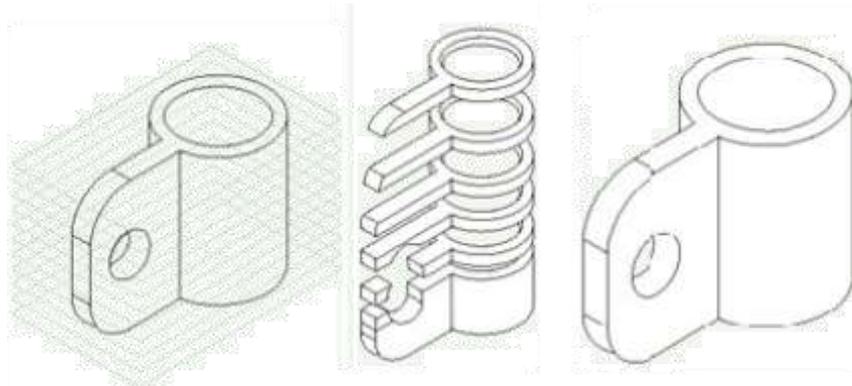
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Manufatura Aditiva trabalha principalmente com arquivos no formato “.stl”. Estes arquivos podem ser gerados por meio de técnicas de escaneamento 3D que permitem a digitalização de um modelo real. Tal digitalização, por sua vez, gera malhas representadas em arquivos no formato “.stl”, no entanto estas malhas possuem defeitos que precisam ser tratados e corrigidos através de programas CAD 3D, antes de se tornarem válidos para Manufatura Aditiva. Deste modo, a seguir apresenta-se o embasamento teórico necessário ao desenvolvimento deste trabalho, contextualizando as tecnologias de Manufatura Aditiva, digitalizações 3D, arquivos “.stl”, os programas necessários para a manipulação das malhas e os problemas e defeitos que podem ser encontrados nas malhas e que precisam ser corrigidos.

### 2.1 Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva (AM, do inglês, *Additive Manufacturing*) é uma tecnologia relativamente antiga, estando comercialmente disponível desde o final dos anos 80. Porém foi somente nos últimos anos que ela ganhou um maior espaço devido ao desenvolvimento de novos equipamentos e materiais, assim como a quebra de algumas patentes que possibilitou o desenvolvimento de equipamentos *open source* e de máquinas comerciais de baixo custo.

O termo Manufatura Aditiva, também conhecida como Impressão 3D, é uma evolução do que se chamava de Prototipagem Rápida (RP, do inglês, *Rapid Prototyping*). Ela pode ser descrita basicamente como um processo de fabricação no qual o produto é obtido pela adição de material em camadas a partir de um modelo digital criado em um sistema CAD 3D (*Computer Aided Design*) (VOLPATO, 2007), como exemplificado na Figura 2.



**Figura 2 - Exemplo de fabricação por adição de material em camadas.**  
**Fonte: Moldes Plásticos (2015)**

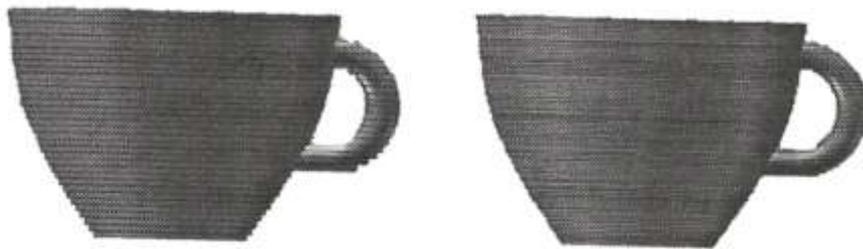
Um dos principais fatores que determinou a mudança terminológica do processo de *Rapid Prototyping* foi justamente a finalidade para com a qual ele era utilizado. O termo Prototipagem Rápida caracterizava o produto oriundo de um processo de criação de protótipos ou modelos base, cuja principal característica era a rapidez na sua produção. Esses protótipos eram criados com o intuito de possibilitar um primeiro *feedback* dos clientes ou ajudar a ilustrar a ideia por trás do produto ainda durante o processo de desenvolvimento, uma vez que um modelo físico 3D, mesmo em escala reduzida, contribui muito mais no entendimento do conceito do que desenhos 2D. No entanto, esses modelos não possuíam características suficientes para serem utilizados como produto final, em termos industriais. Fatores como boa precisão dimensional e bom acabamento não eram alcançados em níveis aceitáveis (GIBSON; ROSEN; STUCKEN, 2009).

Com o desenvolvimento de novas tecnologias em materiais e processos e, principalmente, no ramo da eletrônica, foi possível criar modelos com melhor qualidade e precisão em relação ao modelo digital. Esse avanço possibilitou a utilização deste processo de fabricação para a produção de produtos acabados ou semiacabados, com operações posteriores somente para acabamento e limpeza. Este avanço, quando associado à outras tecnologias para formar cadeias de processos, possibilitou significativas reduções de tempo e custos no desenvolvimento de um produto. Assim, o campo de atuação da AM se expandiu de tal forma que um comitê técnico da ASTM International (*American Society for Testing and Materials*) acordou que uma nova terminologia seria necessária à tecnologia.

Recentemente foi normalizado como padrão o termo Manufatura Aditiva (AM, do inglês, *Additive Manufacturing*) (GIBSON; ROSEN; STUCKEN, 2009).

As principais características da Manufatura Aditiva são a flexibilidade e a capacidade de impressão de geometrias complexas, sem a necessidade de ferramental especial, como moldes que exigem um grande investimento monetário. Essas características conferem ao processo a possibilidade de atender às necessidades específicas de clientes, mesmo quando trabalhando com baixos volumes de produção.

A partir de um modelo 3D, o programa da máquina analisa a peça e a divide em fatias. Estas fatias são as camadas de material a serem depositadas sucessivamente para formar a peça. Assim, é fácil perceber que quanto mais finas forem essas camadas, melhor será o acabamento e a precisão do produto final, como pode ser observado na Figura 3. Porém a redução da espessura das camadas fica limitada ao tipo de tecnologia de AM a ser utilizada.



**Figura 3 - Influência da espessura das camadas na forma final do produto.**  
**Fonte: Gibson (2009, P. 2)**

Com o avanço da tecnologia e da disponibilidade de utilização de outros materiais, existem atualmente no mercado mais de 20 sistemas de Manufatura Aditiva, classificadas quanto ao tipo de matéria-prima utilizada (VOLPATO, 2007).

## **2.2 Digitalização 3D**

Atualmente a técnica de reconstrução digital de modelos reais tridimensionais é conhecida tanto no meio acadêmico quanto no meio comercial como escaneamento 3D ou digitalização 3D.

A digitalização 3D, quando utilizada para soluções de engenharia, é empregada como uma alternativa à modelagem 3D computacional através de ferramentas CAD, visando uma redução no tempo de modelagem geométrica, atuando como uma parte de grande importância nos processos de engenharia reversa. No entanto ela não é uma técnica de aplicação exclusiva em engenharia. Sua utilização pode ser encontrada com grande frequência nas áreas de saúde (BAUER et al., 2011), reconhecimento facial (SEGUNDO et al., 2011) e preservação digital (VRUBEL, 2009).

A digitalização 3D pode ser explicada, de forma sucinta, como um método de *input* de dados em sistemas de engenharia através do processo de amostragem de pontos da superfície de um modelo físico tridimensional (FREITAS, 2006), tendo como propósito a reconstrução de sua forma em um modelo digital.

Apesar de existirem diversas tecnologias de digitalização 3D, todas são pautadas segundo o mesmo princípio de funcionamento, o qual pode ser descrito como a geração de uma nuvem de pontos caracterizados por um conjunto de coordenadas, que posteriormente são transformados em uma extensão de arquivo que possa ser utilizado em sistemas de engenharia como CAD ou CAM (*Computer Aided Manufacturing*) FREITAS, (2006).

As tecnologias de digitalização podem ser divididas basicamente em 2 tipos, as de aquisição de dados com contato e sem contato com o modelo físico. Dentre as tecnologias de digitalização com contato direto, pode-se citar aquelas fundamentadas na utilização de Braço Mecânico, Triangulação Ultrassônica, Triangulação Eletromagnética e Apalpamento em Máquina de Medição por Coordenadas. Já, entre as tecnologias de digitalização sem contato com o modelo, pode-se citar a Triangulação Laser de Varredura por Ponto, Triangulação Laser de Varredura por Linha, Triangulação por Cores com Câmeras CCD (*Coupled Charged Devices*), Digitalização por Luz Estruturada (luz branca), Conoscópio, Fotogrametria por Fotografias Digitalizadas, Tomografia Computadorizada, Ressonância Magnética, Radar Laser, Tunelamento e Luz Infravermelha.

A precisão com a qual a nuvem de pontos é gerada, bem como a rapidez da leitura da superfície, são completamente dependentes do tipo de tecnologia empregada no digitalizador utilizado.

Como o objeto principal de pesquisa deste trabalho são as superfícies geradas por digitalização 3D e não os métodos de digitalização propriamente ditos, não serão apresentados detalhes de cada tipo de tecnologia. No entanto, apresenta-se como sugestão de leitura o trabalho realizado por Freitas (2006), que apresenta uma abordagem detalhada sobre cada tecnologia, descrevendo suas principais características e aplicações.

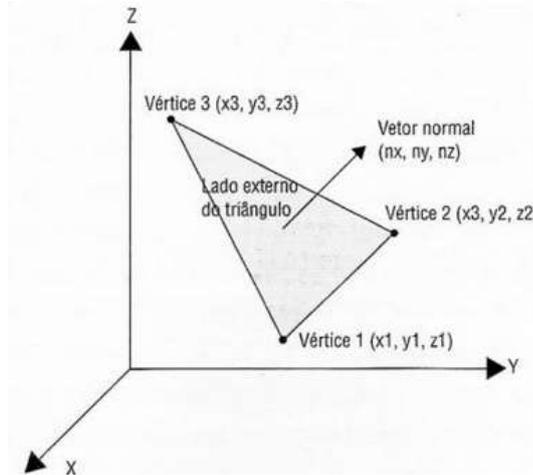
### 2.3 Arquivo de formato STL

O primeiro passo para a geração de uma superfície 3D para a modelagem de uma órtese é o processo de digitalização, que gera uma nuvem de pontos representando a forma escaneada. Para poder ser manipulada em uma ferramenta CAD, esta nuvem de pontos passa por um processo de tratamento digital, através de um algoritmo de tecelagem, que a transforma em uma malha. Esta malha, por sua vez, é utilizada nas aplicações de Manufatura Aditiva em um arquivo de extensão “.stl”.

Um dos problemas que dificultava o desenvolvimento de tecnologias de modelagem 3D e AM era a incompatibilidade na troca de informações entre diferentes sistemas CAD. Assim, alguns organismos de padronização desenvolveram seus próprios arquivos padrão, como o IGES (*Initial Graphic Exchange Specification*) nos EUA, o VDA-FS (*Verband der Automobilindustrie – Flächen Schnittstelle*) na Alemanha e o SET (*Standard d’Echange et de Transfert*) na França (VOLPATO, 2007). No entanto, esses padrões tinham diversas deficiências. Assim, na tentativa de representar um ponto de uma superfície de uma maneira mais simples e segura, a *Albert Consulting Group* desenvolveu, em 1988, a pedido da 3D Systems, um novo formato de arquivo voltado para aplicações de Manufatura Aditiva, o arquivo de formato STL (VOLPATO, 2007).

O nome do formato do arquivo é devido à palavra *STereoLithography*, nome dado ao primeiro sistema de Manufatura Aditiva comercial (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2009). Uma descrição apropriada pode ser dada ao arquivo STL apresentando-o como sendo um formato que representa um modelo 3D ou uma nuvem de pontos através de uma malha composta por triângulos interligados por

seus vértices, com o vetor normal à face de cada triângulo apontando para o lado externo do modelo, como pode ser observado na Figura 4.



**Figura 4 - Triângulo no formato STL.**  
**Fonte: Volpato (2007, P.106)**

## 2.4 Ferramentas para Manipulação de Superfícies 3D

Atualmente, muitos produtos de consumo são gerados com a sua principal preocupação voltada à estética, ao estilo e à ergonomia. Para isso, cada vez mais são utilizadas técnicas de modelagem por superfícies, o que faz com que as ferramentas computacionais para manipulação de superfícies estejam sempre buscando ampliar a sua gama de ferramental para estas aplicações.

Existem inúmeras ferramentas CAD 3D para manipulação de superfícies no mercado, cada qual voltada para um tipo de aplicação e nicho, como por exemplo a criação e manipulação de superfícies baseadas em malhas triangulares, malhas poligonais e superfícies orientadas por *splines*, destinadas para aplicações comerciais, didáticas e/ou de uso pessoal. A maioria dessas ferramentas apresenta uma interdisciplinaridade, suportando inúmeros formatos de arquivos e oferecendo ferramentas para manipulação de vários tipos de superfícies. Algumas outras são empregadas com maior enfoque em uma determinada aplicação, como aquelas ferramentas voltadas à criação e correção de superfícies destinadas à impressão 3D.

O Laboratório NUFER, na UTFPR, disponibiliza os seguintes programas: Meshmixer, 3Ds Max, Blender, Catia, Solidworks e PTC CREO. Dentre estas ferramentas, as que mais se adequam ao objetivo deste trabalho, observando a necessidade do enfoque em ferramentas de baixo custo de e fácil utilização, são o Meshmixer, o 3Ds Max e o Blender. No entanto, o funcionamento do 3Ds Max e do Blender é muito similar. Ambos programas são baseados na utilização de “modificadores de superfície”. Assim, escolheu-se trabalhar apenas como Meshmixer e o 3Ds Max, evitando trabalhar com dois programas com as mesmas características. A seguir, apresenta-se uma breve descrição destas ferramentas.

#### 2.4.1 Meshmixer

Lançado em 2009, Meshmixer é uma ferramenta de licença aberta (gratuita) disponibilizada pela Autodesk, para criação e manipulação de modelos 3D baseados em malhas triangulares (MESHMIXER, 2016).

É uma ferramenta direcionada para escultura de formas 3D com aplicações voltadas para design, saúde e criatividade, como pode ser exemplificado pela Figura 5. Oferece suporte para importação e exportação de um bom número de formatos de arquivos diferentes, tais como: “.obj”, “.stl”, “.dae”, “.ply”, “.amf” e “.wrl”. No entanto, quaisquer arquivos gerados fora da opção “exportar”, assumem o formato próprio do programa: “.mix”.



Figura 5 - Exemplo de aplicações do programa Meshmixer.  
Fonte: MESHMIXER, AUTODESK

Suas principais aplicações são voltadas para escultura de objetos 3D, limpeza e correção de superfícies geradas por digitalização 3D. O programa é intitulado pela própria AUTODESK como “*Swiss Army Knife*” (Canivete do Exército Suíço) para malhas 3D. Isso se deve às inúmeras ferramentas e funcionalidades disponibilizadas, como:

- Esculpimento 3D e Estampagem de Superfícies;
- Preenchimento de Furos, “*Bridging*” e Auto-Reparo;
- Extrusão e Offset de Superfícies;
- Alinhamento Automático de Superfícies;
- Cortes com Superfícies e Espelhamento;
- “*Remeshing*”, “*Smoothing*” e Simplificação/Redução de Malhas;
- Ferramentas avançadas de seleção como pincéis e laço.

O Meshmixer tem como uma de suas principais características a simplicidade, tanto da interface quanto dos comandos, sendo um programa que não requer um alto grau de conhecimento técnico ou treinamento prévio para sua utilização em aplicações de baixo e médio grau de complexidade. A interface do programa assume uma formatação clara e busca ser autoexplicativa, associando figuras a frases para explanação de suas ferramentas. A Figura 6 mostra a tela inicial do programa.



**Figura 6 - Exemplificação da tela inicial do programa Meshmixer.**

**Fonte: Autoria Própria, 2016**

Em contrapartida, O Meshmixer não é uma ferramenta indicada para modelagem de peças mecânicas e modelos de arquitetura, pois não oferece ferramentas de medição com valores exatos durante a modelagem.

A Figura 7 exemplifica algumas modelagens realizadas a partir do Meshmixer.



**Figura 7 - Exemplos (a) e (b) de modelagens com o Meshmixer.**  
**Fonte: MESHMIXER, 2016**

#### 2.4.2 3Ds Max

O 3Ds Max é uma ferramenta para modelagem tridimensional usada para criar, modelar, renderizar e animar objetos 3D (3DS MAX, 2016).

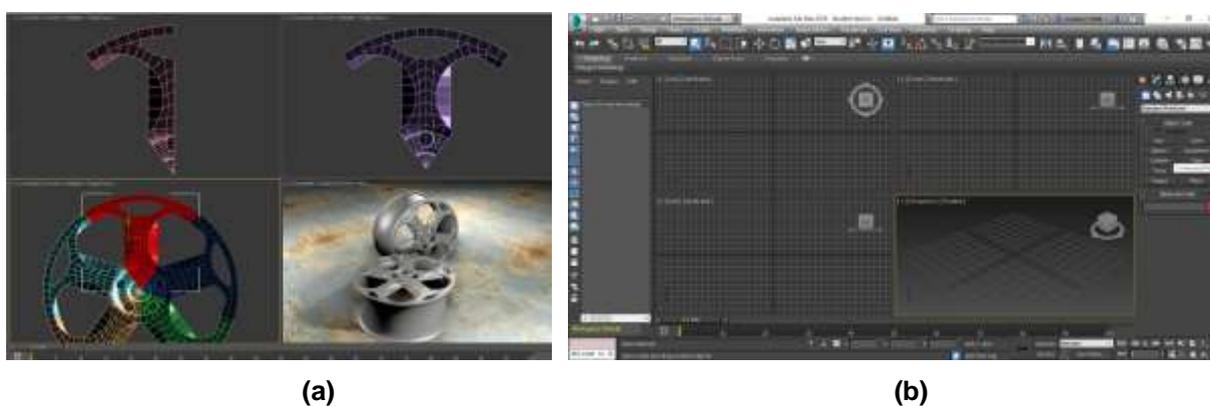
Oferece suporte para importação e exportação de um grande número de formatos de arquivos diferentes, tais como: “.obj”, “.stl”, “.dae”, “.jt”, “.stp”, “.wrl”, “.jt” “.igs” e “.model”. No entanto, quaisquer arquivos gerados fora da opção “exportar”, assumem o formato próprio do programa: “.max”. Também oferece suporte para modelagem a partir de nuvem de pontos, modelagem por malhas e superfícies, splines e modelagem com base em NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines).

Inúmeras funcionalidades são disponibilizadas, tais como:

- Animações 3D;
- Modelagem de malhas e superfícies;
- Suporte a nuvem de pontos;
- Ferramentas de posicionamento;
- Atribuição e edição de texturas;

- Projeto de materiais e sombreamento;
- Modelagem de polígonos, splines e com base em NURBS;

Assim como o Meshmixer, o 3Ds Max é uma ferramenta disponibilizada pela Autodesk, porém, em três versões: a versão gratuita de avaliação por 30 dias, a versão gratuita para estudantes (*student version*) e a versão de licença paga. Na sua versão paga, uma licença anual custa a partir de R\$3.647,53 (3DS MAX, AUTODESK). A Figura 8 exemplifica modelagens feitas no 3Ds Max e mostra a tela inicial do programa.



**Figura 8 - Exemplos (a) e (b) de modelagens com o 3Ds Max.**  
Fonte: 3Ds Max, 2016

## 2.5 Superfícies 3D

Uma vez gerado o arquivo STL, a nuvem de pontos proveniente da digitalização passa a ser uma superfície 3D. Para Alves (2002), uma superfície pode ser definida como um elemento matemático que separa o interior do exterior de um objeto.

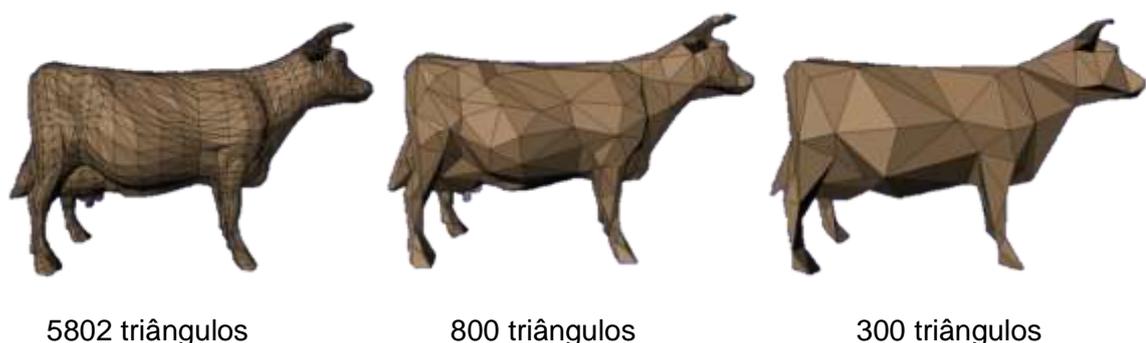
De forma resumida, um objeto 3D concebido por superfícies, pode ser caracterizado como uma “casca” que contém as informações sobre as arestas desse objeto. Estas arestas podem ser formadas a partir de retas, arcos, circunferências e outras linhas que, quando ligadas umas às outras, formam entidades tridimensionais planas ou curvas.

Um dos tipos mais comuns de superfícies, são aquelas formadas por malhas poligonais. As malhas poligonais são um conjunto de polígonos, ou faces, que juntos definem a fronteira da superfície de um objeto 3D (OLIVEIRA; GAROTTI; SÁ, 2008). Elas são compostas por três elementos:

- Vértice: compartilhado por, pelo menos, 2 arestas;
- Aresta: compartilhada por, pelo menos, 2 polígonos, se a superfície for fechada;
- Polígono: uma sequência fechada de, pelo menos, 3 vértices.

Dentre os vários tipos de malhas poligonais, as malhas de triângulos são as mais comuns, pois apresentam faces planas, grande flexibilidade nos processos de design, maior simplicidade nos algoritmos, no processamento e transmissão de dados e uma maior eficiência nos processos de renderização (JU, 2009).

A representação da forma de uma superfície curva é um processo de aproximação. Uma melhor representação pode requerer um maior número de faces (triângulos), o que pode trazer alguns problemas, principalmente ligados ao tamanho do arquivo e tempo de processamento computacional. A Figura 9 exemplifica esta aproximação da forma. Quanto maior o número de triângulos, melhor é a aproximação da superfície à forma real do objeto.



**Figura 9 - Influência da quantidade de faces na representação da forma.**

**Fonte: CMU, 2015**

## 2.6 Defeitos de malhas poligonais

Quando se trabalha com superfícies do tipo malhas poligonais geradas através de uma nuvem de pontos proveniente de uma digitalização 3D, é comum aparecerem diversos tipos de defeitos, que precisam ser estudados e corrigidos. Considerando apenas as superfícies formadas por malhas poligonais, a Figura 10 exemplifica os vários defeitos que podem ser encontrados nessas superfícies.

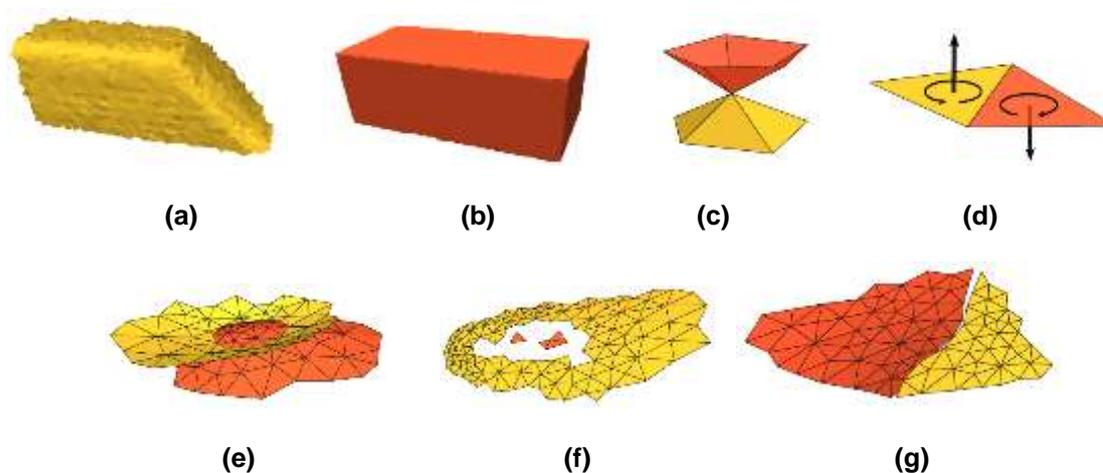


Figura 10 - Exemplos de defeitos que podem ser encontrados em superfícies. (a) Ruído, (b) Chanfro, (c) Vértice Compartilhado, (d) Orientação Inconsistente, (e) Auto-interseção, (f) Lacunas e (g) Espaçamentos.

Fonte: (ATTENE; CAMPEN; KOBELT, 2013).

No exemplo da Figura 10(a), não cabe a palavra defeito. É mais apropriado denominá-la de inconveniência. Ela se apresenta na forma de um número excessivo de triângulos que formam a malha poligonal. Por vezes, o número de triângulos pode ser reduzido sem causar nenhum problema à fidelidade da representação do objeto real. A inconveniência de um maior número de faces está no tamanho do arquivo e no seu tempo de processamento. Assim, nestes casos, é mais conveniente fazer uso de ferramentas de redução da complexidade da malha trabalhada.

A primeira imperfeição, que pode ser observada quando se trabalha com superfícies provenientes de digitalização 3D, pode ser chamada de Ruído de Topologia. Esse ruído é muitas vezes caracterizado como picos e vales que deixam a superfície irregular e que criam a necessidade de uma etapa de suavização ou

“*smoothing*” durante o processo de tratamento. É uma imperfeição que pode ser atribuída ou à superfície a ser escaneada, quando ela apresenta uma rugosidade mais grosseira, ou à própria técnica de digitalização 3D utilizada, que não conseguiu adquirir com perfeição a superfície escaneada.

O problema de “*chanfro*” é bastante comum e ocorre, basicamente, devido aos procedimentos metodológicos empregada pelos algoritmos de tecelagem. Na geração das malhas, estes algoritmos tentam restringir que cada polígono ou vértice esteja definido sobre uma linha ou curvatura específicas, cuja posição é completamente definida. Quando o modelo digitalizado apresenta arestas mais agudas, o algoritmo não consegue criar um padrão de posição para estas linhas ou curvaturas base sobre estas arestas. Isto faz com que estas arestas sejam removidas e substituídas por chanfros irregulares (ATTENE; CAMPEN; KOBELT, 2013).

A situação de “vértice compartilhado” é observada quando ocorre a união de duas superfícies em um único vértice. Este tipo de situação problemática à maioria dos algoritmos de correção de malhas, já que dificulta a correta definição e localização das “vizinhanças” de um elemento da malha (BOTSCH; KOBELT, 2006).

Como já dito anteriormente, um polígono que compõe uma malha é representado por uma sequência de vetores. Durante o processo de tecelagem da malha, estes vetores não são atribuídos de forma aleatória, mas de modo a indicar a orientação do polígono. Esta orientação é utilizada em sistemas de renderização para indicar a visibilidade de uma face. Assim, para garantir a correta visibilidade de uma superfície, é necessário que se atribua uma orientação constante a todos os polígonos constituintes da malha (ATTEN; CAMPEN; KOBELT, 2013).

Um dos defeitos mais comuns encontrados em uma superfície gerada por digitalização 3D, são as lacunas (furos ou “*holes*”) presentes na malha. Esse tipo de defeito acontece quando ocorre algum problema na geração da nuvem de pontos durante a digitalização, ou quando, por algum motivo, o programa não consegue ligar alguns pontos para formar os polígonos. É um tipo de defeito, que dependendo da complexidade do objeto escaneado, pode ser bastante comum.

Outro problema muito comum são os espaçamentos (*gaps*). Eles são espaços vazios entre superfícies, que, geralmente, são formados devido a

inconsistências nas rotinas de tecelagem dos polígonos (ATTEN; CAMPEN; KOBBELT, 2013).

Por último, outro defeito bastante comum, dependendo da complexidade do objeto real, são as auto-interseções. Em muitas aplicações de superfícies representadas por malhas poligonais, assume-se que essas malhas representam as fronteiras de um volume sólido. Assim, um requisito importante é que a malha seja livre de auto interseções (ATTEN; CAMPEN; KOBBELT, 2013).

## **2.7 Correção de malhas poligonais**

Foram realizadas extensas pesquisas sobre procedimentos ou técnicas para correção e tratamento de malhas poligonais, no entanto os resultados dessas pesquisas apontam para uma deficiência de material bibliográfico voltado para correções através de ferramentas computacionais de baixos custo e complexidade. Atualmente, os procedimentos de tratamento e correção de malhas provenientes de digitalização 3D são efetuados através de algoritmos computacionais, de modo que a interferência manual do usuário é muito pequena.

Mäkelä e Dolence (1993), apresentam uma pesquisa que descreve métodos de correção baseados em algoritmos que visam detectar e corrigir de modo eficiente defeitos em malhas triangulares de formato STL. Segundo esta pesquisa, o manuseio eficiente de grandes conjuntos de dados geométricos, tais como malhas triangulares, requerem estruturas computacionais especiais de alto custo baseadas em algoritmos robustos de varredura e detecção de erros.

Para Postolski (2013), uma análise manual de estruturas obtidas por processos de digitalização 3D, tais como tomografia computadorizada, pode ser tediosa, extremamente demorada e até mesmo impossível devido à possível complexidade destes modelos.

Pernot, Moraru e Véron (2012) propõem um conjunto de modelos, métodos e ferramentas para correção de furos em malhas poligonais visando minimizar a variação de curvatura no entorno do furo através de algoritmos baseados em sistemas de equações lineares.

Remondino (2003) apresenta um trabalho que visa apresentar a maior totalidade possível dos atuais métodos e técnicas para modelagem e visualização de cenas 3D obtidas através de tecelagem de nuvens de pontos. Sua pesquisa detalha e descreve terminologias, aplicações e métodos de correção, todos baseados na utilização de algoritmos computacionais.

Botsch et. al. (2006) apresenta uma pesquisa sobre modelagem geométrica baseada em malhas triangulares. Sua pesquisa apresenta de forma bastante completa conceitos sobre representações de superfícies, processamento geométrico, malhas triangulares, os diferentes tipos de defeitos que podem ocorrer e as diversas técnicas que podem ser empregadas para corrigi-los, sendo estas técnicas todas baseadas na utilização de algoritmos computacionais.

Através dos resultados das pesquisas realizadas, fica claro que as técnicas e procedimentos de correção de malhas triangulares são focadas em aplicações de engenharia, design e saúde, que tem como base principal a utilização de ferramentas computacionais baseadas nos mais diversos tipos de algoritmos matemáticos. Também fica clara a falta de material que fundamente a correção de malhas poligonais visando aplicações de baixo custo tais como a confecção por Manufatura Aditiva. Por fim, fica evidenciada a oportunidade para o desenvolvimento de material bibliográfico voltado à correção, tratamento e modelagem de malhas triangulares provenientes de processos de digitalização 3D que visa a fabricação de produtos através da aplicação de Manufatura Aditiva.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico tem por objetivo apresentar os materiais e ferramentas utilizadas para o desenvolvimento dos procedimentos a serem propostos para a correção e modelagem de superfícies digitalizadas.

Como já dito anteriormente, extensas pesquisas apontam uma deficiência em bibliografias direcionadas à correção manual de malhas poligonais, de modo que os procedimentos de trabalho apresentados a seguir foram propostos pelo autor deste trabalho com base nas características principais das malhas que serviram como objeto de estudo.

Este trabalho foi baseado em estudos de casos que consistem, de forma geral, na aquisição das superfícies, na validação inicial das malhas geradas, nas correções das malhas e na validação final dos resultados obtidos através dos procedimentos propostos para correção.

O fluxograma geral da metodologia de trabalho é apresentado na figura 11.

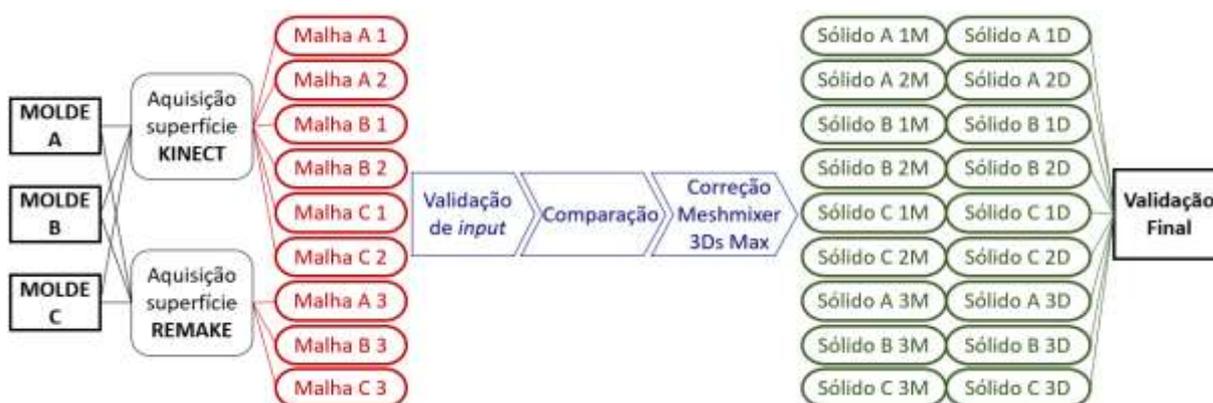


Figura 11 - Fluxograma geral da metodologia de trabalho.

Fonte: Autoria Própria<sup>1</sup>, 2016

<sup>1</sup> Ilustrações sem indicação de fonte são de Autoria Própria.

### 3.1 Aquisição das superfícies

Para o desenvolvimento dos procedimentos de correção de malhas, foram utilizadas malhas STL geradas por digitalização 3D a partir de 3 moldes diferentes de membros superiores confeccionados a partir de ataduras gessadas. Dois destes moldes foram confeccionados com auxílio de um terapeuta ocupacional e dois voluntários do sexo masculino. O terceiro molde foi obtido tendo como base o membro superior direito de uma criança, que será denominada de P1, com Paralisia Cerebral, estudante da Escola Vivian Marçal (modalidade de educação especial). Os três moldes são uma representação da parte inferior dos membros superiores (palma da mão e parte inferior do antebraço) e foram nomeados como moldes A, B e C.

Para a aquisição da superfície interna dos moldes, foram utilizadas 2 técnicas diferentes de digitalização 3D. Para o correto funcionamento das 2 técnicas, os moldes foram marcados com pontos coloridos aleatórios, como pode ser observado na Figura 12.

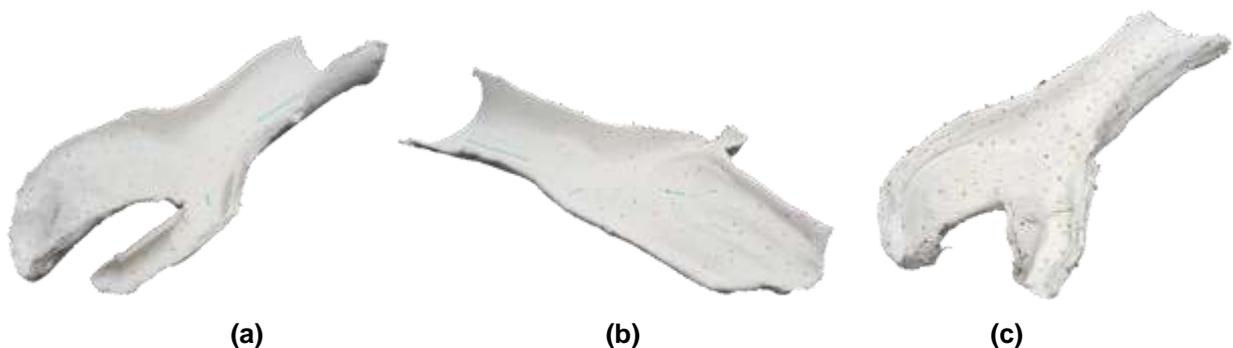


Figura 12 - Moldes de gesso usados na digitalização 3D. (a) Molde A, (b) Molde B e (c) Molde C.

A primeira técnica de digitalização empregada fez uso de um sensor denominado Kinect e utilizado nos vídeo games Xbox (360 e ONE) que permitem a aquisição da forma, tendo seu funcionamento baseado em um sensor de movimento atrelado à uma câmera que registra a movimentação através de imagens feitas a 30 quadros por segundo (Xbox ONE). Para a digitalização, os três moldes foram posicionados, um de cada vez, sobre uma superfície plana coberta com uma base

de feltro preto. Durante a digitalização dos três moldes essa base ficou posicionada no centro de uma pequena sala isolada com iluminação artificial constante para garantir as mesmas condições de ambiente durante todo o processo de digitalização. Usando como interface o programa 3D Builder disponibilizado gratuitamente pela Microsoft, cada um dos três moldes foi digitalizado 2 vezes e o resultado foi exportado na forma de um arquivo STL, gerando, no total, 6 malhas diferentes, duas de cada molde. A Figura 13 mostra imagens do Kinect e do posicionamento dos moldes sobre a base de feltro.



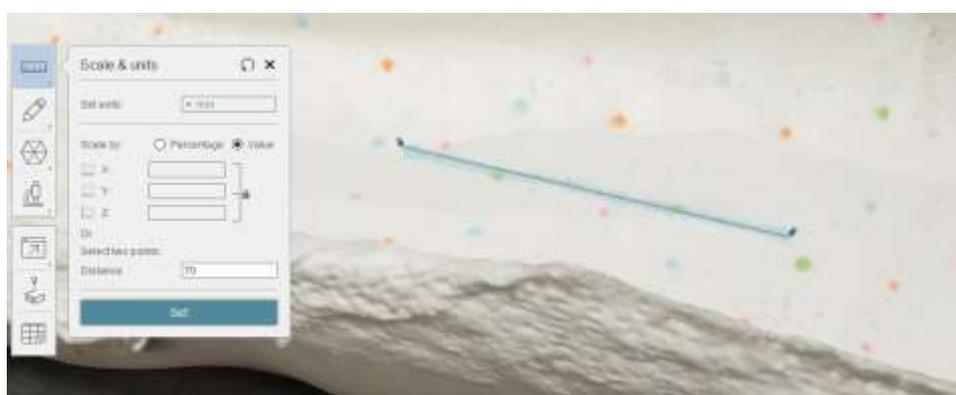
**Figura 13 - (a) Kinect ONE. (b) Exemplo de posicionamento dos moldes.**

A segunda técnica de digitalização foi baseada na utilização do programa ReMake, também disponibilizado gratuitamente pela Autodesk. O programa tem seu funcionamento baseado na utilização de fotos do objeto real a ser digitalizado tiradas em diferentes ângulos. Essas fotos passam por um algoritmo de análise que, baseado na posição relativa dos objetos fotografados, remonta a cena através de uma malha 3D. Para a digitalização, os três moldes foram novamente posicionados sobre a base de feltro preto no centro da mesma sala sob as mesmas condições de luz utilizadas na digitalização pela primeira técnica. Como diferencial, desta vez foram posicionados elementos aleatórios no em torno dos moldes para servir como base de posicionamento ao algoritmo de análise do ReMake. A Figura 14 mostra um exemplo de posicionamento de um dos moldes sobre o feltro preto com objetos aleatórios ao seu redor.



**Figura 14 - Exemplo de posicionamento do molde com objetos aleatórios ao seu redor**

Uma vez posicionado, o molde foi fotografado com uma câmera semiprofissional Nikon D3200 em diferentes ângulos, com incrementos angulares entre  $15^\circ$  e  $30^\circ$ , até completar uma volta em torno do molde. Durante a aquisição das imagens, os objetos aleatórios introduzidos na cena permaneceram obrigatoriamente estáticos, assegurando que não houvesse mudança de sua posição relativa entre uma foto e outra, fato este que se faz imprescindível para o correto funcionamento do programa. Após a reconstrução das cenas, foi necessário dar ao programa um valor de escala, para o correto ajuste das malhas. Para isso, foi desenhado em cada molde, juntamente com os pontos coloridos, uma reta com o comprimento de 70 mm, que após a digitalização, serviu como base para indicar ao programa o correto escalonamento das malhas, como pode ser observado na Figura 15. Cada um dos três moldes passou pelo mesmo processo, gerando no final 3 malhas diferentes, cada uma referente a cada molde. Essas malhas foram exportadas na forma de um arquivo STL.



**Figura 15 - Escalonamento das malhas no programa Remake com o auxílio da reta de referência de 70 mm.**

Ambas as técnicas de digitalização utilizadas oferecem a opção de ajuste quanto ao refino da malha a ser gerada, de modo que o usuário pode escolher entre a geração de uma malha mais grosseira, com menos triângulos e mais leve e a geração de uma malha mais fina, com mais triângulos e conseqüentemente de maior tamanho de arquivo. Como este trabalho objetiva a correção de malhas visando a fabricação por Manufatura Aditiva com a maior fidelidade possível à anatomia real do paciente, vale ressaltar que as malhas geradas devem obedecer a este quesito de fidelidade, mesmo que isto signifique gerar arquivos STL inicialmente grandes, podendo chegar a 200MB. Assim, é uma boa prática configurar os programas de digitalização para gerar malhas mais refinadas.

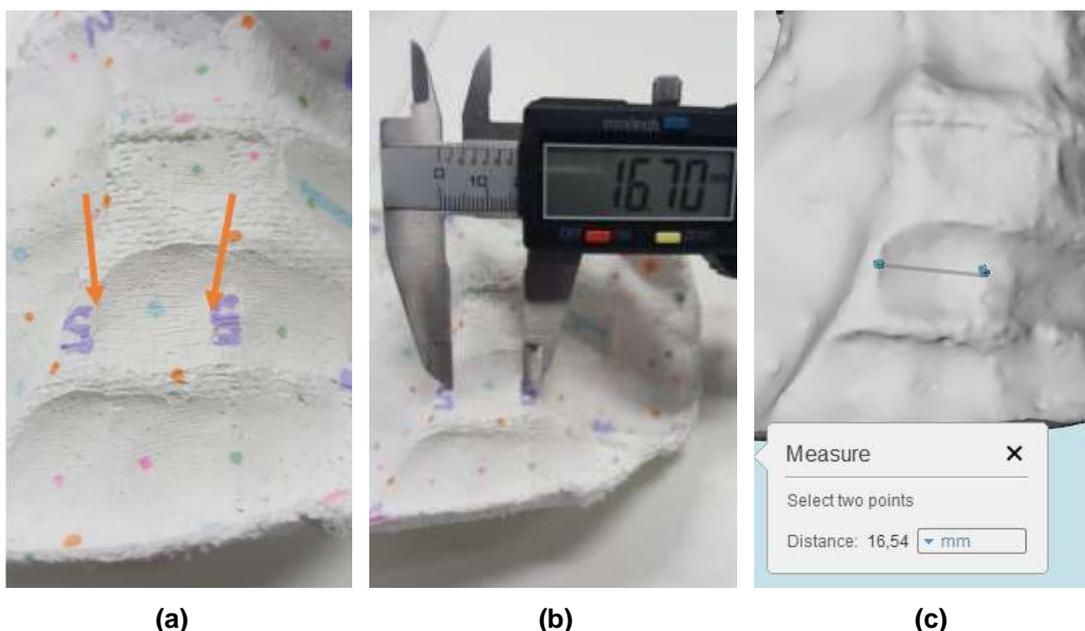
No total, juntando as malhas produzidas pelos dois processos de digitalização, foram geradas 9 malhas STL, sendo 6 pela digitalização com Kinect e 3 pela digitalização baseada em fotos.

### **3.2 Validação das malhas**

A fim de garantir que ambas as técnicas de digitalização reproduziram com fidelidade as dimensões dos moldes, foi feita uma comparação entre os moldes e as malhas geradas.

Em cada molde foram escolhidos e marcados 5 pares de pontos que pudessem ser identificados tanto nos moldes quanto nas malhas. A distância entre cada par de pontos foi medida nos moldes com o auxílio de um paquímetro digital. Os mesmos pontos foram medidos nas malhas com o auxílio da ferramenta “*Measure distance*” disponibilizada pelo ReMake, que possibilita a importação de arquivos STL externos ao programa em seu editor de malhas. Os valores obtidos foram comparados, validando o correto dimensionamento das malhas STL.

A Figura 16 exemplifica o processo de medição e comparação das distâncias entre os pontos.



**Figura 16 - Exemplo de medição de um par de pontos. (a) Indicação dos pontos 5-5 no molde, (b) medição dos pontos 5-5 com paquímetro e (c) medição dos pontos 5-5 no programa ReMake.**

### 3.3 Comparação entre as malhas geradas

Uma vez validadas quanto às suas dimensões, foi feito um comparativo entre as malhas para levantar suas principais semelhanças e diferenças, comparando o resultado da digitalização entre os dois métodos de digitalização empregadas. O resultado dessa comparação servirá como base para a proposição dos procedimentos de correção das malhas.

As comparações foram feitas utilizando o programa Meshmixer apenas como um visualizador de arquivo STL. Foi escolhido o Meshmixer por ser um programa voltado para manipulação de malhas STL, de modo que sua área de trabalho é tal que facilita a manipulação e visualização das malhas, quando comparado com o 3Ds Max.

Afim de comparar o resultado da digitalização dos dois métodos utilizados na aquisição da geometria, comparou-se as malhas geradas pelo Kinect com as malhas geradas através do ReMake. Foram comparadas as seguintes características:

- Resolução da malha (grosseira, fina - menor ou maior número de triângulos);
- Fidelidade ao molde quanto à forma e aos detalhes;

- Quantidade e tipos de defeitos (lacunas, ruídos, interseções, erros de leitura do molde).

Com base em uma comparação visual, pôde-se avaliar as semelhanças e diferenças que poderiam ou deveriam existir entre os procedimentos a serem propostos para a correção dessas malhas através dos dois programas escolhidos, o Meshmixer e o 3Ds Max.

### 3.4 Procedimentos de correção e modelagem das malhas

A etapa da correção dos defeitos presentes nas malhas é a mais importante de todo o processo de correção e requer muita atenção. A correção dos defeitos é a ação que vai permitir o espessamento da malha, criando um sólido, de modo que sem esta etapa, a fabricação de órteses por Manufatura Aditiva com base em superfícies digitalizadas fica impossível.

A malha a ser corrigida pode conter diversos tipos de defeitos ou detalhes que requerem correção. O nível de correção aplicada deve ser determinado com bom senso pelo usuário, de modo a garantir o sucesso do espessamento, mas também de modo a minimizar as alterações feitas na superfície, visto que um dos objetivos principais é oferecer grande fidelidade à forma.

De posse das informações geradas na comparação entre as malhas, foi proposto um fluxo de procedimentos inicial de correção, levando em conta apenas as características gerais das malhas e deixando de lado, as funcionalidades de cada programa. Esse primeiro fluxo de procedimentos baseou-se nos passos básicos necessários para converter a malha STL em um sólido livre de defeitos e que pudesse ser utilizado nos processos de Manufatura Aditiva. Tal metodologia é descrita pela Figura 17.

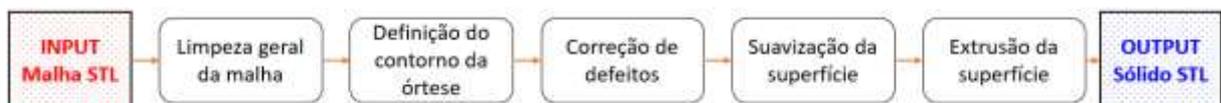


Figura 17 - Fluxograma geral dos procedimentos de correção e modelagem propostos para correção de malhas.

Uma vez definidos os processos gerais necessários à correção das malhas, escolheu-se aleatoriamente 1 malha para ser usada como base para testes de funcionalidade de cada um dos dois programas. Essa malha passou por processos de correção nos dois programas seguindo o fluxograma de processo descrito anteriormente, testando cada ferramenta disponibilizada e analisando as possibilidades e dificuldades de cada programa frente aos defeitos da malha. Esse primeiro teste permitiu um melhor entendimento das ferramentas oferecidas por cada programa, o que possibilitou propor um novo fluxo de correção mais adequado para cada programa.

### 3.4.1 Procedimentos de correção pelo programa Meshmixer

A seguir apresenta-se os procedimentos propostos para correção de malhas STL pelo programa Meshmixer 2015 V11.0.544. Tais procedimentos foram propostos com base na primeira análise feita com uma malha aleatória dentre as 9 malhas geradas por digitalização 3D.

Tendo como base o fluxograma de processo inicial para correção de malhas, desenvolveu-se novo fluxograma visando as ferramentas e possibilidades oferecidas pelo Meshmixer, como mostrado na Figura 18. Cada uma das 9 malhas passou exatamente pelos mesmos passos descritos a seguir.

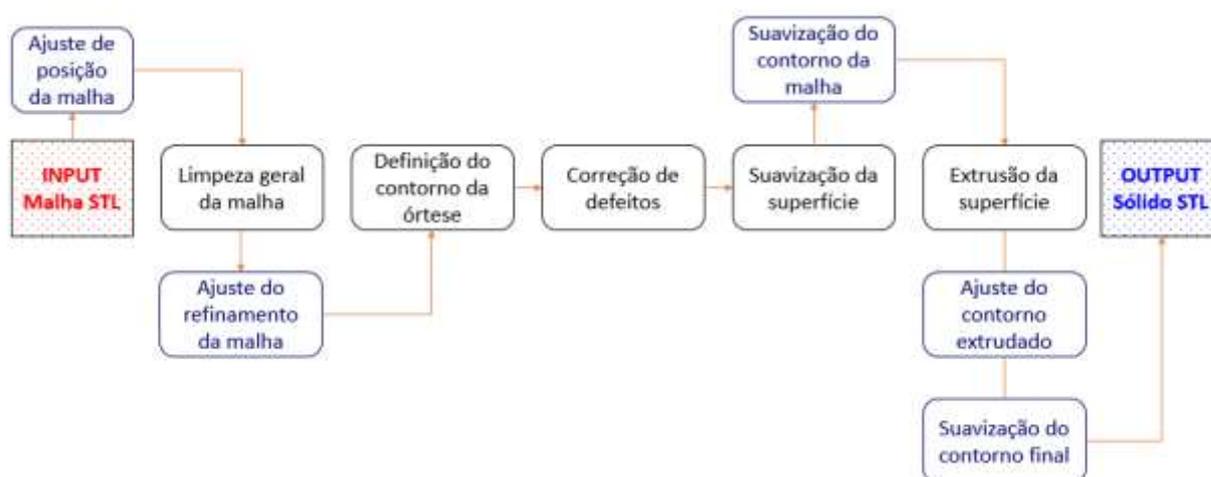


Figura 18 - Fluxograma do processo de correção e modelagem proposto para correção de malhas pelo programa Meshmixer.

Após a importação através da ferramenta “*Import*”, cada uma das nove malhas foi reposicionada de modo a garantir a posição que proporcionasse uma maior facilidade de visualização durante o procedimento de correção. Isso é necessário pois a malha pode cair em qualquer lugar do espaço e em qualquer posição, de modo que isto depende basicamente da compatibilidade ou incompatibilidade do sistema de coordenadas dos programas usados na geração das malhas com os sistemas de coordenadas dos programas usados para a correção. O ajuste da posição da malha dentro da área de trabalho do Meshmixer e do 3Ds Max é feito apenas com o intuito de auxiliar em sua visualização e manipulação durante as próximas etapas. O não ajuste da posição não acarretará em problemas que impossibilitem a correção da malha.

A área de trabalho do Meshmixer apresenta, como *default*, uma espécie de caixa delimitadora denominada “*MakerBot Replicator*”, como mostrado na figura 19. Essa caixa é uma representação da área útil de uma impressora 3D, no entanto, não é necessário que a malha esteja dentro desta área, uma vez que o Meshmixer não será usado como interface direta com uma impressora 3D. A presença do *Maker Bot Replicator* pode ser um inconveniente durante a correção da malha caso ela esteja posicionada dentro dele. Assim, é conveniente desmarcar a opção de visualização do *MakerBot Replicator* em “*View > Show printer bed*”.

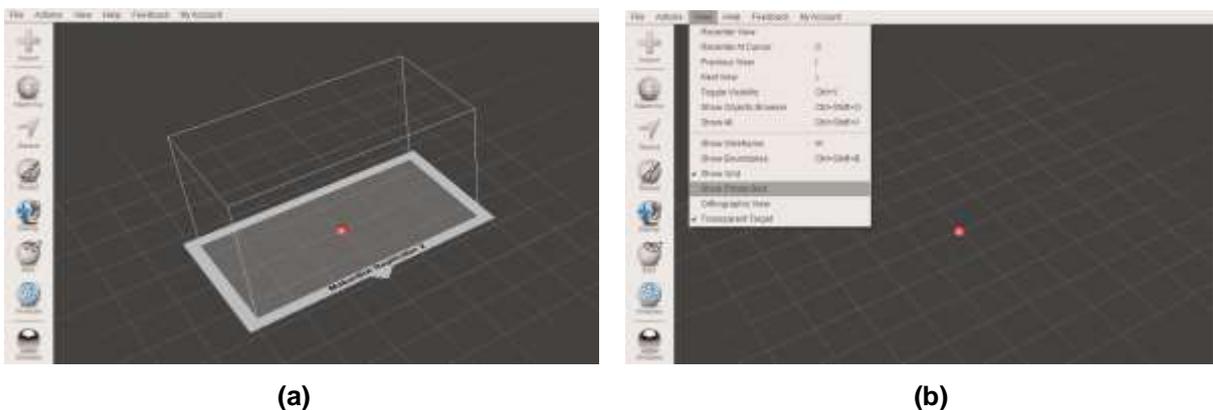


Figura 19 - (a) Tela inicial do programa Meshmixer com a visualização do *MakerBot Replicator*, (b) Tela inicial do programa Meshmixer sem a visualização do *MakerBot Replicator*.

Grande parte das ferramentas ofertadas pelo Meshmixer são do tipo *brush*, de modo que quando selecionadas, aparecem no lugar do cursor do mouse como uma esfera de tamanho variável que pode ser ajustado pelo usuário na janela de configuração da ferramenta, como mostra a Figura 20 (a).

O reposicionamento pode ser feito de maneira bastante simples, usando a ferramenta de seleção “*Select*” para selecionar uma área qualquer da malha (Figura 20 (b)). Em seguida, a seleção deve ser expandida à toda malha através das opções “*Modify > Select All*”. Por último, a opção “*Deform > Transform*” exibe um eixo de coordenadas que permite a translação e rotação da malha, como pode ser visto nas Figuras 20 (c) e 20 (d).

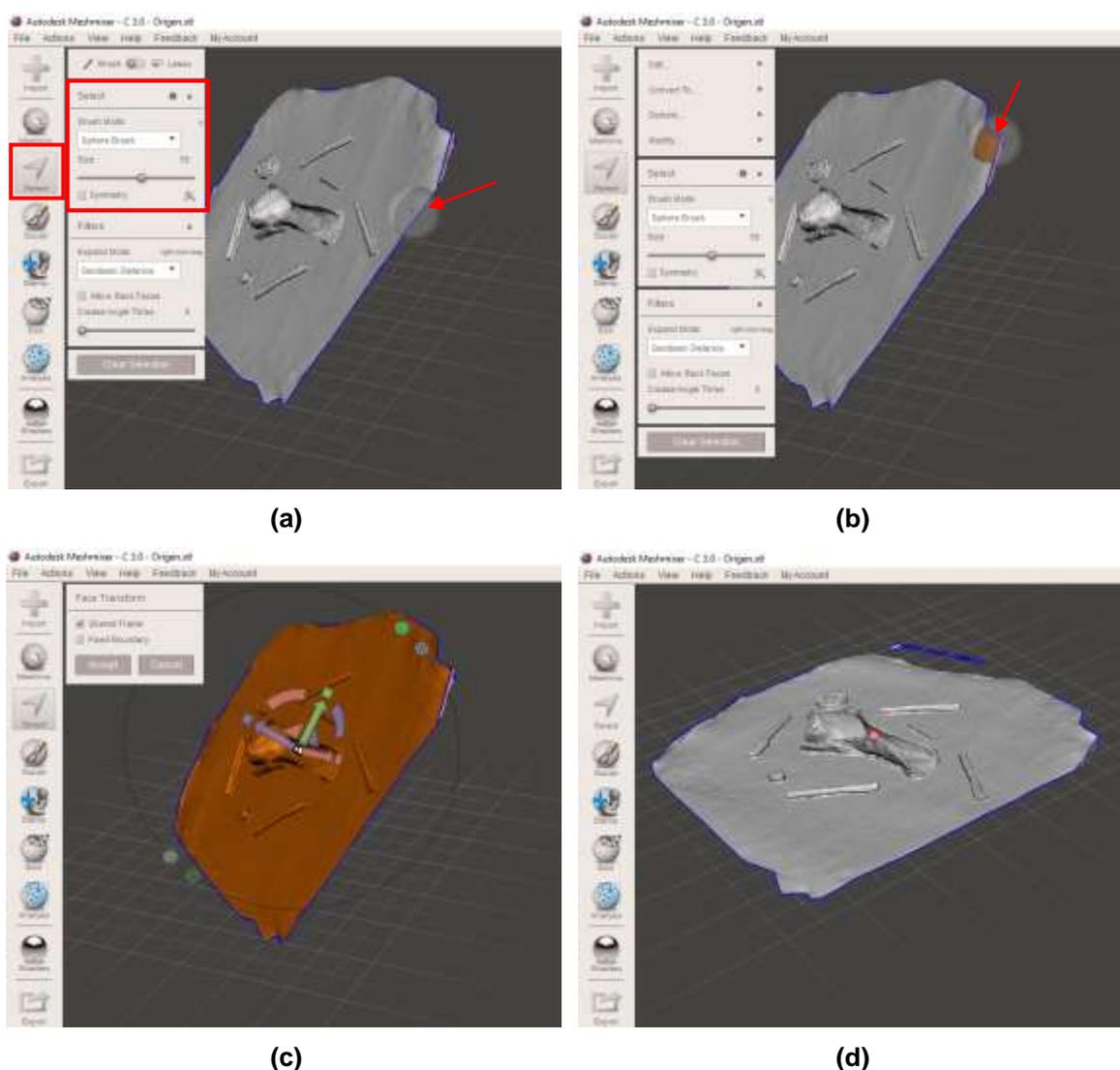
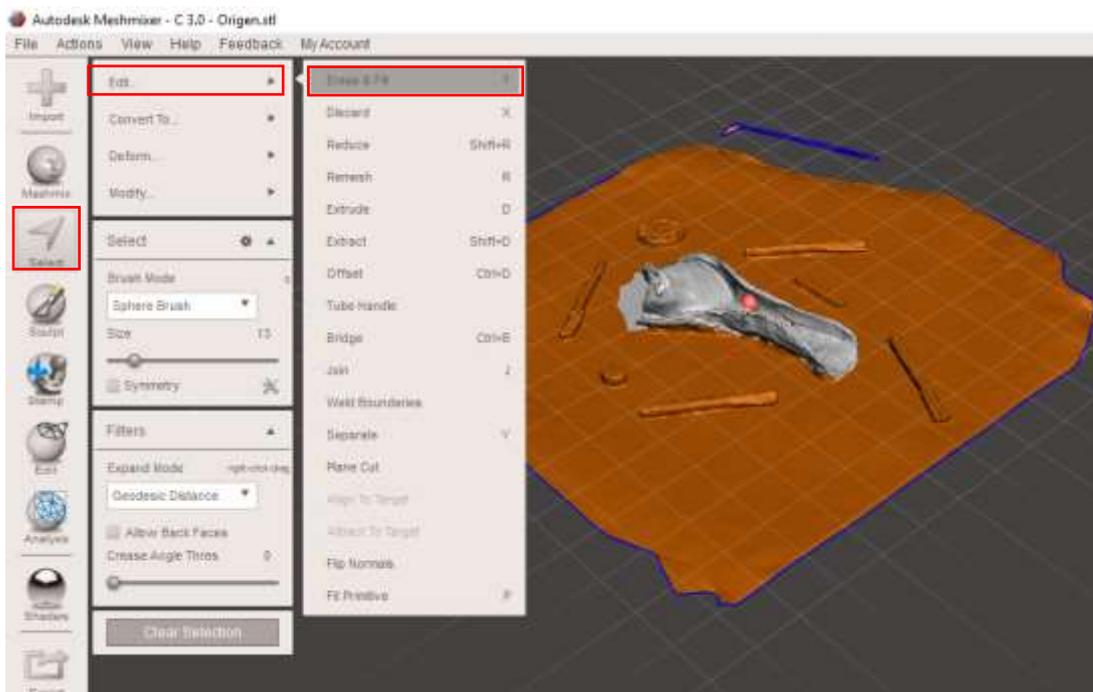


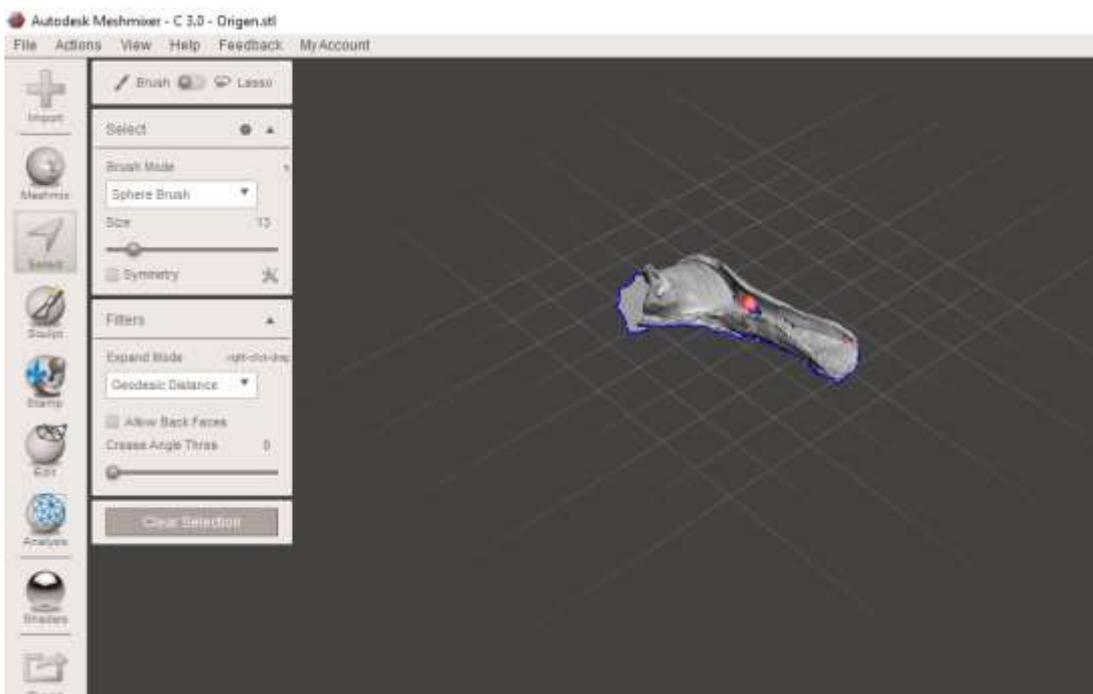
Figura 20 - Exemplo de reposicionamento de uma malha pelo programa Meshmixer. (a) Ferramenta “*Select*”. (b) Seleção inicial. (c) Eixo de translação e rotação. (d) Malha reposicionada.

O segundo passo para correção das malhas, foi efetuar uma limpeza geral, reduzindo a malha somente à parte representativa da órtese. Tanto na digitalização pelo Kinect quanto pelo Remake, as malhas geradas representam não somente o molde escaneado, mas também parte do entorno dos moldes, como a base de feltro e o objetos que haviam sido posicionados para servir de referência (Figura 21 (a)). Este entorno que foi digitalizado juntamente com os moldes não fará parte da malha que será corrigida, portanto deve ser eliminado. Para isso cada malha passou por uma primeira limpeza através da aplicação de seleção e exclusão destas regiões desnecessárias. Mais uma vez, fez-se uso da ferramenta “Select” para selecionar a área a ser descartada. Após selecionada, esta área pode ser excluída através das opções “*Edit > Discard*”, resultando em uma malha representativa somente do molde escaneado, como pode ser observado na Figura 21 (b).

O terceiro passo da correção diz respeito ao refinamento da malha. Esta correção também foi feita através da ferramenta “*Select*” e seus modificadores. Uma vez selecionada toda a malha, usou-se os modificadores “*Edit > Remesh*”, com a opção de densidade entre 20 e 30%, regularidade de 75, 30 iterações e transição em 0 mm, além da opção de “*Smooth Group Boundaries*” selecionada. Foram escolhidos valores de densidade entre 20 e 30% por serem valores que, ao mesmo tempo, permitem um refinamento suficiente ao processo de impressão 3D e não geram um grande aumento no tamanho do arquivo. A figura 22 mostra o resultado da aplicação da ferramenta “*Remesh*”.

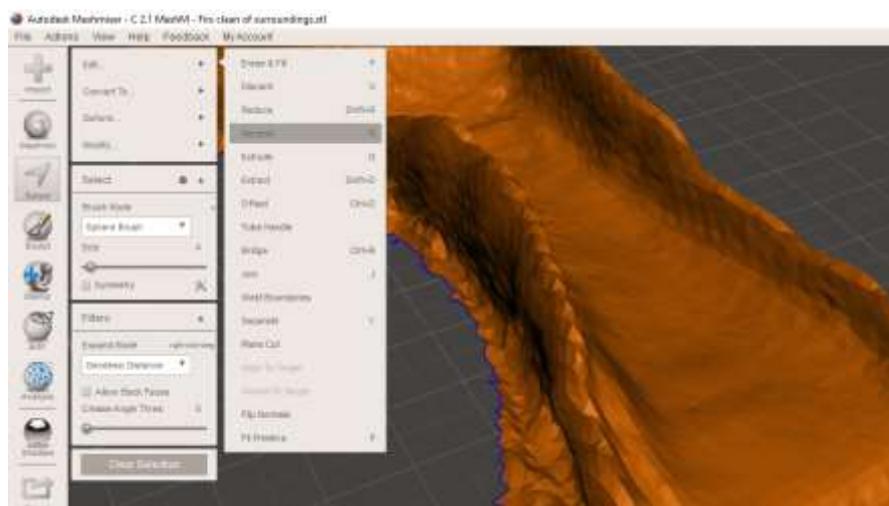


(a)

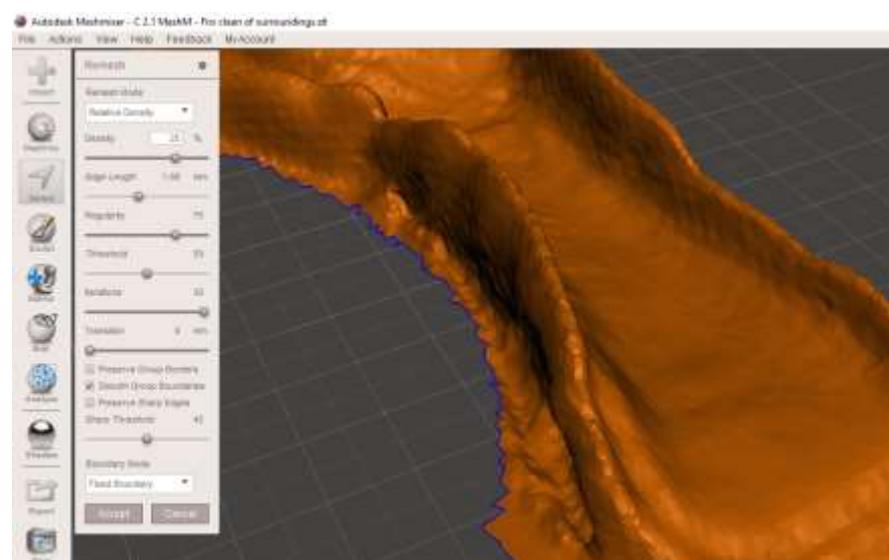


(b)

Figura 21 - Exemplificação da etapa de limpeza geral da malha. (a) Seleção da região desnecessária. (b) resultado final da limpeza.



(a)

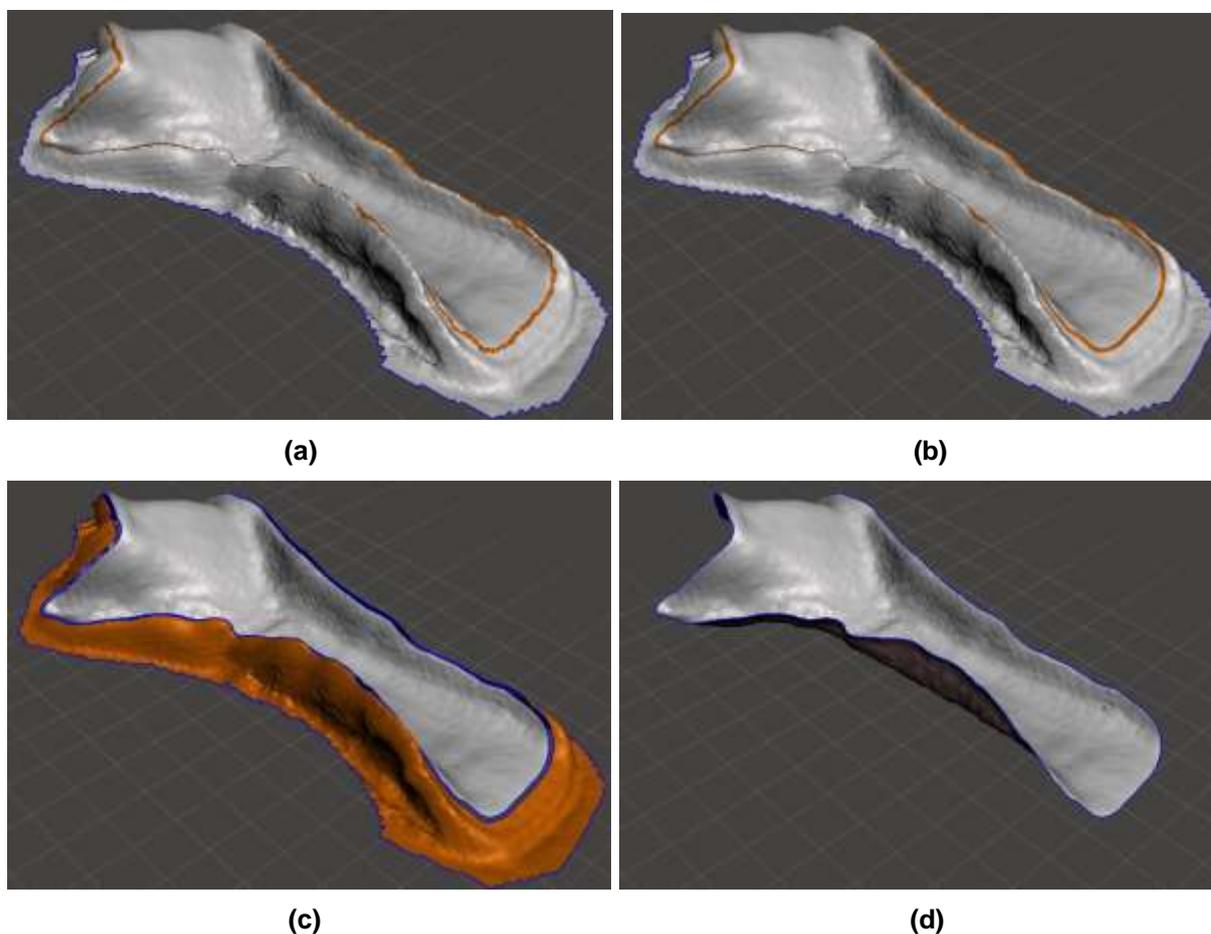


(b)

**Figura 22 - Exemplificação da aplicação da ferramenta "Remesh". (a) Configuração inicial sem "Remesh". (b) Refinamento após "Remesh".**

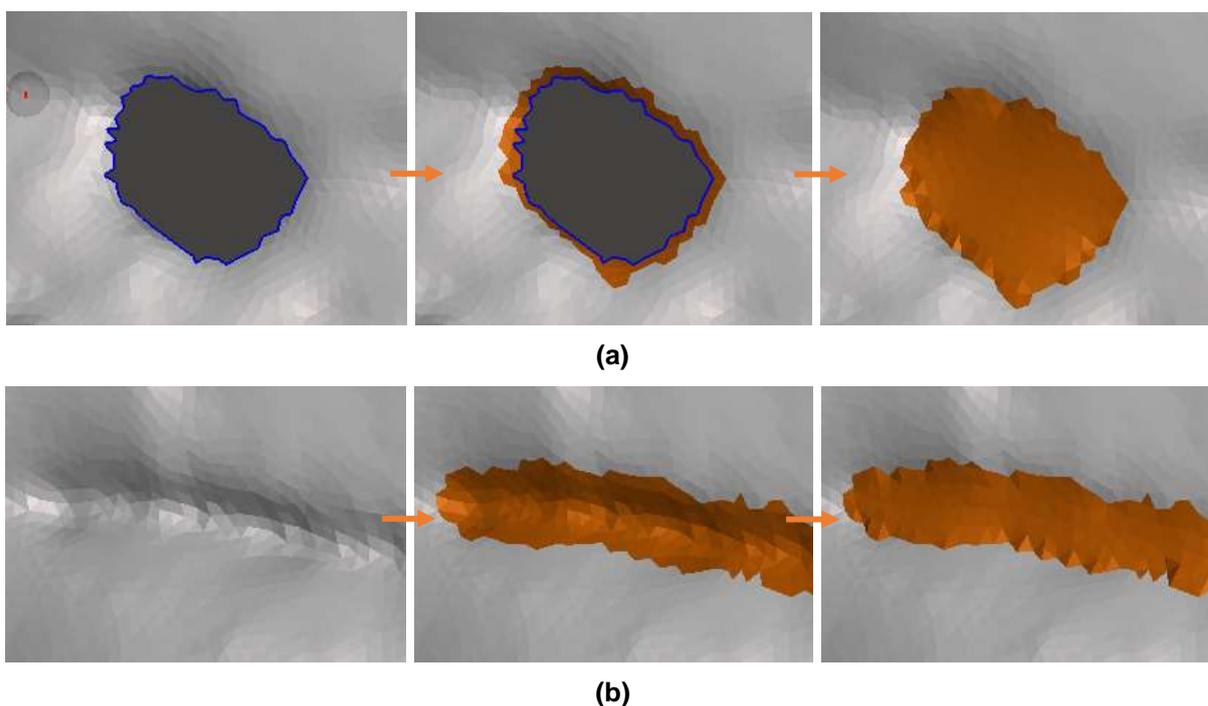
O quarto passo é a definição do contorno final da superfície. Para isso, foi feita uma segunda limpeza na malha com o intuito de já definir o formato final da órtese. Essa limpeza foi feita levando em conta a anatomia do paciente e como a órtese deveria se encaixar ao membro superior, oferecendo os devidos apoios laterais. Na realização desta definição do contorno final, utilizou-se basicamente a mesma técnica já citada anteriormente de seleção e exclusão de triângulos, com o diferencial de que primeiramente foi excluída somente a linha de contorno selecionada e posteriormente toda a parte externa à essa linha. A exclusão de somente a linha de contorno no primeiro momento, permite a utilização do

modificador “*Modify > Smooth Boundary*” da ferramenta de seleção que permite uma primeira suavização das bordas, como pode ser visto na Figura 23.



**Figura 23 – Processo de definição do contorno da superfície. (a) Delimitação inicial do contorno. (b) Suavização do contorno. (c) Seleção da malha exterior ao contorno. (d) Resultado final da limpeza da malha para definição do contorno.**

O quinto passo visa corrigir os defeitos que possam estar presentes na superfície delimitada. Problemas como furos, deformidades, erros de digitalização e interseções foram corrigidos nessa etapa. O Meshmixer disponibiliza diversas ferramentas para correção destes defeitos. A ferramenta mais simples é o modificador da ferramenta de seleção “*Erase & Fill*”, que apaga a área selecionada e a preenche com novos triângulos orientados segundo a forma da superfície ao seu redor, o que permite criar uma nova superfície que não seja uma simples área plana. Essa ferramenta foi utilizada na correção da maioria dos defeitos. A Figura 24 exemplifica seu funcionamento.



**Figura 24 - Exemplo de aplicação da ferramenta "Erase & Fill" (a) na correção de um furo, (b) na correção de uma deformidade da superfície.**

Além do modificador "Erase & Fill", o Meshmixer disponibiliza diversos tipos de pincéis que esculpem a malha através de deformações localizadas. Um destes pincéis, que também foi bastante utilizado, é o "RobustSmooth", que suaviza a malha, conforme exemplificado pela Figura 25. No entanto sua utilização deve ser cuidadosa para não suavizar demasiadamente a malha a ponto de perder a fidelidade em relação à anatomia digitalizada.

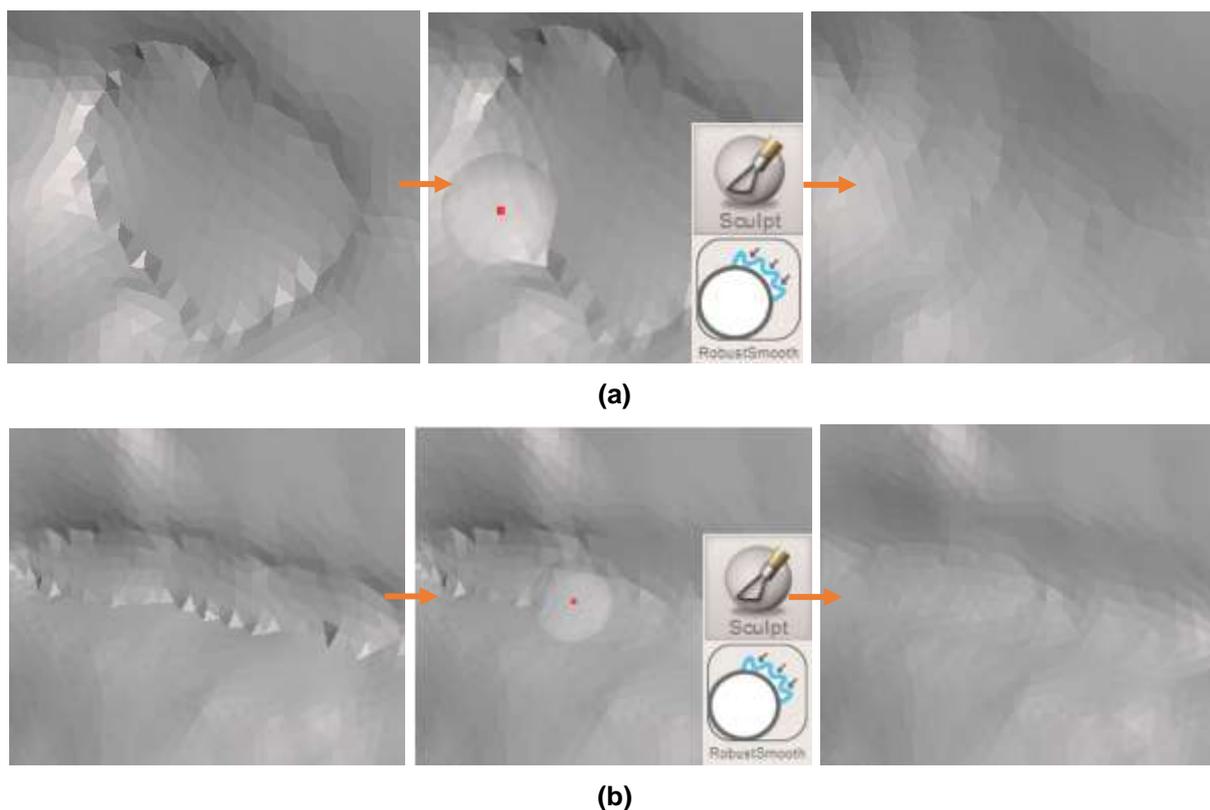


Figura 25 - Exemplo de aplicação da ferramenta "RobustSmooth".

Após a correção dos defeitos presentes na malha, foi realizado o sexto passo do procedimento, que consolida a correção dos defeitos com uma suavização geral da superfície, conforme mostra a Figura 26. Essa etapa permitiu a eliminação pequenas imperfeições como sulcos na malha, provenientes do próprio molde de gesso. A suavização da malha foi feita por outro modificador da ferramenta de seleção, o "Deform > Smooth", com scala de suavização de 10 unidades, aplicada ao tipo de suavização "Shape Preserving". O resultado desta etapa está apresentado na Figura 26(d).

Após a suavização da superfície e antes de seguir para a extrusão, é necessário fazer uma suavização das bordas para que elas fiquem mais regulares. Além disso, sem a suavização das bordas, o resultado de uma extrusão direta após o *Smooth* da superfície seria um sólido com bordas totalmente irregulares e com muitas auto-interseções. A suavização das bordas foi feita com a ferramenta, já citada anteriormente, "RobustSmooth" como mostrado na figura 27.

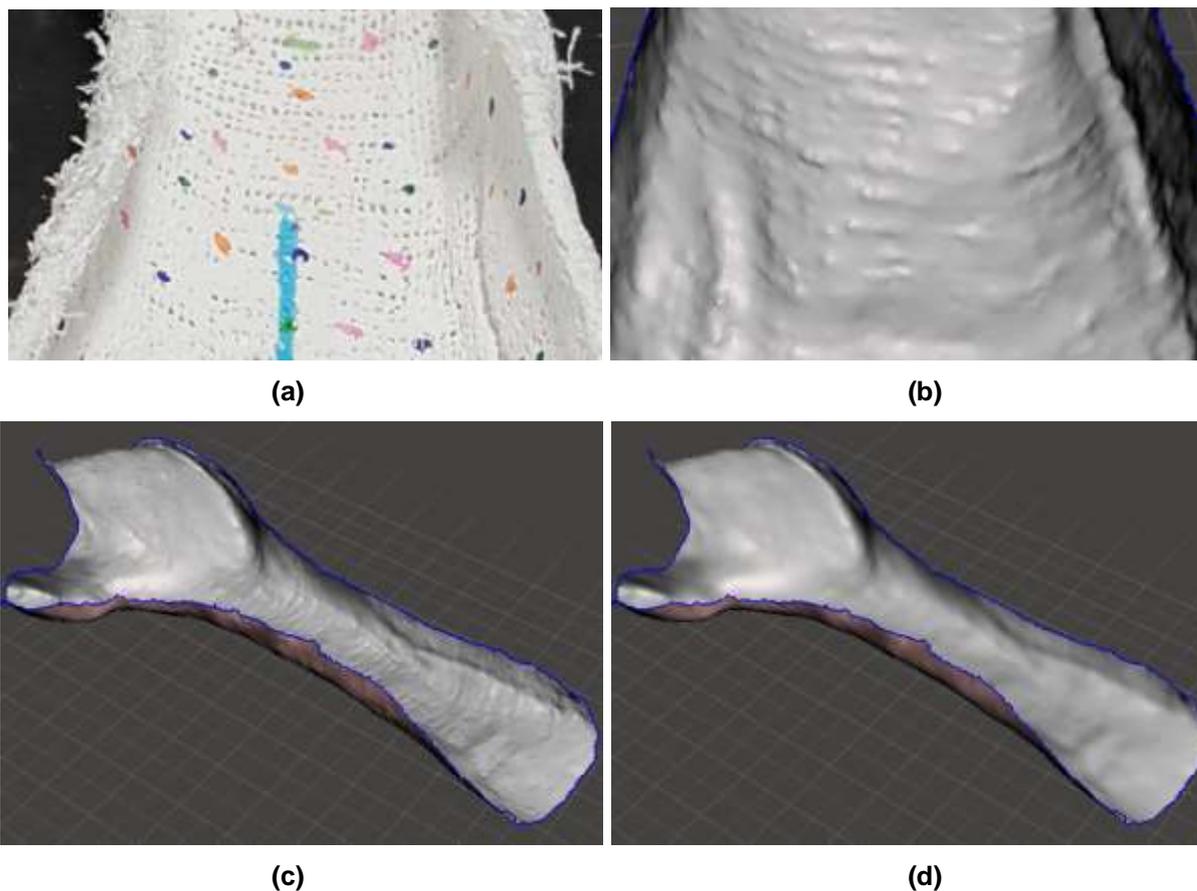


Figura 26 - Exemplo da aplicação da ferramenta "Smooth". (a) Detalhe da malha do molde de gesso. (b) Superfície da malha digitalizada. (c) Malha antes do Smooth (d) Malha após o Smooth.

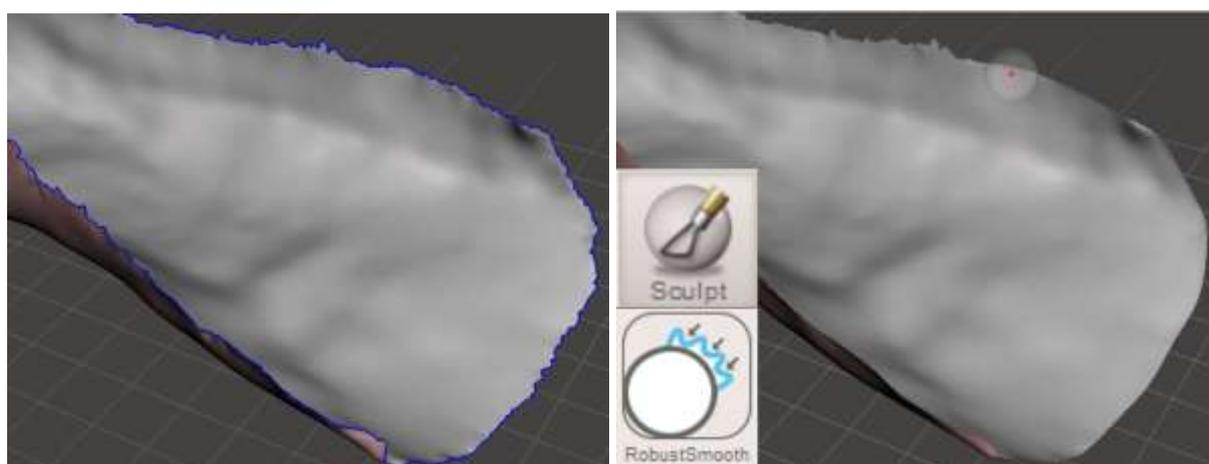


Figura 27 - Exemplo da aplicação da ferramenta "RobustSmooth" na suavização do contorno da malha.

Um vez suavizadas as bordas do contorno da malha, foi feita a extrusão da superfície com espessura de 4 mm no sentido negativo de Z para preservar a superfície corrigida. Para isso, utilizou-se o modificador da ferramenta de seleção “*Extrude*” com direção Normal.

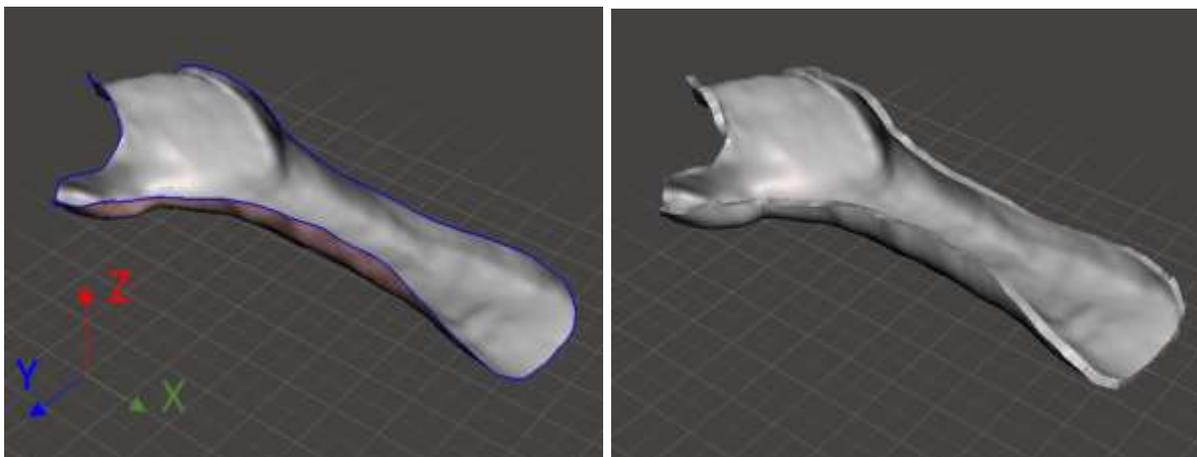


Figura 28 - Exemplo da aplicação de espessamento na malha.

Após a extrusão, é possível que apareçam alguns defeitos nas bordas, principalmente nas regiões de grande mudança de direção do contorno, como por exemplo, na região dos dedos. Estes problemas foram solucionados com o auxílio do modificador de seleção “*Erase & Fill*”, que apaga os triângulos selecionados e os substitui por novos triângulos seguindo a forma das bordas ao seu redor, como exemplificado na Figura 29.

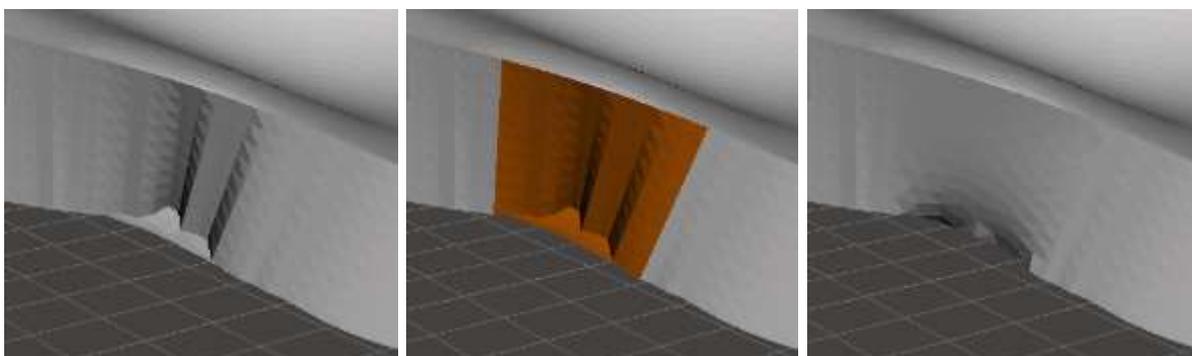
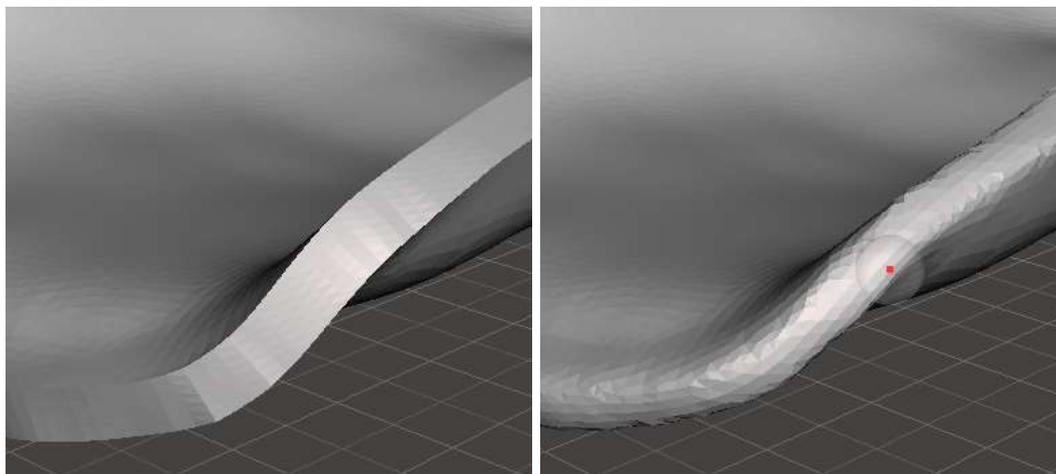


Figura 29 - Exemplo de correção de um defeito de borda após a extrusão.

Por fim, após todos os defeitos de extrusão nas bordas serem corrigidos, foi feita uma última suavização das arestas das bordas apenas para eliminar os cantos vivos. Essa suavização, mais uma vez, foi feita por meio do pincel "*RobustSmooth*", aplicado apenas às arestas de contorno do sólido.



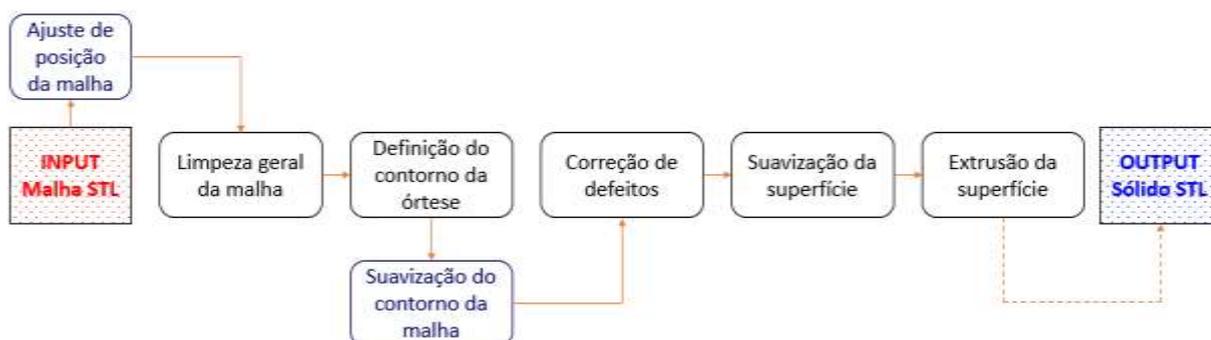
**Figura 30 - Exemplo de suavização das arestas das bordas pela aplicação da ferramenta "*RobustSmooth*".**

Após estas dez etapas, a correção e a modelagem da malha estão completas, originando um sólido livre de defeitos e que pode ser exportado na forma de um arquivo STL para aplicações em Manufatura Aditiva.

### **3.4.2 Procedimentos de correção pelo programa 3Ds Max**

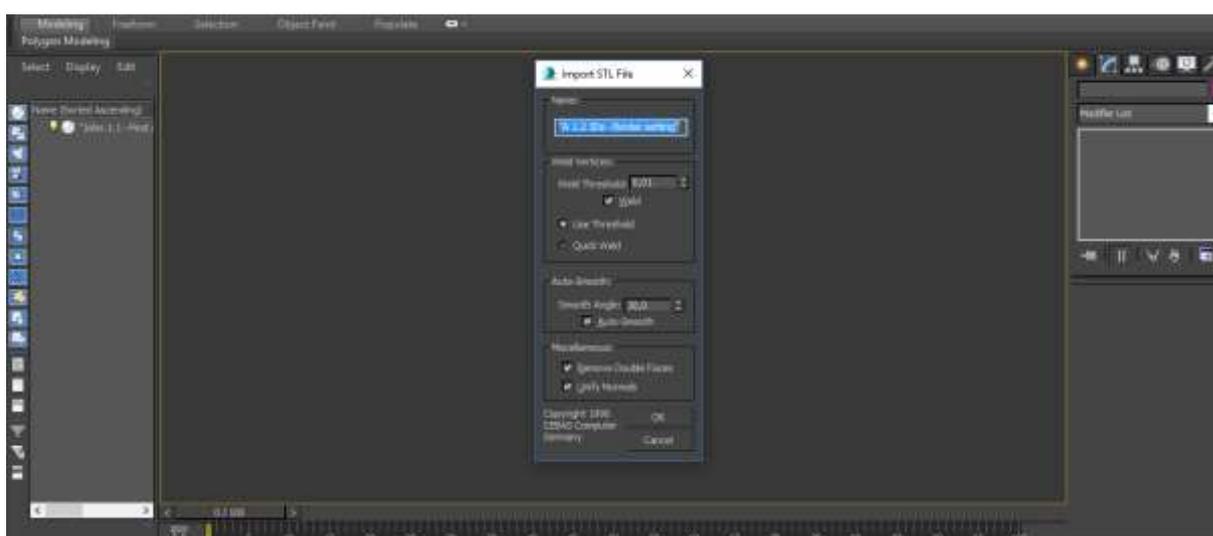
A seguir apresenta-se os procedimentos propostos para correção de malhas STL pelo programa 3Ds Max 2016 V18.0 Student. Tais procedimentos foram propostos com base na primeira análise feita com uma malha aleatória dentre as 9 malhas geradas por digitalização 3D.

Tendo como base o fluxograma de processo inicial para correção de malhas, desenvolveu-se um novo fluxograma visando as ferramentas e possibilidades oferecidas pelo 3Ds Max, como mostrado na Figura 31. Cada uma das 9 malhas passou exatamente pelos mesmos passos descritos a seguir.



**Figura 31 - Fluxograma dos procedimentos de correção e modelagem propostos para correção de malhas pelo programa 3Ds Max.**

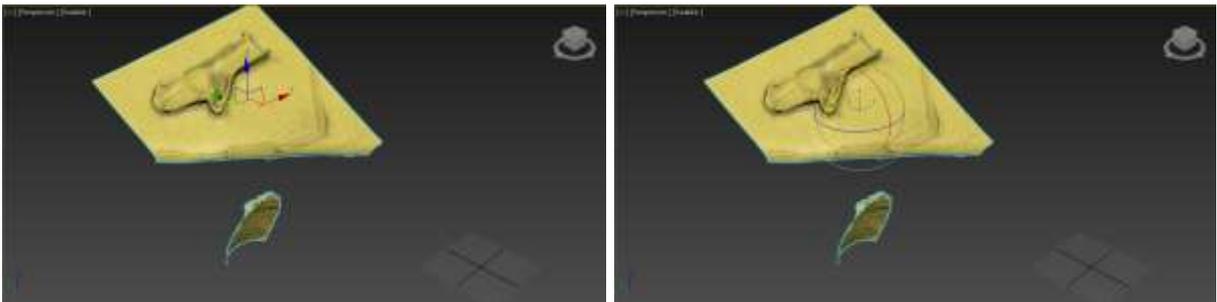
O primeiro passo para a correção de uma malha pelo 3Ds Max foi a importação da malha STL gerada pela digitalização 3D. No momento da importação, o 3Ds Max oferece algumas opções de pré-formatação da malha. A Figura 32 mostra a janela de opções oferecidas. Deve-se sempre deixar a opção “*Weld*” acionada, pois ela faz um tratamento inicial na malha unindo polígonos que possam apresentar espaçamentos. A opção de “*Auto-Smooth*” pode ser acionada pois aplica uma suavização (*pré-smooth*) que elimina a necessidade de uma etapa de refinamento da malha (*remesh*). As opções de “*Remove Double Faces*” e “*Unify Normals*” também podem ser sempre acionadas pois já fazem uma correção nos problemas de orientação.



**Figura 32 - Menu de importação de malhas STL pelo 3Ds Max.**

Assim como no Meshmixer, após a importação, a malha pode estar em uma posição no espaço que não seja muito favorável à sua visualização e manipulação, de modo que pode ser necessário realizar o ajuste da posição da malha dentro da área de trabalho do 3Ds Max, aplicando operações de rotação e translação.

Uma malha pode ser facilmente reposicionada no 3Ds Max através das ferramentas “*Select and Move*”  e “*Select and Rotate*” . Para aplicar qualquer um destes movimentos, é necessário clicar na ferramenta e em seguida clicar no objeto a sofrer a ação. Em seguida passará a ser visível sobre a peça a origem de um sistema cartesiano que permite a translação da malha ou uma esfera que permite a rotação em torno dos 3 eixos. Fazendo uso destas duas ferramentas, as 9 malhas foram reposicionadas de modo a garantir uma boa posição para sua visualização e manipulação dentro da área de trabalho, conforme a Figura 33.

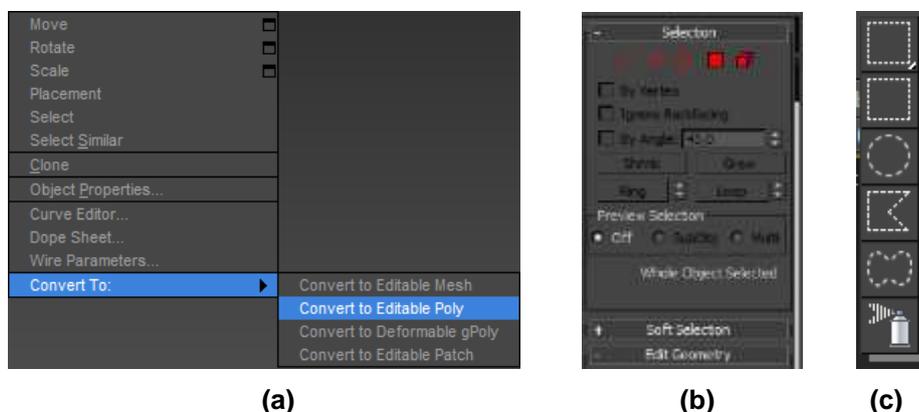


**Figura 33 - Eixos de translação e rotação para reposicionamento de malhas pelo programa 3Ds Max.**

Da mesma forma que foi desenvolvida na segunda etapa de correção pelo Meshmixer, após o reposicionamento no 3Ds Max, foi feita uma primeira limpeza da superfície, eliminando o entorno desnecessário da malha.

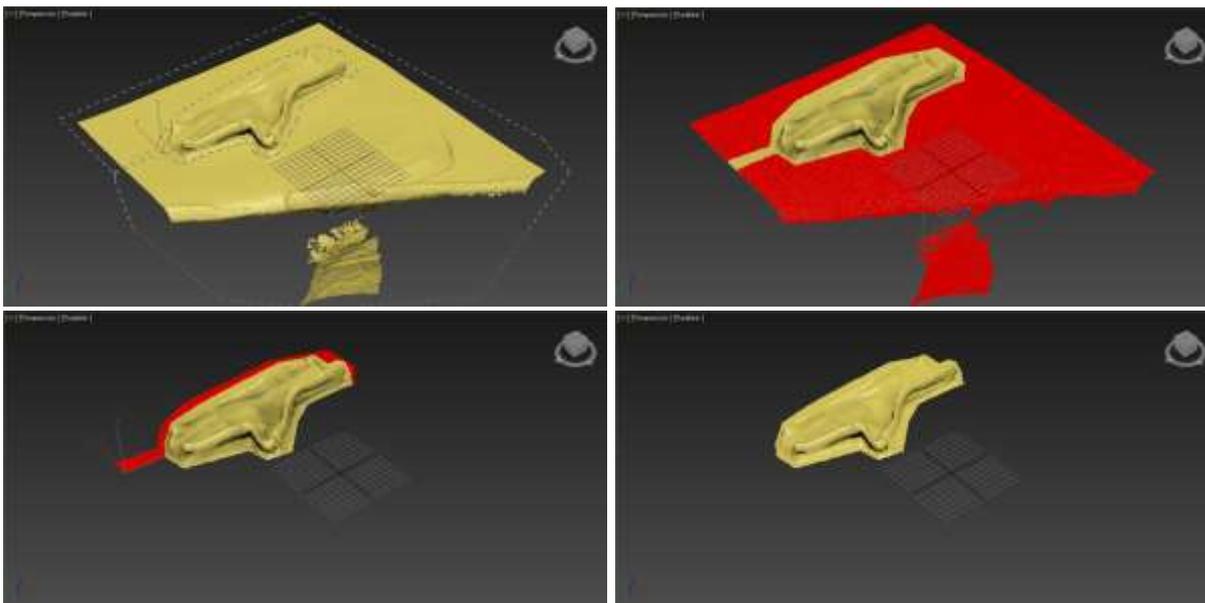
Diferentemente do Meshmixer, no 3Ds Max não existe uma ferramenta direta de seleção que pode ser acionada a qualquer momento. Para se trabalhar com o processo de edição de malha em nível de seleção de polígonos individuais, antes é necessário converter a superfície em um “polígono editável” (Figura34 (a)). Para isso, é necessário clicar na malha para deixá-la ativa, clicar com o botão direito do mouse e escolher a opção “*Convert to: > Convert to Editable Poly*”. Essa ação aciona um menu lateral do lado direito que permite opções de seleção, tais como a

seleção de vértices, arestas, bordas, polígonos (faces) e elementos 3D (Figura 34 (b)).



**Figura 34 - (a) Conversão da malha em um polígono editável. (b) Menu de seleção (c) Ferramentas de seleção.**

Para o processo de limpeza do entorno da malha, pode-se utilizar tanto a seleção de vértices quanto de arestas ou polígonos. Uma vez selecionado o tipo de seleção com a qual se vai trabalhar, deve-se ainda escolher uma dentre as cinco ferramentas de seleção que estão disponíveis (Figura 34 (c)), sendo a ferramenta de seleção “*Fence Selection Region*” a que apresenta o melhor resultado. Por fim, pode-se desenhar com o laço na área que se pretende excluir, como pode ser visto da Figura 35. Após a seleção, basta apertar a tecla “Delete” para eliminar os elementos selecionados. Ao término deste processo, restou apenas a parte da malha referente ao molde de gesso.



**Figura 35 - Exemplo de utilização da ferramenta de seleção por laço para limpeza geral da malha.**

O terceiro passo consiste na definição do contorno final da órtese. Como o 3Ds Max não dispõe de uma ferramenta para suavização direta das bordas da malha como o “RobustSmooth” do Meshmixer, esta etapa de definição do contorno da órtese foi feito em duas partes. Para a primeira parte, novamente se fez uso das ferramentas de seleção, reforçando a premissa de que para ativar as opções de seleção, foi necessário antes transformar a malha em um “polígono editável” através da opção “*Convert to: > Convert to Editable Poly*”. Novamente, a ferramenta “*Fence Selection Region*” facilitou a seleção dos triângulos a serem eliminados da malha, como mostra a Figura 36.

A segunda parte da definição do contorno final da malha foi feita visando conseguir uma borda o mais suave possível. Para isso, a ideia foi desenhar um novo contorno, a partir do qual fosse possível fazer a eliminação dos triângulos externos. Para desenhar uma nova linha de contorno, o 3Ds Max disponibiliza a ferramenta “*Cut*”, através da qual foi desenhado o novo contorno desejado. A Figura 37 exemplifica o processo.

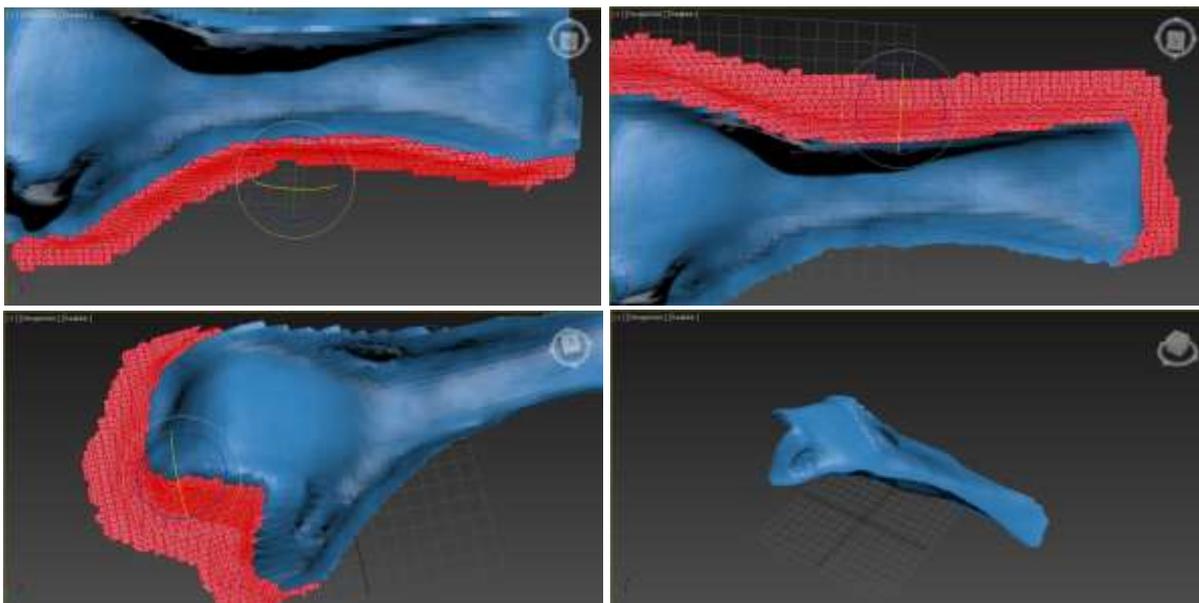


Figura 36 - Exemplo da definição do contorno da malha através da ferramenta de seleção por laço.

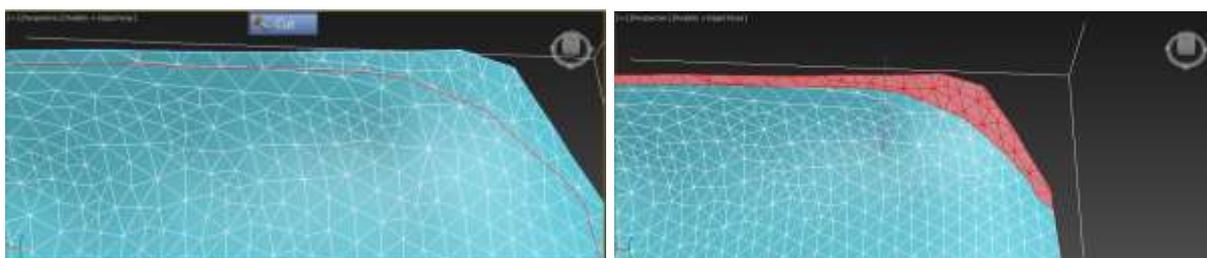
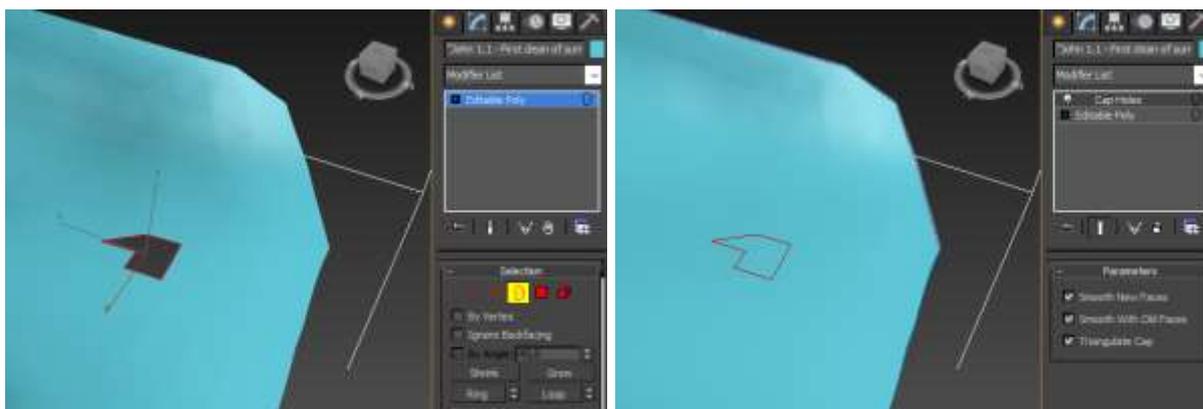
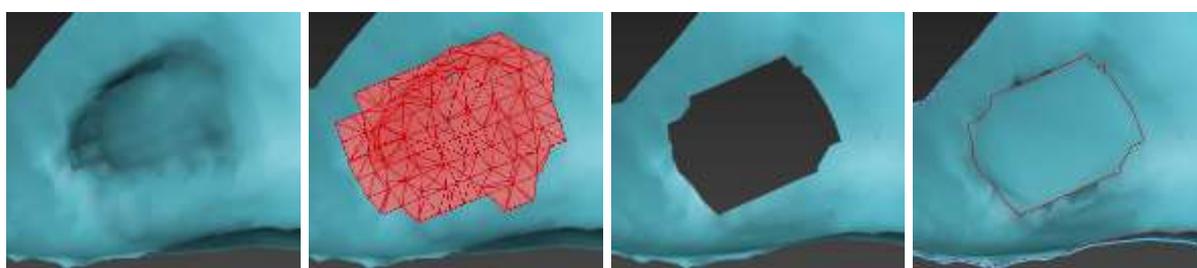


Figura 37 - Exemplo de suavização do contorno com a aplicação da ferramenta "Cut".

Após o refino de todo o contorno da malha, a próxima etapa foi a correção dos defeitos de superfície. A ferramenta de utilização mais simples e que permite a correção de basicamente todos os defeitos que possam estar presentes é o modificador “*Cap Holes*”, que apaga a área selecionada e a preenche com novos triângulos orientados seguindo a forma da superfície ao seu redor, o que permite criar uma nova superfície que não seja uma simples área plana. Na aplicação da ferramenta “*Cap Holes*” foram sempre mantidas selecionadas as opções “*Smooth New Faces*”, “*Smooth with Old Faces*” e “*Triangulate Cap*”. A Figura 38 exemplifica a utilização deste modificador.



(a)



(b)

Figura 38 - Exemplo da correção de (a) um defeito do tipo *hole*, (b) uma deformidade na malha.

A quinta etapa do procedimento de correção visou a consolidação da correção da superfície através de uma suavização geral da malha. Para isso, foi utilizado o modificador “*Relax*”, que aplica um *smooth* na superfície e também permite realizar uma primeira suavização das bordas do contorno da malha. Foram utilizados como parâmetros o valor de relaxação 1 e número de iterações igual a 5 (Figura 39).

Por fim, uma vez que todos os problemas de superfície foram corrigidos e a malha foi suavizada, foi aplicada a ferramenta “*Shell*” para gerar um sólido fechado. Mantendo os mesmos parâmetros aplicados na extrusão pelo Meshmixer, aplicou-se a ferramenta *Shell* com valor de “*Inner amount*” de 4 mm, garantindo que a superfície corrigida permanecesse inalterada (Figura 40).

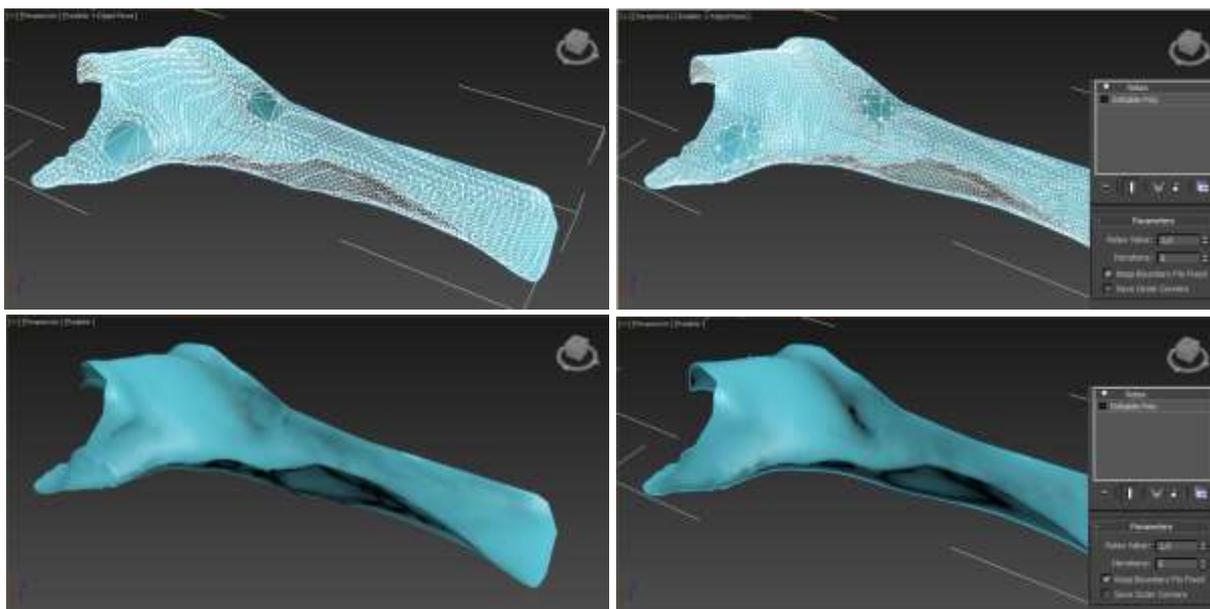


Figura 39 - Exemplo da aplicação da ferramenta "Relax".

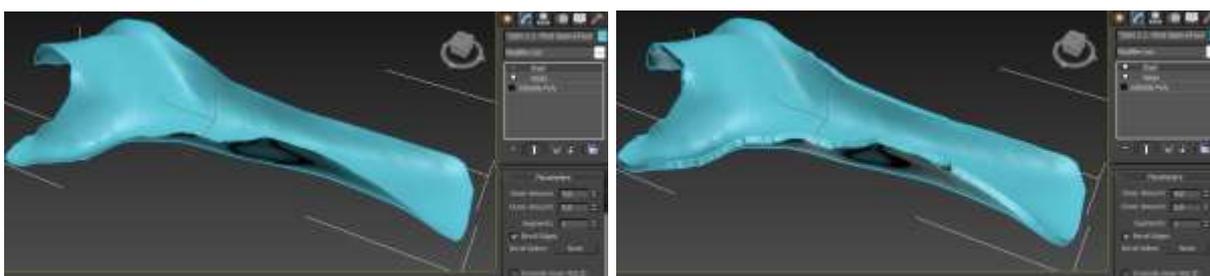


Figura 40 - Exemplo da aplicação da ferramenta "Shell" para espessamento da malha.

### 3.5 Validação dos procedimentos de correção

A validação dos resultados obtidos com os procedimentos de correção aplicados foi feita em três etapas, sendo a primeira para validação da fidelidade à forma original, a segunda uma validação do sólido final através da ferramenta oferecida pelo Meshmixer e a terceira para validar os procedimentos de correção como um todo.

Na primeira etapa, utilizou-se o programa Geomagic Wrap para realizar uma sobreposição do sólido final com a malha pós-definição das bordas. O intuito dessa sobreposição foi validar as correções feitas na malha para garantir que as alterações não ocasionaram a perda da fidelidade à anatomia original obtida através do molde.

Todos os 18 sólidos gerados foram sobrepostos com suas respectivas malhas gerando um gráfico com gradiente de cores.

Sabendo que para um sólido ser um dado de entrada válido a um processo de Manufatura Aditiva ele tem que ser representado por uma superfície fechada e livre de defeitos como aberturas e auto-interseções, na segunda etapa, visando validar o sólido final, os 18 sólidos passaram pela análise da ferramenta de inspeção final “Analysis > Inspector” disponível no programa Meshmixer.

Por fim, na terceira etapa, com intuito de validar todos os procedimentos de correção propostos, foi escolhido aleatoriamente uma malha corrigida para ser manufaturada por meio de impressão 3D com a impressora 3D Cloner disponibilizada no laboratório NUFER.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este tópico tem por objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos através das metodologias aplicadas no desenvolvimento deste trabalho.

### 4.1 Avaliação das malhas

O primeiro resultado de grande relevância e que merece discussão é a comparação entre as malhas geradas pelos dois processos de digitalização utilizados e os moldes de gesso.

Um dos objetivos deste trabalho, apresentado em sua parte introdutória, diz respeito à importância de se garantir a fidelidade da superfície corrigida à superfície original, de modo que se tem como pré-requisito obrigatório a fidelidade das malhas geradas por digitalização tanto em relação aos detalhes da forma quanto às dimensões originais dos moldes de gesso.

Através do processo de comparação de medidas por pares de pontos apresentada anteriormente, comparou-se todos os 3 moldes com as nove malhas originais a fim de validá-las quanto ao seu dimensionamento em relação aos moldes originais. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

**Tabela 1 - Resultados das medições comparativas dos pares de pontos analisados no Molde A.**

<b>MEDIÇÕES DO MOLDE A</b>				
<b>DISTÂNCIAS (mm)</b>	<b>MOLDE</b>	<b>MALHA A1 (origem Kinect)</b>	<b>MALHA A2 (origem Kinect)</b>	<b>MALHA A3 (origem ReMake)</b>
<b>D1 (1-1)</b>	60,10	65,00	64,40	62,30
<b>D2 (2-2)</b>	80,50	82,20	80,90	81,20
<b>D3 (3-3)</b>	53,50	52,20	54,40	52,10
<b>D4 (4-4)</b>	20,50	21,50	21,50	22,20
<b>D5 (5-5)</b>	16,70	17,10	14,40	16,60

Tabela 2 - Resultados das medições comparativas dos pares de pontos analisados no Molde B.

MEDIÇÕES DO MOLDE B				
DISTÂNCIAS (mm)	MOLDE	MALHA B1 (origem Kinect)	MALHA B2 (origem Kinect)	MALHA B3 (origem ReMake)
D1 (1-1)	49,00	47,40	47,80	50,80
D2 (2-2)	63,50	59,30	63,20	60,30
D3 (3-3)	55,50	58,10	53,70	56,30
D4 (4-4)	127,00	128,90	128,00	127,80
D5 (5-5)	132,50	132,00	130,80	131,80

Tabela 3 - Resultados das medições comparativas dos pares de pontos analisados no Molde C.

MEDIÇÕES DO MOLDE C				
DISTÂNCIAS (mm)	MOLDE	MALHA C1 (origem Kinect)	MALHA C2 (origem Kinect)	MALHA C3 (origem ReMake)
D1 (1-1)	55,00	55,80	56,00	55,30
D2 (2-2)	35,00	33,10	36,50	35,70
D3 (3-3)	260,00	260,80	262,60	257,60
D4 (4-4)	88,50	89,20	88,60	88,50
D5 (5-5)	66,00	66,20	67,90	66,20

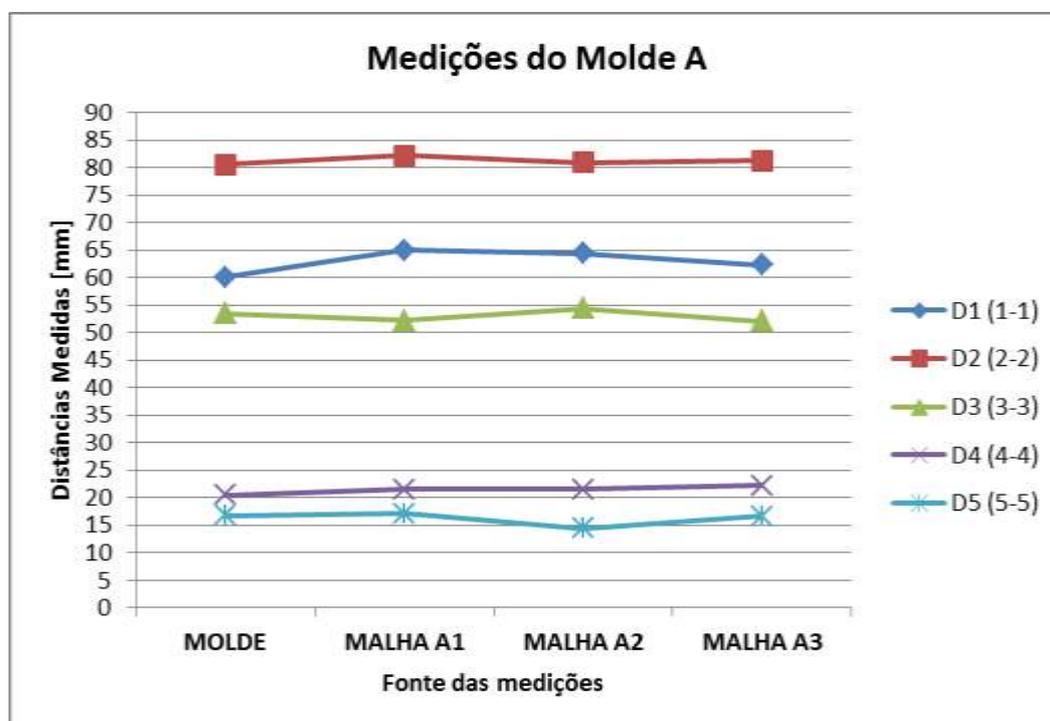


Gráfico 1 - Resultados das medições comparativas dos pares de pontos analisados no Molde A.

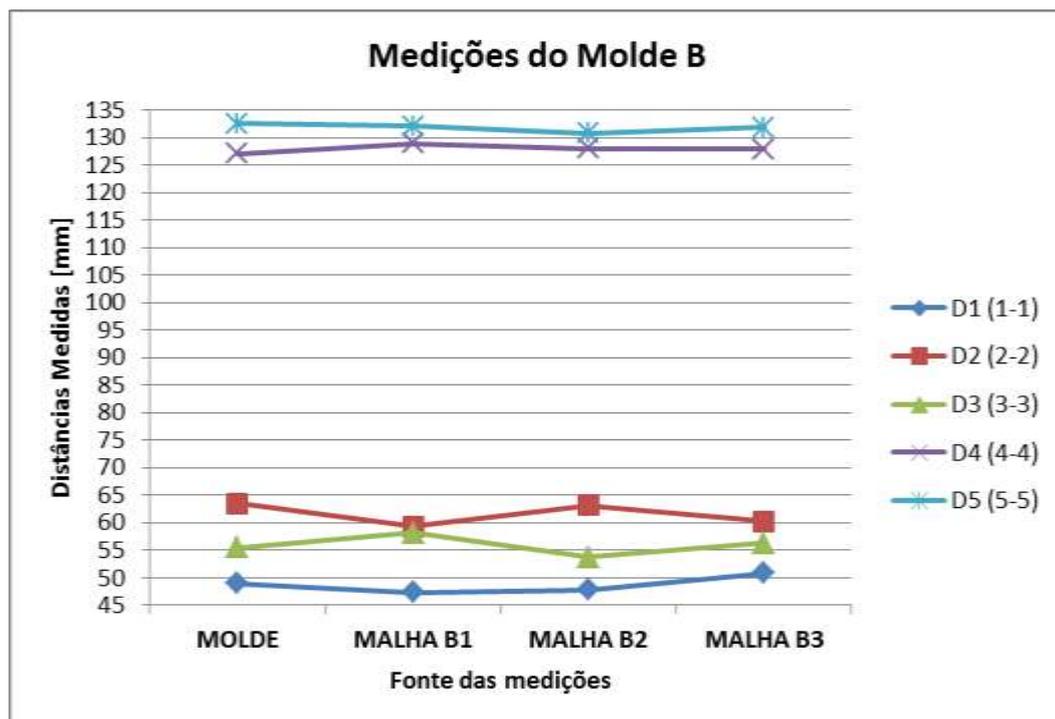


Gráfico 2 - Resultados das medições comparativas dos pares de pontos analisados no Molde B.

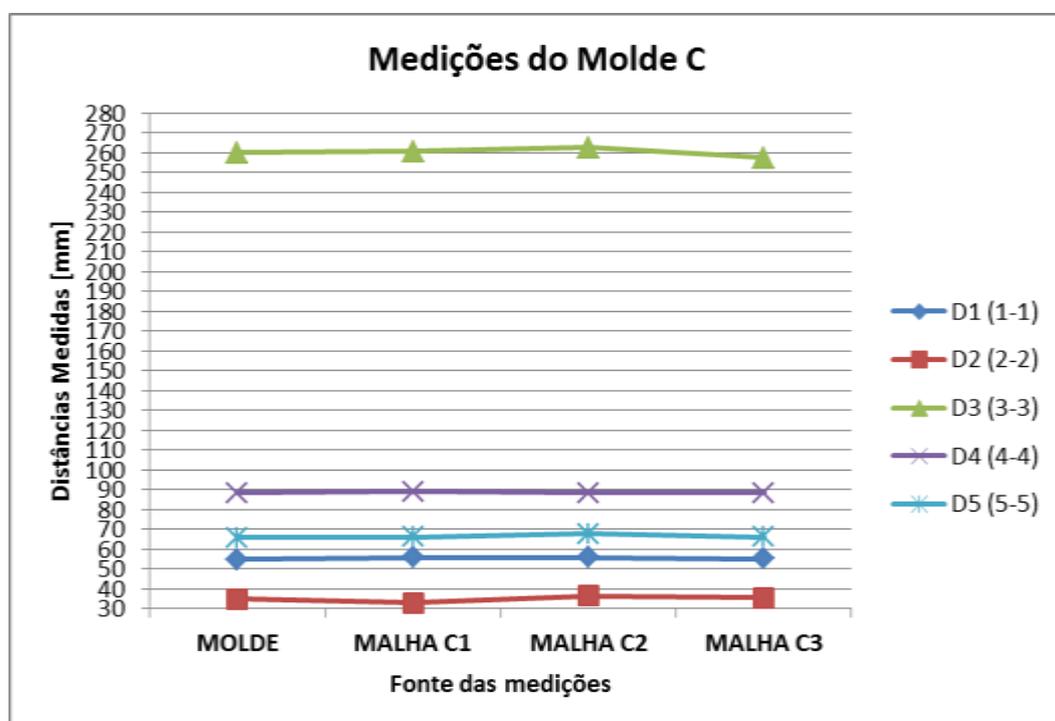


Gráfico 3 - Resultados das medições comparativas dos pares de pontos analisados no Molde C.

Observando a diferença entre os valores obtidos para as dimensões entre os pontos analisados, pode-se concluir que tanto o processo de digitalização pelo Kinect quanto pelo ReMake pode ser considerado satisfatório no quesito representação das dimensões do molde. A variação entre as medidas, no geral, não passou de 2mm e apesar de haver diferenças de até 5 mm entre os valores medidos nas malhas e os valores obtidos nos moldes, essa diferença não é suficiente para invalidar uma malha para o processo de correção. Visto os procedimentos de aquisição da geometria base pelo uso de moldes confeccionados em ataduras gessadas, diferenças da ordem de 5 mm estão dentro da ordem de grandeza que vai ser considerada aceitável apenas a título de validação das tecnologias de digitalização, garantindo que as dimensões das malhas não estejam completamente diferentes dos moldes reais. No momento da confecção do molde em gesso, é muito improvável que a criança consiga permanecer com o membro superior exatamente na mesma posição durante todo o processo de secagem do molde. Quaisquer movimentos ou até mesmo contrações musculares podem gerar variações no molde que ultrapassam 5 mm. No entanto, ressaltos ou deformações da ordem de 5 mm também podem causar desconforto e lesões na pele do usuário. Assim, à esta discussão cabe um estudo específico que possa avaliar a real capacidade das técnicas de digitalização em garantir a fidelidade às dimensões do molde, trabalho este que está sendo desenvolvido em paralelo por uma aluna do grupo NUFER. Deste modo, pode-se caracterizar as malhas geradas como sendo satisfatórias ao processo de correção, oferecendo uma primeira fidelidade aceitável às dimensões da anatomia representada pelos moldes.

#### **4.2 Comparação das malhas**

A comparação entre as malhas permite uma análise do grau de repetitividade dos processos de digitalização empregados, bem como as principais diferenças entre eles.

O primeiro ponto a ser observado na comparação entre as 6 malhas geradas pelo Kinect refere-se ao seu refinamento. Observa-se em todas as 6 malhas, um refino médio bastante regular que permitiu uma boa representação da forma geral da

anatomia digitalizada. No entanto, esse refinamento médio não permite uma representação mais fiel de detalhes menores, como por exemplo, contornos de dedos mais bem definidos.

Outro ponto importante a ser observado é que o processo de digitalização com Kinect apresenta certa deficiência na leitura de geometrias negativas, gerando um resultado com baixa fidelidade à forma original do molde. Esse problema ocorre principalmente em áreas de contorno lateral dos membros superiores, como exemplificado pela figura 41.

No que se refere a defeito de superfície, as malhas geradas pelo Kinect quase não apresentam defeitos dos tipos lacunas, espaçamentos ou auto-interseções. Em contrapartida, o problema de ruído na malha (*noise*) é perceptível.

Comparando-se as 3 malhas geradas pelo programa Remake, observa-se um maior refinamento, em relação àquela encontrada nas malhas oriundas do Kinect. Este refinamento da malha permite uma ótima representação da anatomia no molde, bem como a representação de detalhes como contornos de dedos bem evidenciados. Outro ponto de superioridade em relação às malhas geradas pelo Kinect, diz respeito às áreas de geometria negativa, com as quais o ReMake não teve problema, como pode ser observado na figura 41. Um segundo ponto de superioridade dos resultados do ReMake são os erros de leitura da superfície. Este tipo de erro não foi encontrado em nenhuma malha gerada pela tecnologia baseada em fotos, ao contrário das malhas geradas pelo Kinect. A Figura 42 exemplifica os erros de leitura da superfície por parte do Kinect.

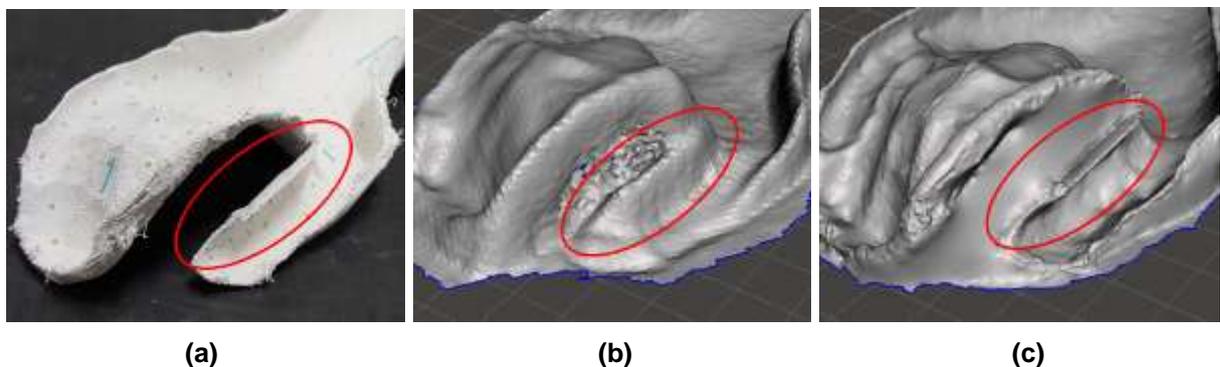
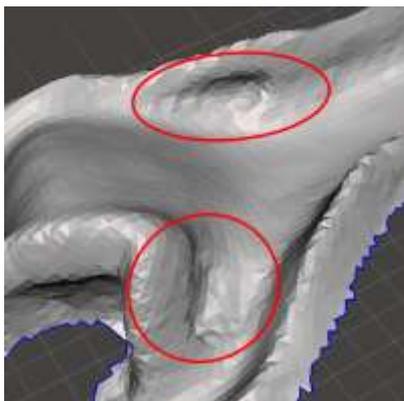


Figura 41 - Comparação entre o molde (a) e os resultados de digitalização de geometrias negativas pelo Kinect (b) e pelo ReMake (c).



**Figura 42 – Exemplo de erro de leitura da superfície pela digitalização com o Kinect.**

Os resultados obtidos pelos dois métodos de digitalização foram bastante consistentes, apresentando boa repetitividade nas características gerais das malhas.

De modo geral, as malhas geradas pelo ReMake são superiores às geradas pelo Kinect, especialmente no quesito fidelidade à forma da superfície do molde de gesso.

### **4.3 Discussão sobre os procedimentos utilizados**

#### **4.3.1 Correção de defeitos**

Defeitos como aberturas, espaçamentos, ruídos, problemas de orientação dos vetores normais de triângulos e áreas com forma destoante do restante da superfície, provenientes de erros de digitalização devem obrigatoriamente ser corrigidos, mesmo que estes acarretem em uma deformação em relação à superfície original. Nesta etapa, a habilidade do usuário com os programas de correção é essencial para garantir a menor deformação possível da malha.

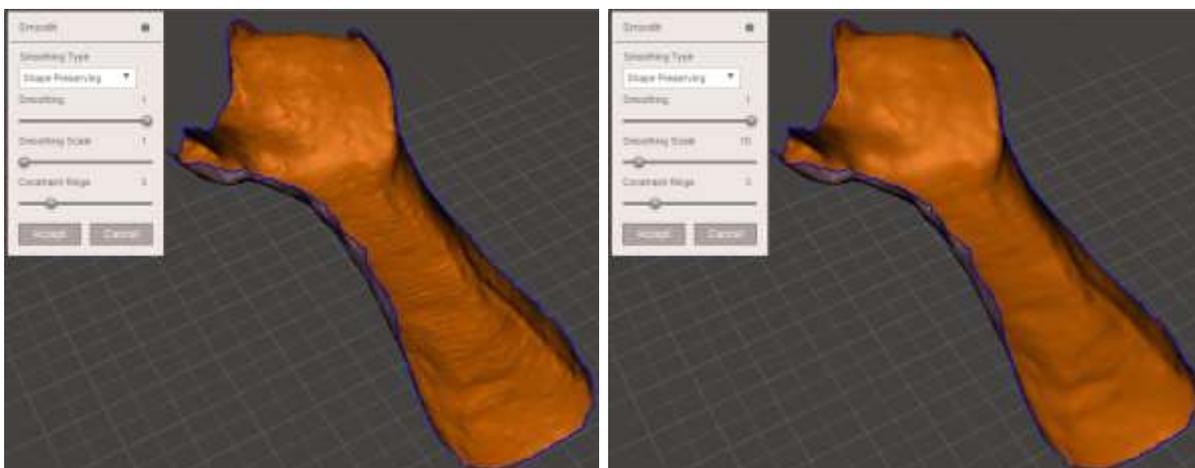
Detalhes nas malhas provenientes de defeitos dos moldes, tais como a presença de picos e vales com formato quadricular que representam a malha das ataduras gessadas, pequenas ranhuras e dobras também podem e devem ser corrigidos, mas a aplicação de ferramentas de deformação local pode não ser a melhor tratativa. Esse tipo de ferramentas permite a correção destes defeitos, porém

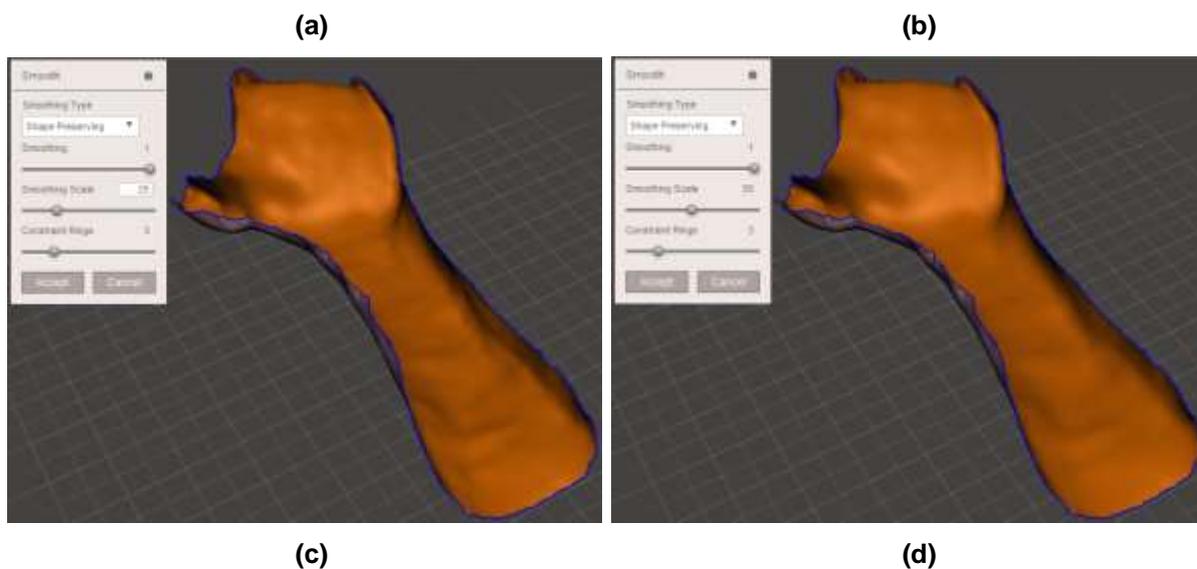
leva a uma grande deformação da superfície original. Nestes casos, é mais indicado, antes de aplicar ferramentas de deformação local, tentar corrigir essas imperfeições com ferramentas de deformação global, tal como a aplicação de suavizações (*smooth*) na malha como um todo.

#### 4.3.2 Suavização da superfície

A etapa de suavização da superfície é de grande importância na consolidação da correção dos defeitos, pois proporciona uma homogeneização final da malha, suavizando cantos vivos, picos e vales muito pontiagudos e a forma geral. Em contrapartida, é uma das etapas que mais oferece riscos ao critério de fidelidade da malha ao molde. Pequenas escalas de suavização podem não ser o suficiente para garantir uma boa homogeneização da superfície, ao mesmo tempo em que incrementos na escala devem ser cautelosos, pois podem gerar grandes alterações de forma, como poder ser observado na figura 43.

Para uma correta aplicação de escala de suavização, o melhor cenário possível seria um estudo conjunto com o terapeuta ocupacional do caso para determinar até que ponto deformações provenientes da suavização são favoráveis ou a partir de qual valor a suavização passa a comprometer a forma e, portanto, a funcionalidade do produto final.

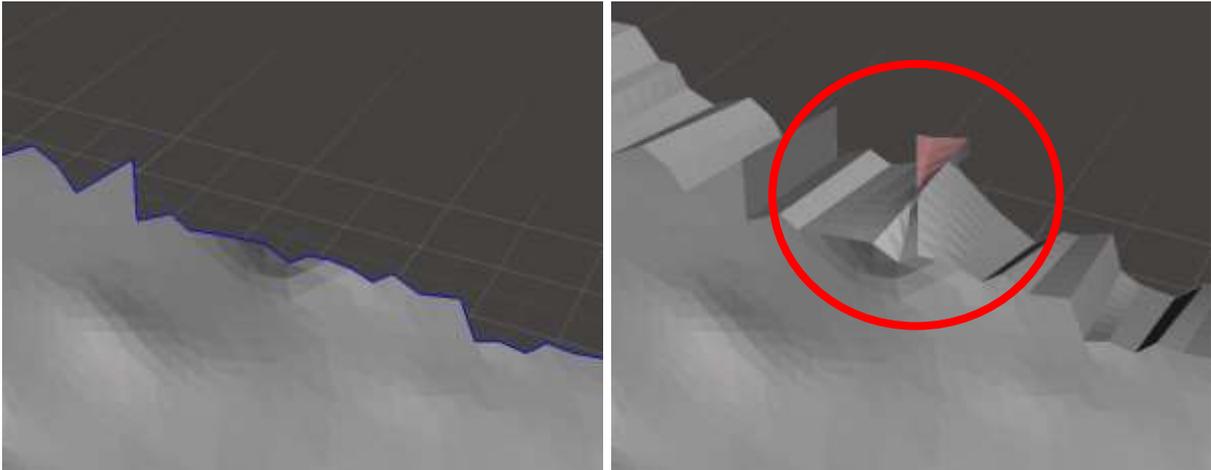




**Figura 43 - Exemplo da aplicação da influência do valor de escala de suavização. (a) Valor de escala de 1%. (b) Valor de escala de 10%. (c) Valor de escala de 25%. (d) Valor de escala de 50%.**

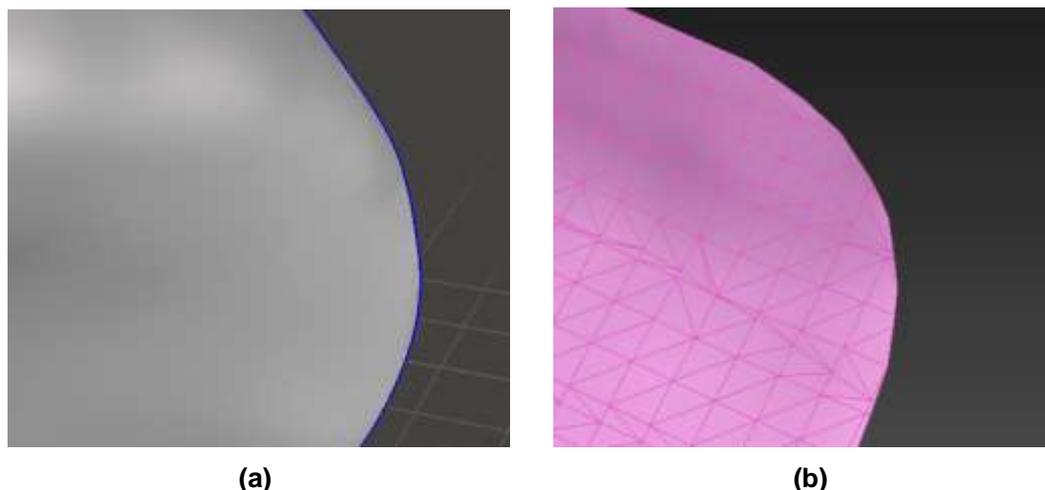
#### **4.3.3 Suavização do contorno da malha**

A etapa de suavização do contorno da malha é de grande importância ao resultado da extrusão da superfície. Em ambos os programas utilizados na a manipulação das malhas, a extrusão é feita levando-se em conta a forma e orientação de cada triângulo que a compõe. Desta forma, o quanto mais homogêneo e “liso” for o contorno, melhor será o resultado das bordas no processo de extrusão. Contornos irregulares, com muitas mudanças de direção, além de gerar bordas irregulares com cantos vivos, o que seria ruim à sua utilização, são extremamente propícios a resultar bordas com auto-interseções, como exemplificado na figura 44.



**Figura 44 - Exemplo de borda com auto-interseção após espessamento da malha.**

Comparando os programas quanto à possibilidade de suavização dos contornos, o Meshmixer é decisivo e apresenta sua grande vantagem em relação ao 3Ds Max. Como já exemplificado durante a descrição dos procedimentos de correção, o Meshmixer dispõe da ferramenta “*RobustSmooth*” que é própria para suavização de arestas e superfícies. A aplicação dessa ferramenta sobre o contorno da malha garante um contor suave sem arestas visíveis, o que proporciona uma borda extrudada com pouquíssimos defeitos. Já o 3Ds Max não oferece uma ferramenta que proporcione resultado parecido na suavização dos contornos. Como já visto anteriormente, a técnica que permite o melhor resultado no 3Ds Max é a inserção de um novo contorno desenhado a mão para servir como base para uma nova limpeza da malha, excluindo os triângulos externos a este contorno. O grande problema desta técnica se encontra no fato de este novo contorno só pode ser desenhado a partir de retas, quando a situação ideal seria a utilização de *splines*. Por menores que possam ser os segmentos de reta que formarão o novo contorno, sempre haverá interrupções neste perfil e estas interrupções darão origem a irregularidades nas bordas quando extrudadas (Figura 45).



**Figura 45 - Comparação do resultado de suavização de borda pelo Meshmixer (a) e pelo 3Ds Max (b).**

#### **4.3.4 Extrusão da superfície**

Na etapa de extrusão da superfície há um ponto de extrema importância a ser observado. Durante as etapas anteriores, diversas modificações foram implementadas à malha para torna-la livre de defeitos e o mais fiel possível ao molde. No momento da extrusão, é vital que essa superfície permaneça inalterada.

Tanto no Meshmixer, quanto no 3Ds Max, no momento da extrusão há a possibilidade de aplicar o espessamento através de um offset positivo ou negativo da superfície. Deste modo, deve-se garantir que o offset de espessamento se dará de forma a gerar uma casca externa à superfície corrigida, caso contrário a superfície que fara interface com o membro superior do paciente será a superfície de offset e não a superfície corrigida. A figura 46 exemplifica o sentido obrigatório de espessamento.

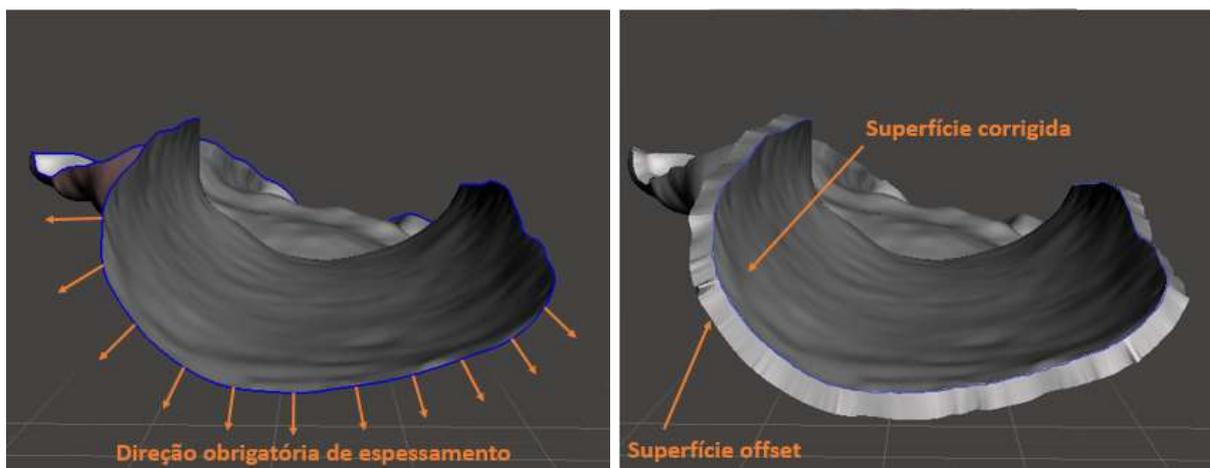


Figura 46 - Direção obrigatória de espessamento de malhas corrigidas.

A espessura de extrusão pode ser modificada de acordo com as necessidades do processo e da órtese. No entanto, vale a pena observar que quanto maior for o valor de espessamento, maior é a probabilidade de haver deformidades nas bordas, bem como quanto mais fina for a órtese, menor será sua resistência mecânica.

No Meshmixer, com extrusão de 4 mm, observou-se bons resultados de bordas, sem muitos defeitos que necessitassem de correção. As poucas deformidades resultantes do processo de espessamento, puderam ser corrigidas facilmente com o auxílio do modificador da ferramenta de seleção “*Erase & Fill*”.

No 3Ds Max, devido à limitação já discutida, que diz respeito à suavização dos contornos das malhas por parte de uma nova linha de contorno, os resultados de espessamento não foram tão satisfatórios quanto aqueles obtidos pelo Meshmixer. Valores muito pequenos de espessamento, tais como 1mm, oferecem bordas espessadas com um número relativamente pequeno de deformidades, os quais se constituem, basicamente, de auto-interseções com triângulos muito pequenos, de difícil visualização e seleção para correção. Para valores maiores, tais como 4 mm, o número de deformidades nas bordas apresenta um ligeiro aumento, sendo novamente a auto-interseção, o problema mais comum. A correção deste problema é possível, porém depende de grande tempo para varrer todo o contorno do sólido corrigindo, através de seleção manual, eliminação dos triângulos e aplicação da ferramenta “*Cap Holes*”, cada uma das deformidades. O 3Ds Max não oferece uma ferramenta para correção destes defeitos de forma automática, o que

inviabiliza o seu uso no processo espessamento de malhas corrigidas oriundas de digitalização 3D.

#### **4.4 Validação final dos resultados**

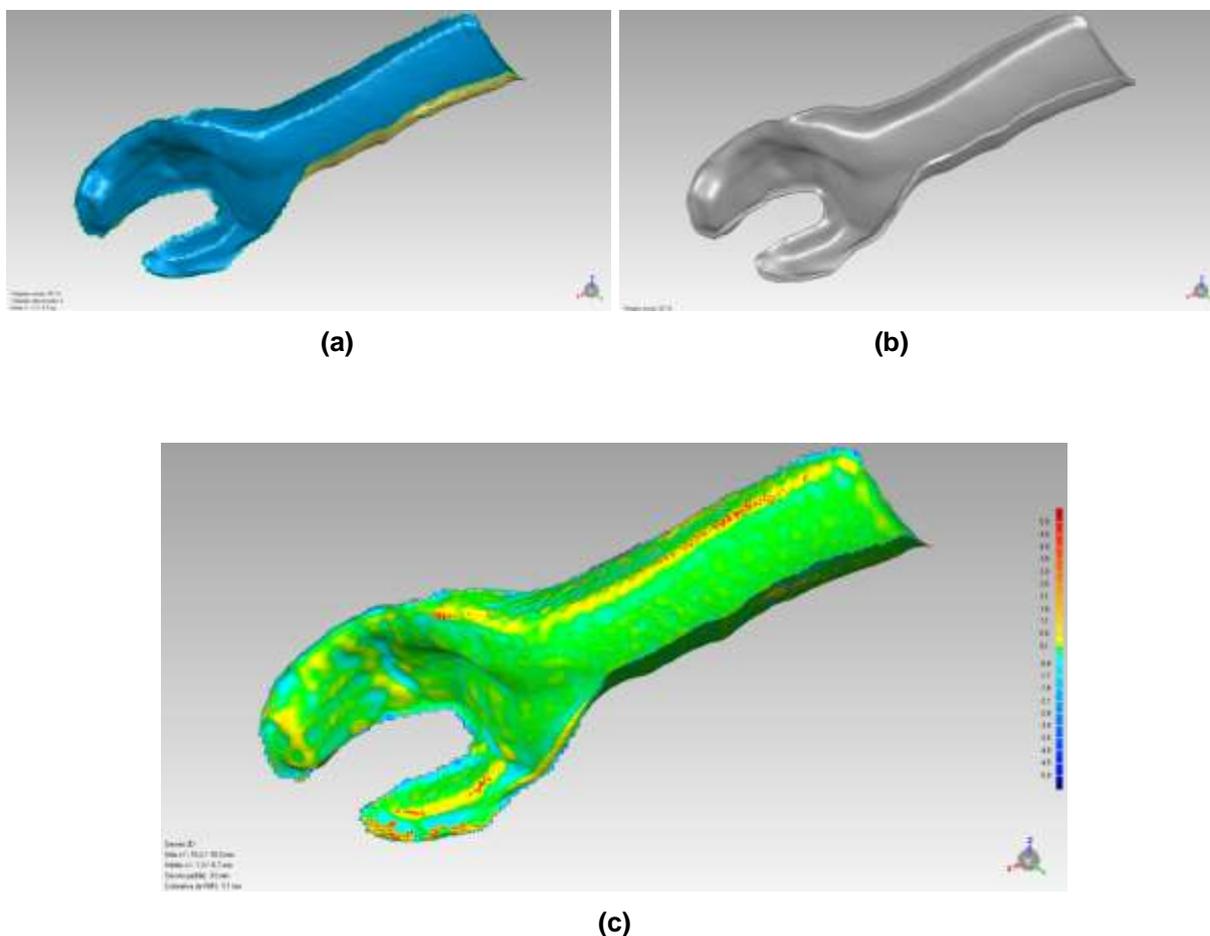
Após a definição dos procedimentos para a correção das malhas, é necessário realizar a validação dos seus resultados.

A validação dos resultados obtidos neste trabalho e, portanto, dos procedimentos propostos se deu em três etapas diferentes: validação pelo Geomagic, validação pelo Meshmixer e, de modo complementar, validação por impressão 3D.

A validação pelo Geomagic é baseada na comparação entre duas superfícies, neste caso, entre a superfície gerada logo após a definição do contorno da malha (etapa 4), sem a influência de nenhum processo corretivo, e a superfície do sólido final após todas as correções. O programa Geomagic realiza essa comparação através de uma sobreposição dessas superfícies, sendo que o arquivo referente a elas deve estar no formato “.stl”. Essa sobreposição mede ponto-a-ponto a distância entre as superfícies, gerando um gradiente de cores representativas das variações de posição, processo este exemplificado pela Figura 47. Observa-se que uma boa prática para as correções de malhas é não alterar a posição da malha durante as etapas de correção, nem por aplicação de movimentos de translação, nem por aplicação de movimentos de rotação.

No momento da importação dos arquivos STL referentes às superfícies a serem comparadas, o Geomagic mantém a posição original das malhas nos programas de correção. Assim sendo, uma vez que não se altera a posição das malhas durante as etapas de correção, quando importados pelo Geomagic, os arquivos estarão exatamente na mesma posição, não sendo necessária nenhuma intervenção manual do usuário para posicioná-las. Este é o melhor cenário possível, que apresentará os resultados de comparação mais confiáveis. Caso a posição da malha seja alterada durante as etapas de correção, será necessário fazer o seu reposicionamento no momento da correção. O Geomagic oferece a ferramenta “Best

fit” que tenta sobrepor as superfícies da melhor maneira possível, mas mesmo assim os resultados finais não terão a mesma precisão.



**Figura 47 - Exemplo da comparação entre as malhas pelo programa Geomagic. (a) Malha sem correção. (b) Malha corrigida e espessada. (c) Resultado comparativo entre as malhas.**

Comparadas as malhas originais com o sólido final, pôde-se observar que os procedimentos de correção pelo Meshmixer apresentam melhores resultados referentes à fidelidade à forma original da malha (Figuras 52 e 53). Mesmo não sendo possível obter uma relação direta entre valores de escala de suavização geral das superfícies entre o Meshmixer e o 3Ds Max, fato este que poderia alterar os resultados e desqualificar esta afirmação, os gradientes de cores obtidos mostram que o efeito das ferramentas de correção aplicadas anteriormente a suavização geral da superfície, é menos impactante no Meshmixer. Esta afirmação pode ser

comprovada comparando-se as Figuras 52 e 53, onde as duas áreas de tonalidade avermelhada na região da mão no resultado da correção pelo 3Ds Max (Figura 53) mostram uma maior variação na posição em relação às mesmas áreas no resultado obtido pela correção pelo Meshmixer (Figura 52).

Analisando isoladamente os resultados obtidos pelo Meshmixer e pelo 3Ds Max, pôde-se observar que os dois procedimentos de aquisição da superfície permitiram uma boa manutenção da fidelidade à anatomia real obtida por digitalização. Isso pode ser comprovado analisando os valores de variação da posição nas regiões da palma da mão e da parte inferior do antebraço, regiões estas que são as de maior importância quanto à forma.

As Figuras 48 a 53 apresentam um comparativo entre os resultados da validação pelo Geomagic das correções de 3 malhas pelo Meshmixer e pelo 3Ds Max.

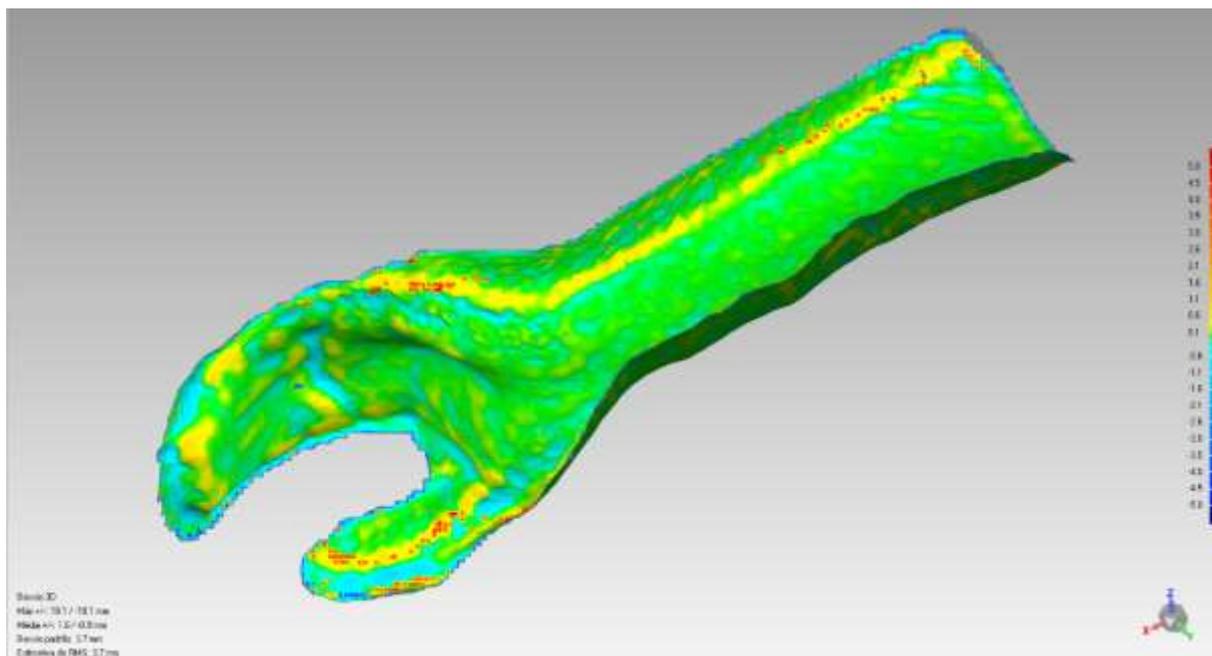


Figura 48 - Resultado da comparação pelo Geomagic entre a malhas original e o resultado final referentes à malha A1 corrigida pelo programa Meshmixer.

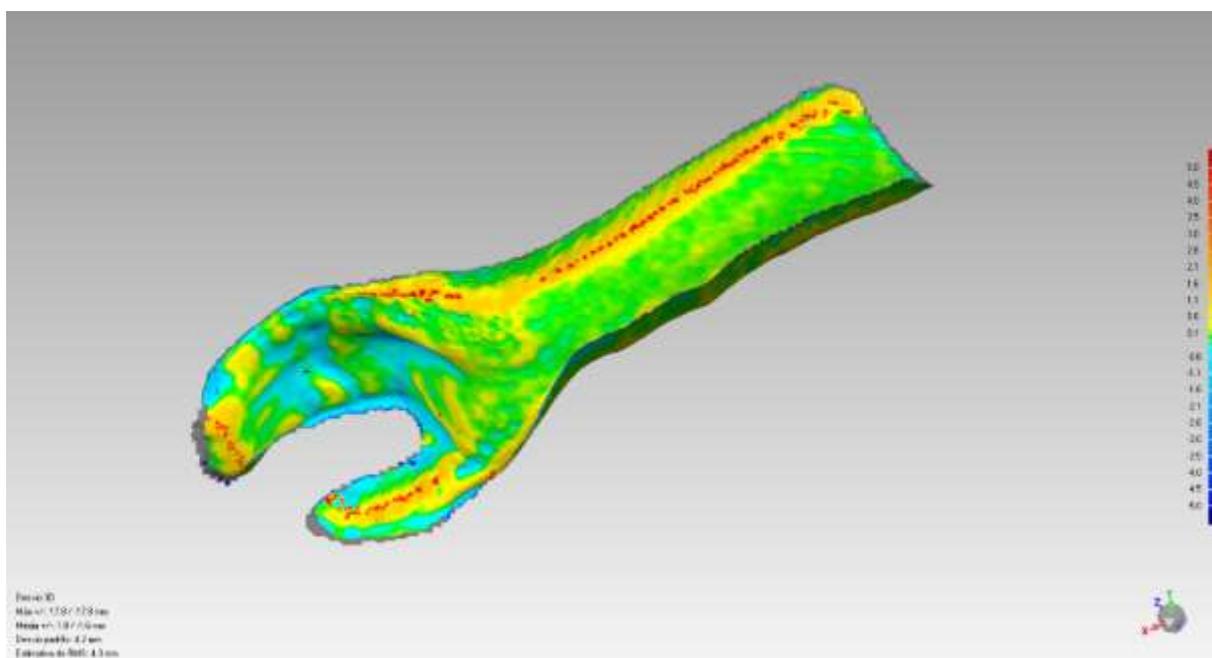
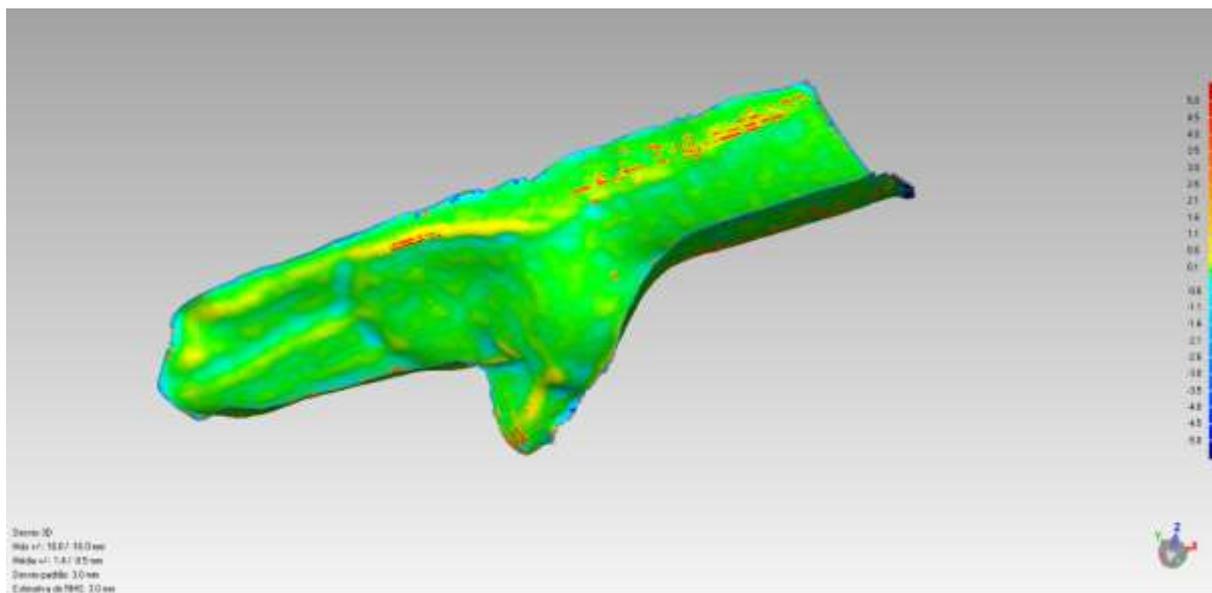
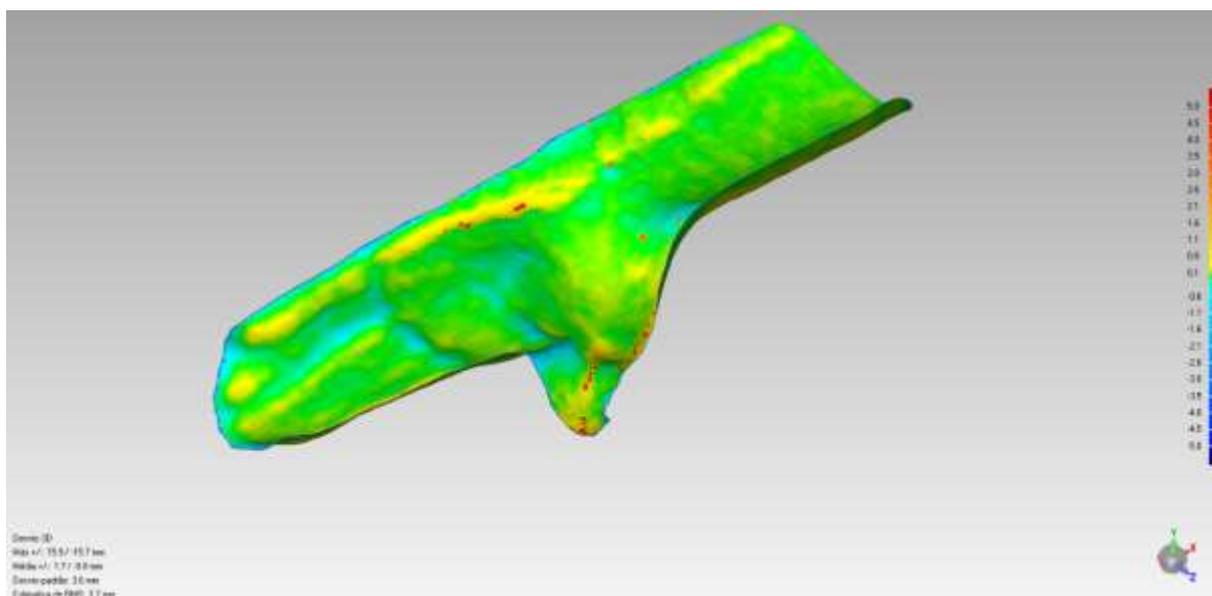


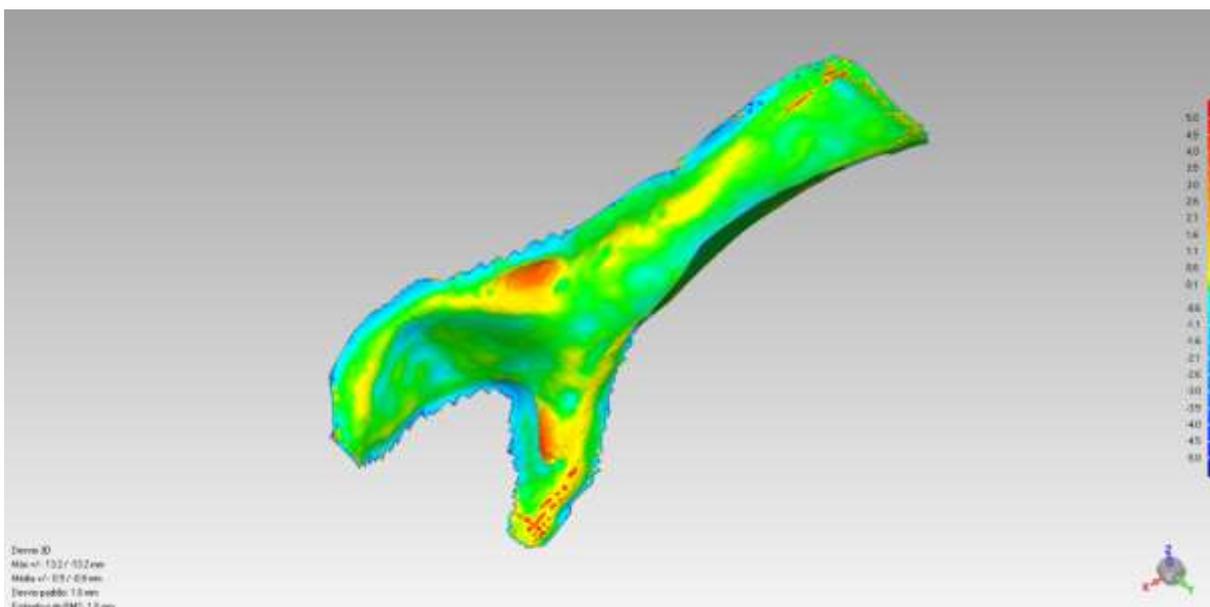
Figura 49 - Resultado da comparação pelo Geomagic entre a malha original e o resultado final referentes à malha A1 corrigida pelo programa 3Ds Max.



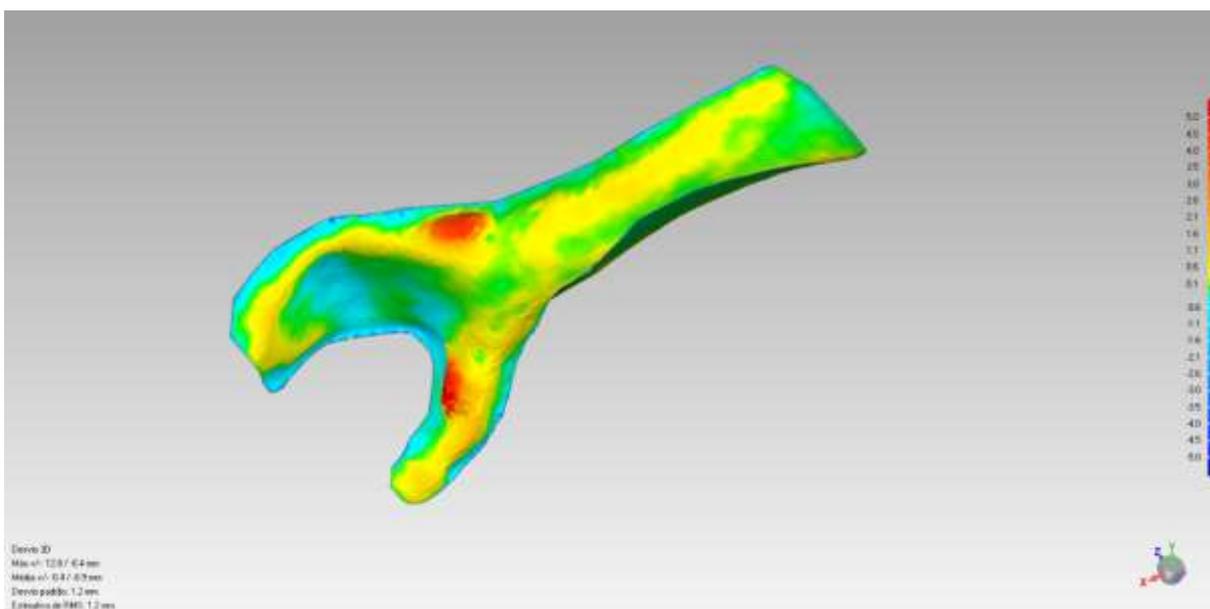
**Figura 50 - Resultado da comparação pelo Geomagic entre a malhas original e o resultado final referentes à malha B1 corrigida pelo programa Meshmixer.**



**Figura 51 - Resultado da comparação pelo Geomagic entre a malha original e o resultado final referentes à malha B1 corrigida pelo programa 3Ds Max.**



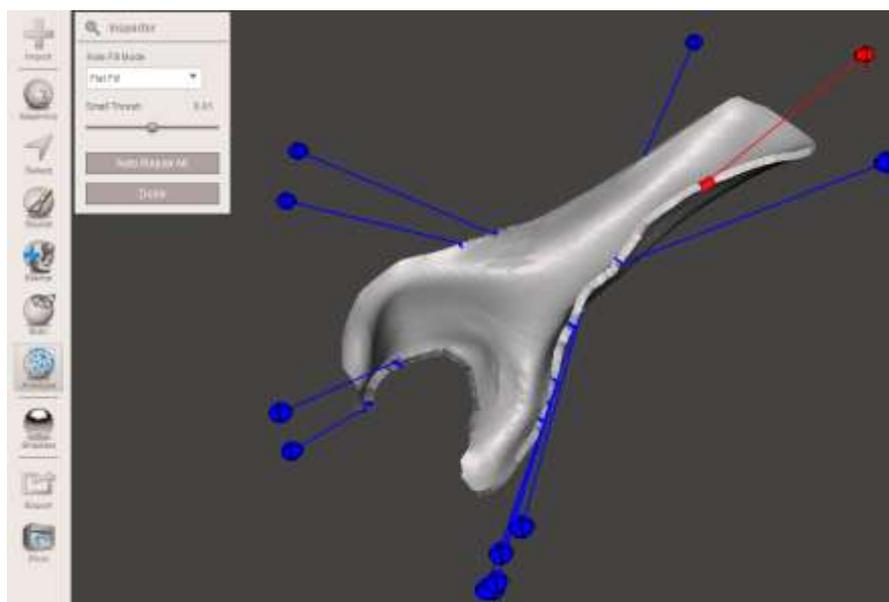
**Figura 52 - Resultado da comparação pelo Geomagic entre a malhas original e o resultado final referentes à malha C1 corrigida pelo programa Meshmixer.**



**Figura 53 - Resultado da comparação pelo Geomagic entre a malha original e o resultado final referentes à malha C1 corrigida pelo programa 3Ds Max.**

A validação, pelo Meshmixer, do sólido final como sendo aceitável aos processos de Manufatura Aditiva, permite afirmar que o procedimento de correção pelo 3Ds Max só é viável até a etapa anterior à extrusão da superfície. A validação através da ferramenta “*Analysis > Inspector*” varre o sólido na busca de defeitos como lacunas, espaçamentos e auto-interseções. Após o término das correções pelo

Meshmixer, a inspeção não encontrou problemas nos sólidos finais, já nas correções pelo 3Ds Max, devido aos resultados de espessamento das bordas já discutidos anteriormente, diversos problemas foram encontrados, desqualificando estes sólidos como aceitáveis aos processos de manufatura aditiva. A Figura 54 exemplifica o processo de inspeção de um espessamento proveniente da metodologia de correção pelo 3Ds Max, onde cada esfera azul e vermelha representa um problema de superfície.



**Figura 54 - Exemplo de validação do sólido final pela ferramenta de inspeção do programa Meshmixer.**

Por fim, com o intuito de validar o processo de correção pelo Meshmixer, foi escolhido aleatoriamente o resultado da correção de uma das malhas para ser confeccionado por impressão 3D na impressora 3D Cloner disponível no laboratório do NUFER. A correta confecção da órtese pelo processo de Manufatura Aditiva é uma forma de validar todas as etapas propostas para a correção da malha, mostrando o procedimento adotado foi eficaz na correção das malhas provenientes de digitalização 3D.

A confecção da órtese por Manufatura Aditiva foi feita com apenas 1 das malhas devido a questões práticas, tais como a disponibilidade da impressora 3D que é compartilhada com todos usuários de Manufatura Aditiva da Universidade e a disponibilidade de matéria prima. A Figura 55 mostra a órtese impressa.



**Figura 55 - Órtese impressa**

## 5 CONCLUSÕES

Analisando os resultados obtidos durante a realização deste trabalho, pode-se concluir que:

- A caracterização da situação problema evidenciou as dificuldades encontradas na obtenção de órteses pela parte da população que vivencia situações de carência social associadas a baixa renda familiar. Os processos burocráticos e a não customização das órteses pelo Sistema Único de Saúde (SUS) dificulta o/ou retarda o tratamento destes pacientes. Já a aquisição de órteses de forma particular em clínicas especializadas é dificultada devido aos altos custos envolvidos. Estes fatos evidenciam a necessidade de um processo que permita a obtenção de órteses customizadas às necessidades de cada paciente em um espaço de tempo reduzido e com baixos custos.
- As pesquisas realizadas para o embasamento teórico à situação problema evidencia a oportunidade de desenvolvimento deste trabalho pela deficiência de literatura específica para correção manual de malhas 3D digitalizadas.
- As técnicas de digitalização empregadas são satisfatórias aos procedimentos de correção propostos somente como um primeiro “*approach*”, apresentando boa fidelidade à anatomia real representada pelos moldes de gesso. No entanto, fica claro a necessidade de um estudo mais aprofundado que avalie os efeitos das diferenças entre as malhas e os moldes reais.
- Os resultados obtidos pelos procedimentos de correção permitem afirmar que o programa Meshmixer é o mais adequado na correção das malhas, podendo ser empregado do começo ao fim do processo de correção, enquanto o programa 3Ds Max não é indicado para as etapas de suavização das bordas e espessamento da malha.
- Por fim, pode-se concluir que o objetivo geral do trabalho foi atingido, gerando como produto final a proposição de procedimentos para a correção manual de malhas 3D digitalizadas a partir de membros superiores visando a fabricação por Manufatura Aditiva.

## 6 REFERÊNCIAS

3Ds MAX, AUTODESK. Disponível em: <http://www.autodesk.com/products/3ds-max/overview>. Acesso em: janeiro de 2016.

AGNELLI, L.B.; TOYODA, C.Y. **Estudo de materiais para confecção de órteses e sua utilização prática por terapeutas ocupacionais no Brasil**. Cadernos de Terapia Ocupacional da UFSCar, Jul./Dez., 11 (2), p. 83-94, 2003.

ALVES, Ana Cristina de Jesus. **Percepção de Alunos com Paralisia Cerebral sobre o uso de recursos de tecnologia assistiva na escola regular**. *Rev. Bras, Ed Esp.*, Marília, Vol. 17, N. 2, p. 287-304, Maio- Ago. 2011.

ALVES, R. **Técnicas de CAD**. Apostila Departamento de Expressão gráfica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 58 f., 2002.

ATTENE, M.; CAMPEN, M.; KOBELT, L. **Polygon Mesh Repairing: An Application Perspective**. RWTH Aachen University. Aachen. Computing Surveys Vol. 45, N. 2, 2013.

BISCHOFF, S.; KOBELT, L. **Structure Preserving CAD Model Repair**. Computer Graphics Group, RWTH Aachen. EUROGRAPHICS Vol. 24, N. 3, 2005.

BLENDER. Disponível em: <https://www.blender.org/manual/contents.html>  
Acesso em: janeiro de 2016

BOTSCH, M.; KOBELT, L. **A robust procedure to eliminate degenerate faces from triangle meshes**. RWTH Aachen. In Vision, Modeling and Visualization, p. 283-290, 2006.

BRASIL, 2010. **Grupo de Trabalho sobre Órteses e Próteses Relatório Final**. Disponível em:  
[http://conselho.saude.gov.br/ultimas\\_noticias/2011/relatorio/GT\\_orteseprtese.pdf](http://conselho.saude.gov.br/ultimas_noticias/2011/relatorio/GT_orteseprtese.pdf).  
Acesso em: janeiro de 2015.

BAUER, S.; BERKELS, J.; HORNEGGER, J.; RUMPF, M. **Joint of Image Denoising and Registration with a CT Surface in Radiation Therapy**. Proc of the Conference on Scale Space and Variational Methods, p. 98-109, 2011.

CATIA. Disponível em: <http://www.3ds.com/productsservices/catia>. Acesso em: janeiro de 2016.

CMU. Disponível em:  
<https://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/15294-s15/lectures/stl/>.  
Acesso em dezembro de 2015.

FILHO, G. T. **Favorecendo Práticas Pedagógicas Inclusivas por Meio da Tecnologia Assistiva**. In: NUNES, L. R. O. P.; PELOSI, M. B.; WALTER, C. C. F. (orgs.). Compartilhando experiências: ampliando a comunicação alternativa. Marília: ABPEE, p. 71-82, 2011.

FREITAS, G. **Metodologia e Aplicabilidade de Digitalização 3D a Laser no Desenvolvimento de Moldes para Calçados e Componentes**. PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies, Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. Editora Springer Science and Business Media, p. 341-342, 2009.

JU, T. J. **Geometric Errors on Polygonal Models: A Survey**. Washington University, St. Louis, 2009.

LIMA, R et al. **Os Avanços da Tecnologia Assistiva para Pessoas com Paralisia Cerebral do Brasil: Revisão de Literatura**. Revista da Universidade Vale do Rio Verde, Três Corações, Vol. 12, N. 2, p. 841-851, 2014.

MÄKELÄ, I.; DOLENC, A. **Some efficient procedures for correcting triangulated models**. In Proc. Solid Free form Fabrication Symposium, Austin, Texas, USA, 1993.

MESHMIXER, AUTODESK. Disponível em: <http://www.123dapp.com/meshmixer>. Acesso em: dezembro de 2015.

MOLDES PLÁSTICOS. Disponível em:  
<http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/prototipagem.asp>. Acesso em: dezembro de 2016.

OLIVEIRA, A. I. A; GAROTTI, M. F.; SÁ, N. M. C. M. **Tecnologia de Ensino e Tecnologia Assistiva no Ensino de Crianças com Paralisia Cerebral**. Revista Ciências & Cognição. Vol. 13, 2008.

OLIVEIRA, Maria Cristina F. de. **Modelos de Objetos por Malhas Poligonais**. Disponível em:  
<http://wiki.icmc.usp.br/images/archive/b/b4/20111010153931!MalhasPoligonais.pdf>  
Acesso em: dezembro de 2015.

Organização Mundial da Saúde (OMS). **Relatório mundial sobre a deficiência / World Health Organization, The World Bank**; tradução Lexicus Serviços Lingüísticos. - São Paulo, 2011.

PERNOT, Jean-Philippe; MORARU, George; VERON, Philippe. **Filling holes in meshes using a mechanical model to simulate the curvature variation minimization**. CER ENSAM, Aix-en-Provence, France, 2006.

PHILIPS, Betsy. **Predictors of Assistive Technology Abandonment**. Revista Assistive Technology. Vol 5.1, 1993.

POSTOLSKI, Michal. **Discrete Topology and Geometry Algorithms for Quantitative Human Airway Trees Analysis Based on Computed Tomography Images**. Paris-Est University, France, 2013.

PTC. Disponível em <http://creo.ptc.com>. Acesso em: janeiro de 2016.

REMONDINO, Fabio. **From Point Cloud to Surface: The Modeling and Visualization Problem**. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, 2003.

SEGUNDO, Mauricio P.; SILVA, Luciano; BELLON, Olga R. P. **Towards Image Acquisition and Preprocessing for Real-Time 3D Face Recognition**. Proc. of the XXIV Conference on Graphics, Patterns and Images, 2011.

SOLIDWORKS. Disponível em: <http://www.solidworks.com/>. Acesso em: janeiro de 2016.

TOYOFUKO, M. H.; TOYODA, C. Y. **Órteses: estudo dos materiais utilizados em sua confecção por terapeutas ocupacionais paulistas.** Projeto de Pesquisa, UFSCar. São Carlos, 2000.

TROMBLY CA. **Terapia ocupacional para disfunções físicas.** 5ª ed. São Paulo. Santos Livraria Editora, 2005.

VRUBEL, A. BELLON, Olga R. P., SILVA, Luciano. **A 3D reconstruction pipeline for digital preservation.** Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, p. 2687-2694, 2009.