



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

GUILHERME SOMBRA VASCONCELOS

UM ESTUDO COMPARATIVO SOBRE TÉCNICAS DE *REMESHING*

RUSSAS

2020

GUILHERME SOMBRA VASCONCELOS

UM ESTUDO COMPARATIVO SOBRE TÉCNICAS DE *REMESHING*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Ciência da Computação do Campus de Russas da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Ms. Daniel Márcio Batista de Siqueira

RUSSAS

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- V45e Vasconcelos, Guilherme Sombra.
Um estudo comparativo sobre técnicas de remeshing / Guilherme Sombra Vasconcelos. – 2020.
64 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,
Curso de Ciência da Computação, Russas, 2020.
Orientação: Prof. Me. Daniel Márcio Batista de Siqueira.
1. Malha poligonal. 2. Processamento de malha poligonal. 3. Técnicas de remeshing. 4. Estudo
Comparativo. 5. Remeshing. I. Título.

CDD 005

GUILHERME SOMBRA VASCONCELOS

UM ESTUDO COMPARATIVO SOBRE TÉCNICAS DE *REMESHING*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Ciência da Computação do Campus de Russas da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Ciência da Computação.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ms. Daniel Márcio Batista de
Siqueira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Markos Oliveira Freitas
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Rafael Fernandes Ivo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha família, por acreditar e investir em mim.
Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram a esperança para seguir em frente. Pai, sua presença significou a certeza de que não estou sozinho nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Ms. Daniel Márcio Batista de Siqueira por me ajudar e orientar no desenvolvimento desta monografia.

Ao Prof. Dr. Markos Oliveira Freitas e ao Prof. Dr. Rafael Fernandes Ivo por me recomendarem o uso da ferramenta Meshlab no desenvolvimento deste trabalho.

A Profa. Dra. Anna Beatriz dos Santos Marques por me recomendar o uso do Google Acadêmico, Mendeley e outras ferramentas para o levantamento bibliográfico deste trabalho.

Ao meu colega de graduação e amigo, Isaías Ferreira pelo primeiro incentivo para o uso do *Latex* e por me apresentar a plataforma *Overleaf*.

Ao Doutorando em Engenharia Elétrica, Ednardo Moreira Rodrigues, e seu assistente, Alan Batista de Oliveira, aluno de graduação em Engenharia Elétrica, pela adequação do *template* utilizado neste trabalho para que o mesmo ficasse de acordo com as normas da biblioteca da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Aos meus pais, irmãos e amigos, por todo o suporte e compreensão que me foi dado durante todos os momentos mais difíceis dessa empreitada.

A minha namorada Rebeca Maia, sem o seu apoio e companheirismo esse Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) não seria possível. Obrigado, meu amor, por ser tão atenciosa e me ajudar tanto durante toda essa fase da minha vida.

Agradeço a todos os professores por me proporcionar o conhecimento racional, a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional.

“Lembre-se: seu foco determina a sua realidade.”

(Qui-Gon Jim)

RESUMO

A Computação Gráfica está cada vez mais presente em nossas vidas, desde filmes, jogos, engenharia, e até na medicina. Assim como a computação gráfica, a geração e utilização de modelos tridimensionais também está cada vez mais sendo usada em diversos setores da indústria. Contudo, por várias razões, nem sempre os modelos estão adequados para o uso em certas aplicações, e assim, precisam sofrer algum tipo de processamento. Para esse fim, existem inúmeros algoritmos e técnicas que aplicam diversos tipos de processamento de malha sobre esses modelos, cada um com suas particularidades. Entender bem essas particularidades é de grande importância, pois influenciam diretamente na escolha da técnica mais adequada para cada aplicação. Este trabalho tem como objetivo principal realizar um estudo comparativo do desempenho de alguns desses algoritmos de *remeshing* do estado da arte, em relação à qualidade da malha obtida. Cada técnica tem suas particularidades e, após inúmeros experimentos realizados, este trabalho busca expor, por meio da comparação das malhas resultantes de todos esses algoritmos, os aspectos positivos e negativos de cada um.

Palavras-chave: Malha poligonal. Processamento de malha poligonal. Técnicas de *remeshing*. Estudo comparativo. *Remeshing*.

ABSTRACT

Computer Graphics is increasingly present in our lives, in films, games, engineering, and even medicine. Like computer graphics, the generation and use of three-dimensional models is also increasingly being used in various sectors of the industry. However, for several reasons, the models are not always suitable for use in certain applications, and therefore, they need to undergo some type of processing. To that end, there are numerous algorithms and techniques that apply different types of mesh processing on these models, each with its own particularities. Understanding these particularities well is of great importance, as they directly influence the choice of the most appropriate technique for each application. This work has a main goal to carry out a comparative study of the performance of some of these state-of-the-art remeshing algorithms, in relation to the quality of the mesh obtained. Each technique has its particularities and, after countless experiments carried out, this work seeks to expose, by comparing the resulting meshes from all these algorithms, the positive and negative aspects of each one.

Keywords: Polygon mesh. Polygon mesh processing. Remeshing techniques. Comparative study. Remeshing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo 3D de um golfinho.	16
Figura 2 – Malha Triangular vs Malha Quadrangular.	17
Figura 3 – Isotropia vs Anisotropia.	17
Figura 4 – Distribuição Uniforme (centro) vs Distribuição Adaptativa (direita).	18
Figura 5 – Orientação dos elementos da malha.	18
Figura 6 – Malhas: Irregular (esquerda), Semirregular (centro), e Regular (direita).	19
Figura 7 – Diagrama de Voronoi 2D de um conjunto de pontos (esquerda), Triangulação de Delaunay 2D de um conjunto de pontos (centro), superimposição de ambos (direito).	20
Figura 8 – <i>Remeshing</i> por refinação e filtragem Delaunay. A entrada (esquerda) é uma malha de superfície triangular irregular. A saída (direita) é uma malha de superfície triangular isotrópica.	24
Figura 9 – <i>Remeshing</i> isotrópico com base no relaxamento Lloyd usando parametrizações sobrepostas.	24
Figura 10 – <i>Remeshing</i> isotrópico. Malha de entrada (esquerda), malha de saída uniforme (centro) e malha de saída adaptativa (direita).	25
Figura 11 – <i>Remeshing</i> adaptativo.	25
Figura 12 – Modelos selecionados (Patch, Screwdriver, Iphegenie e Egea, da esquerda para direita).	28
Figura 13 – Complexidade da malha (Patch)	31
Figura 14 – Qualidade da malha (Patch)	32
Figura 15 – Malha original (esquerda). Qualidade da malha (direita).	32
Figura 16 – Qualidade da malha do Experimento 1 (Patch - Greedy)	33
Figura 17 – Resultado do Experimento 1 (Greedy). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).	33
Figura 18 – Qualidade da malha do Experimento 2 (Patch - Variational)	34
Figura 19 – Resultado do Experimento 2 (Variational). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).	34
Figura 20 – Qualidade da malha do Experimento 3 (Patch - Uniform)	35
Figura 21 – Resultado do Experimento 3 (Uniform). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).	35

Figura 22 – Qualidade da malha do Experimento 3 (Patch - Adaptative)	36
Figura 23 – Resultado do Experimento 4 (Adaptative). Malha processada (esquerda). qualidade da malha (direita).	36
Figura 24 – Qualidade da malha do Experimento 5 (Patch - Pyremesh)	37
Figura 25 – Resultado do Experimento 5 (Pyremesh). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).	37
Figura 26 – Complexidade da malha (Screwdriver)	38
Figura 27 – Qualidade da malha original (Screwdriver - Input)	39
Figura 28 – Malha original (esquerda). Qualidade da malha (direita).	39
Figura 29 – Qualidade da malha do Experimento 6 (Screwdriver - Greedy)	40
Figura 30 – Resultado do Experimento 6 (Greedy). Malha processada (esquerda). Quali- dade da malha (direita).	40
Figura 31 – Qualidade da malha do Experimento 7 (Screwdriver - Variational)	41
Figura 32 – Resultado do Experimento 7 (Variational). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).	41
Figura 33 – Qualidade da malha do Experimento 8 (Screwdriver - Uniform)	42
Figura 34 – Resultado do Experimento 8 (Uniform). Malha processada (esquerda). Qua- lidade da malha (direita)	42
Figura 35 – Qualidade da malha do Experimento 9 (Screwdriver - Adaptative)	43
Figura 36 – Resultado do Experimento 9 (Adaptative). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).	43
Figura 37 – Qualidade da malha do Experimento 10 (Screwdriver - Pyremesh)	44
Figura 38 – Resultado do Experimento 10 (Pyremesh). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita)	44
Figura 39 – Complexidade da malha (Iphigenie)	45
Figura 40 – Qualidade da malha original (Iphigenie - Input)	46
Figura 41 – Malha original (esquerda). Qualidade da malha (direita).	46
Figura 42 – Qualidade da malha do Experimento 11 (Iphigenie - Greedy)	47
Figura 43 – Resultado do Experimento 11 (Greedy). Malha processada (esquerda). Qua- lidade da malha (direita).	47
Figura 44 – Qualidade da malha do Experimento 12 (Iphigenie - Variational)	48

Figura 45 – Resultado do Experimento 12 (Variational). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).	48
Figura 46 – Qualidade da malha do Experimento 13 (Iphigenie - Uniform)	49
Figura 47 – Resultado do Experimento 13 (Uniform). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).	49
Figura 48 – Qualidade da malha do Experimento 14 (Iphigenie - Adaptive)	50
Figura 49 – Resultado do Experimento 14 (Adaptive). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).	50
Figura 50 – Qualidade da malha do Experimento 15 (Iphigenie - Pyremesh)	51
Figura 51 – Resultado do Experimento 15 (Pyremesh). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).	51
Figura 52 – Complexidade da malha (Egea)	52
Figura 53 – Qualidade da malha original (Egea - Input)	53
Figura 54 – Malha original (esquerda). Qualidade da malha (direita).	53
Figura 55 – Qualidade da malha do Experimento 16 (Egea - Greedy)	54
Figura 56 – Resultado do Experimento 16 (Greedy). Malha processada (esquerda). Qua- lidade da malha (direita).	54
Figura 57 – Qualidade da malha do Experimento 17 (Egea - Variational)	55
Figura 58 – Resultado do Experimento 17 (Variational). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).	55
Figura 59 – Qualidade da malha do Experimento 18 (Egea - Uniform)	56
Figura 60 – Resultado do Experimento 18 (Uniform). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).	56
Figura 61 – Qualidade da malha do Experimento 19 (Egea - Adaptive)	57
Figura 62 – Resultado do Experimento 19 (Adaptive). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).	57
Figura 63 – Qualidade da malha do Experimento 20 (Egea - Pyremesh)	58
Figura 64 – Resultado do Experimento 20 (Pyremesh). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos 3D selecionados	27
Tabela 2 – Comparação das técnicas de <i>remeshing</i>	30
Tabela 3 – Comparação das técnicas de <i>remeshing</i> (Patch)	31
Tabela 4 – Comparação das técnicas de <i>remeshing</i> (Screwdriver)	38
Tabela 5 – Comparação das técnicas de <i>remeshing</i> (Iphigenie)	45
Tabela 6 – Comparação das técnicas de <i>remeshing</i> (Egea)	52
Tabela 7 – Comparação das Técnicas	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	bidimensional
3D	tridimensional
CDT	<i>Constrained Delaunay Triangulation</i>
CG	Computação Gráfica
CVT	<i>Centroidal Voronoi Optimization</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Malha Poligonal	16
2.1.1	<i>Estrutura Local</i>	16
2.1.2	<i>Estrutura Global</i>	17
2.2	Diagramas de Voronoi e Triangulações de Delaunay	19
2.3	Remeshing	19
2.4	Correspondências	21
3	OBJETIVOS	22
3.1	Objetivo geral	22
3.2	Objetivos específicos	22
4	TRABALHOS RELACIONADOS	23
5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	26
5.1	Levantamento das técnicas	26
5.2	Preparação do ambiente de teste	26
5.3	Preparação da lista de modelos 3D	27
5.4	Validação	28
6	RESULTADOS	30
6.1	Resultados dos Experimentos 1-5 (Patch)	31
6.2	Resultados dos Experimentos 6-10 (Screwdriver)	38
6.3	Resultados dos Experimentos 11-15 (Iphigenie)	45
6.4	Resultados dos Experimentos 16-20 (Egea)	52
6.5	Discussão dos Resultados	59
7	CONCLUSÕES	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Em Computação Gráfica (CG), modelos tridimensionais (3Ds) são usualmente constituídos por malhas poligonais. Tais malhas são tipicamente formadas por um conjunto de triângulos compartilhando suas arestas e vértices para compor um modelo tridimensional (BOTSCH *et al.*, 2010). Normalmente, tais modelos são construídos por artistas utilizando ferramentas de modelagem digital, ou então são extraídos utilizando-se técnicas como o escaneamento 3D, por exemplo. No caso da modelagem tridimensional, quanto maior o nível de detalhes que se deseja, maior o trabalho que o modelador terá em produzir o modelo.

Com a evolução do poder de processamento e memória dos computadores, vem-se permitindo e incentivando o desenho de modelos cada vez mais detalhados. Dessa forma, modelos antigos vão ficando visualmente datados e obsoletos em comparação com os atuais, tendendo a se perder com o tempo.

Ainda assim, não é incomum ser necessário a reutilização desses modelos antigos de baixa qualidade em diversas aplicações, a fim de evitar o retrabalho de modelagem de novos modelos, pois pode demandar muito tempo. Uma possível solução é utilizar-se de técnicas de melhoramento de malha, como os algoritmos de *remeshing* em Boissonnat e Oudot (2005), Alliez *et al.* (2003) e Botsch e Kobbelt (2004), sendo esses algoritmos tanto úteis no melhoramento de malhas de modelos antigos como também na otimização da malha de modelos recentes. Cada algoritmo tem suas particularidades e podem ter tanto resultados positivos quanto negativos, dependendo do modelo em que é aplicado e uma gama de fatores internos de cada algoritmo.

Portanto, o presente trabalho propõe um estudo comparativo de diferentes tipos de algoritmos de *remeshing* de superfícies, a fim de comparar o desempenho, no que se diz respeito em qualidade de malha, para diferentes modelos.

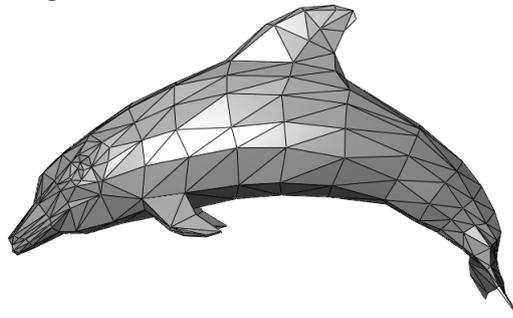
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma descrição breve dos conceitos relacionados à área da pesquisa. A Seção 2.1 discute a definição de malha poligonal, juntamente com os conceitos de estrutura local (Seção 2.1.1) e estrutura global (Seção 2.1.2). A Seção 2.2 define os conceitos de diagramas de Voronoi e triangulações de Delaunay, respectivamente. A Seção 2.3 define o conceito de *remeshing*.

2.1 Malha Poligonal

Uma malha poligonal é uma coleção de vértices, arestas e faces que define a forma de um objeto poliédrico, onde as faces geralmente consistem em triângulos, quadriláteros ou outros polígonos convexos simples, já que isso simplifica a renderização, mas também pode ser composto de polígonos côncavos mais gerais ou polígonos com buracos (TOBLER; MAIERHOFER, 2006). É importante ressaltar que polígonos que compõem a malha não devem se interceptar, com exceção seus vértices e arestas. A Figura 1 mostra um exemplo de de modelo 3D com malha triangular.

Figura 1 – Modelo 3D de um golfinho.



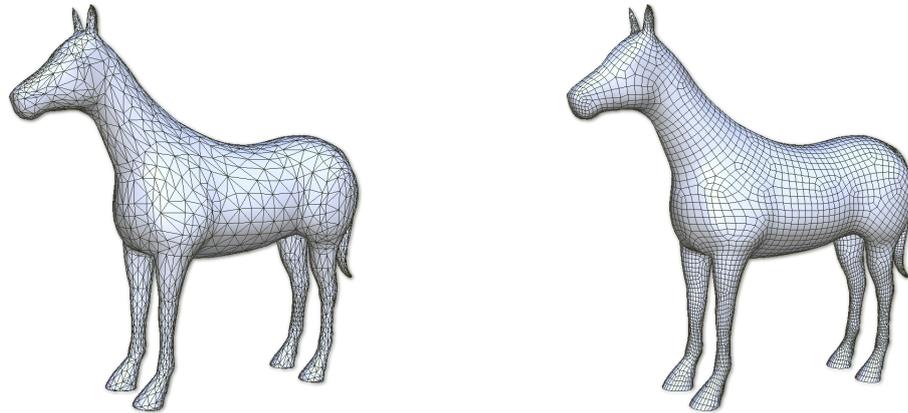
Fonte: Chrschn (2007)

2.1.1 Estrutura Local

A estrutura local de uma malha é descrita pelo tipo, forma, orientação, e distribuição dos elementos da malha. Como já foi dito anteriormente, os tipos de elementos mais comumente usados são triângulos ou quadriláteros, assim como polígonos (Figura 2). Elementos podem ser classificados como sendo isotrópicos ou anisotrópicos. A forma dos elementos isotrópicos é localmente uniforme em todas direções. Em elementos triangulares, é isotrópico se estiver

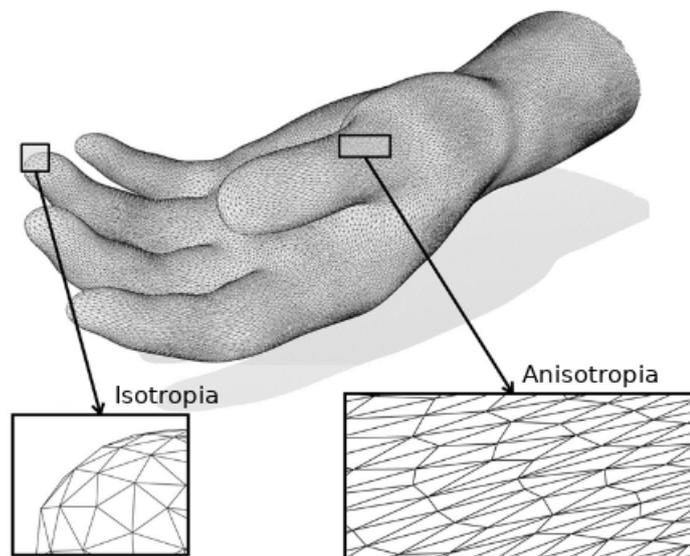
próximo de um equilátero, e no caso de elementos quadrangulares, se estiver próximo de um quadrado. (Figura 3). Em uma distribuição uniforme, os elementos da malha são igualmente espalhados por todo o modelo. Em uma distribuição adaptativa, o número de elementos varia de acordo com a necessidade (Figura 4). A orientação dos elementos influencia como os elementos da malha vão se alinhar na superfície do malha (Figura 5). (BOTSCH *et al.*, 2010).

Figura 2 – Malha Triangular vs Malha Quadrangular.



Fonte: Sternisha (2016)

Figura 3 – Isotropia vs Anisotropia.

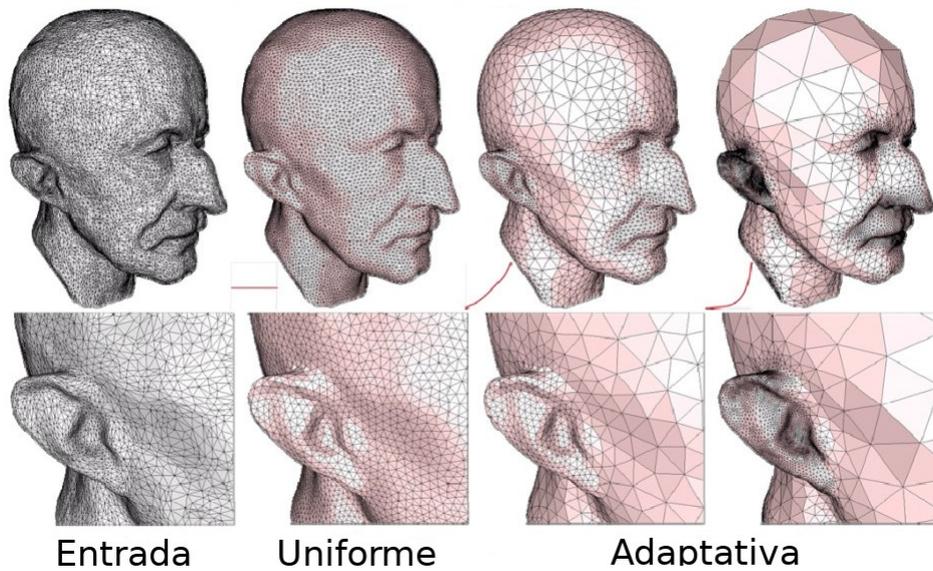


Fonte: Adaptado de Zhong *et al.* (2013)

2.1.2 Estrutura Global

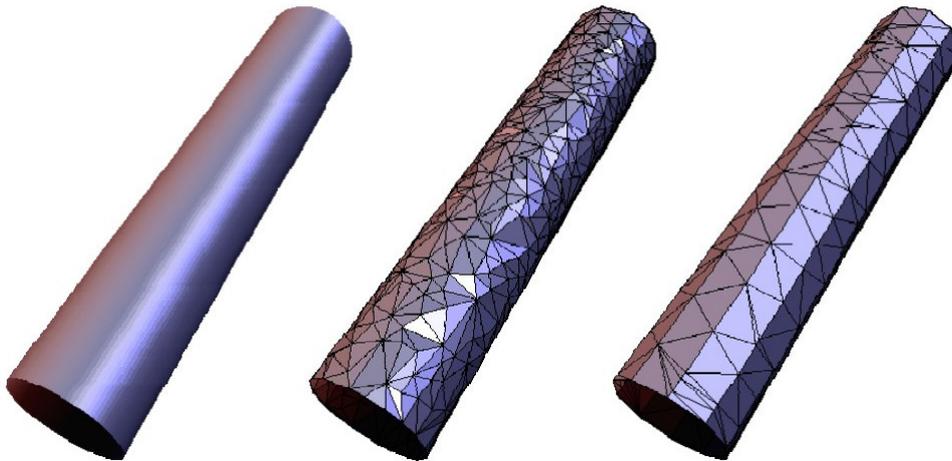
Um vértice em uma malha triangular é chamado regular se sua valência (ou seja, seu número de vértices vizinhos) for 6 para vértices interiores ou 4 para vértices de fronteira. Em

Figura 4 – Distribuição Uniforme (centro) vs Distribuição Adaptativa (direita).



Fonte: Adaptado de Ben-Chen (2012)

Figura 5 – Orientação dos elementos da malha.

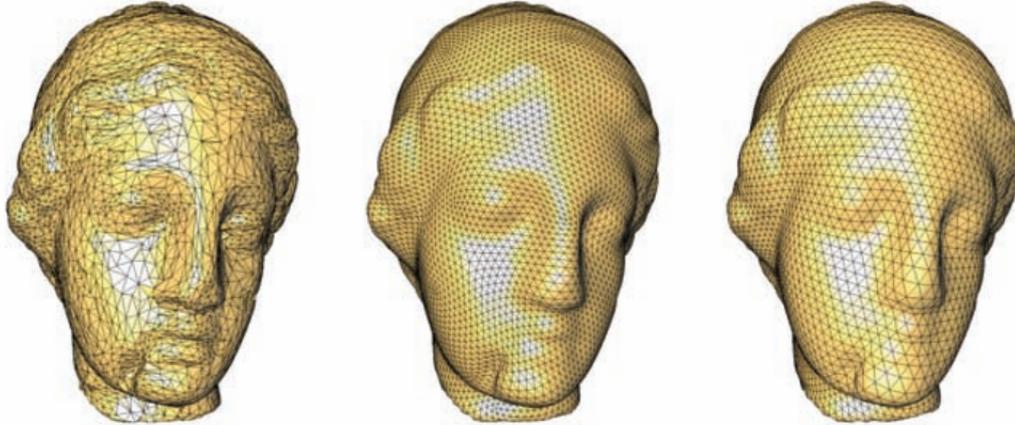


Fonte: Adaptado de Ben-Chen (2012)

malhas quadrangulares, as valências regulares são 4 e 3, respectivamente. Vértices que não são regulares são chamados de irregulares ou extraordinários (BOTSCH *et al.*, 2010). A estrutura global de uma malha pode ser classificada como irregular, semirregular, altamente regular ou regular. Malhas irregulares não exibem nenhum tipo de regularidades em sua conectividade. As malhas semirregulares são produzidas por subdivisão regular de uma malha inicial. Assim, o número de vértices extraordinários em uma malha semirregular é pequena e constante sob um refinamento uniforme. Em malhas altamente regulares, a maioria dos vértices é regular. Em contraste com malhas semirregulares, malhas altamente regulares não precisam ser o resultado de um processo de subdivisão (Figura 6). Em uma malha regular todos os vértices são regulares,

e ela pode ser representada como um vetor bidimensional (2D), que pode ser usado para uma obter uma renderização eficiente (BOTSCH *et al.*, 2010).

Figura 6 – Malhas: Irregular (esquerda), Semirregular (centro), e Regular (direita).



Fonte: Adaptado de Botsch *et al.* (2010).

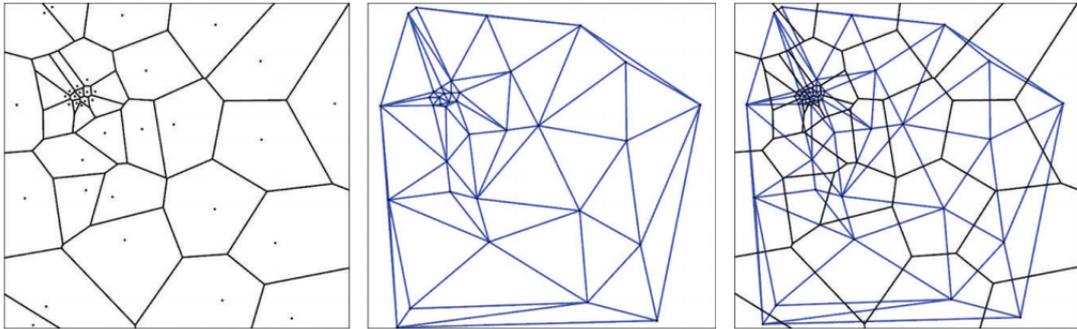
2.2 Diagramas de Voronoi e Triangulações de Delaunay

Diagramas de Voronoi e triangulações de Delaunay são importantes estruturas de dados para *meshing* (geração de malha) e *remeshing* (remodelagem de malha). Um diagrama de Voronoi pode ser descrito com um particionamento de uma plano em regiões com base na distância em relação a pontos em um subconjunto específico do plano, onde esse conjunto de pontos (também chamado de geradores) é especificado antecipadamente, e para cada um desses geradores, existe uma região correspondente composta de todos os pontos mais próximos a aquele gerador do que a qualquer outro. Essas regiões são chamadas de células de Voronoi. O diagrama de Voronoi de um conjunto de pontos é dual a sua triangulação de Delaunay (AURENHAMMER, 1991). Já a triangulação de Delaunay para um dado conjunto \mathbf{P} de pontos em um plano é definida como uma triangulação $DP(\mathbf{P})$ de tal modo que nenhum ponto em \mathbf{P} está dentro do circuncírculo de qualquer triângulo em $DP(\mathbf{P})$ (Figura 7). Triangulações de Delaunay maximizam o ângulo mínimo de todos os ângulos nos triângulos na triangulação (FUKUDA *et al.*, 2004).

2.3 Remeshing

Remeshing é uma técnica muito importante em muitas aplicações que fazem uso de malha de superfície como simulação numérica e modelagem geométrica, visto que essas aplicações frequentemente necessitam que a qualidade da malha seja melhorada, em termos de

Figura 7 – Diagrama de Voronoi 2D de um conjunto de pontos (esquerda), Triangulação de Delaunay 2D de um conjunto de pontos (centro), superimposição de ambos (direito).



Fonte: Adaptado de Botsch *et al.* (2010).

amostragem de vértices, regularidade e qualidade de triângulo. Este processo de melhoria é chamado de *remeshing* (BOTSCH *et al.*, 2010; ALLIEZ *et al.*, 2008).

O processo de *remeshing* possui dois objetivos. O primeiro é reduzir a complexidade da malha de entrada, sujeita a um certo critério de qualidade - processo comumente chamado de simplificação da malha. O segundo objetivo é melhorar a qualidade da malha, de tal forma que possa ser usada como entrada em várias aplicações, onde os requisitos e critérios de qualidade da malha diferem de aplicação para aplicação (BOTSCH *et al.*, 2010).

Uma definição possível para *remeshing* é: "Dada uma malha 3D, calcular outra malha, cujos elementos satisfazem alguns requisitos de qualidade, ao mesmo tempo aproximar a entrada aceitável" (ALLIEZ *et al.*, 2008, pag. 68). Entretanto, na literatura o termo *remeshing* pode possuir outras definições, que variam de acordo com o objetivo e a aplicação.

Como já visto na Seção 2.1.1, malhas isotrópicas são compostas de triângulos bem formados, idealmente triângulos equiláteros. Existem vários algoritmos de *remeshing* para esse tipo de malha, muitos deles apresentados em Alliez *et al.* (2008). Para Botsch *et al.* (2010) esses algoritmos podem ser classificados em três paradigmas de *remeshing*: guloso, variacional ou incremental. Os algoritmos gulosos geralmente realizam uma mudança local por vez, tais como inserção de vértices, até que o objetivo declarado inicialmente seja satisfeito. Algoritmos variacionais funcionam lançando o problema inicial como uma das formas de minimizar uma energia funcional de forma que os baixos níveis desta energia correspondem boas soluções para este problema. Já algoritmos incrementais combinam refinamento e dizimação (redução de polígonos não destrutiva), possivelmente intercalados por um procedimento de relaxamento.

2.4 Correspondências

Todos os algoritmos de *remeshing* calculam pontos de localização na superfície ou próximo da superfície original e a maioria desses algoritmos também realocam iterativamente os vértices da malha a fim de melhorar a qualidade da malha. Portanto, uma questão chave em todos os algoritmos de *remeshing* é calcular ou manter correspondências entre pontos \mathbf{p} na malha gerada e suas contrapartes $\phi(\mathbf{p})$ na malha de entrada. Existem várias abordagens para resolver este problema: a parametrização global, a parametrização local e a projeção. Na parametrização global o modelo de entrada é globalmente parametrizado em um domínio 2D. Na parametrização local o algoritmo mantém a parametrização de uma vizinhança geodésica local ao redor $\phi(\mathbf{p})$. Já na projeção o ponto de amostra é projetado no elemento mais próximo do modelo de entrada (BOTSCH *et al.*, 2010).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Realizar um estudo comparativo de algumas técnicas de *remeshing* no melhoramento da malha de modelos tridimensionais.

3.2 Objetivos específicos

- Gerar uma lista de modelos com níveis de detalhes diferentes que serão usados nos testes dos diversos algoritmos de *remeshing*;
- Investigar métricas e formas para comparar os diversos modelos tridimensionais resultantes das técnicas de *remeshing* implementadas.

4 TRABALHOS RELACIONADOS

O presente trabalho propõe um estudo comparativo das técnicas de *remeshing* baseada em triângulos no melhoramento da malha de modelos tridimensionais. Este capítulo apresenta alguns trabalhos referentes a essas técnicas, descrevendo três algoritmos representativos de cada um dos três paradigmas empregadas em *remeshing* de malhas isotrópicas, propostas em Botsch *et al.* (2010), são eles: *remeshing* guloso, variacional e incremental.

Boissonnat e Oudot (2005) apresentam um algoritmo guloso de geração de malha de superfície (*surface meshing*) que é flexível o suficiente para ser usado como um algoritmo de *remeshing* isotrópico de superfícies suaves. O princípio fundamental por trás desse algoritmo depende de refinar e filtrar uma triangulação de Delaunay 3D. Em cada etapa de refinamento, um ponto obtido na superfície de entrada é inserido na triangulação. A localização do ponto é escolhida entre as intersecções da superfície de entrada S com as arestas de Voronoi da triangulação. Já a etapa de filtragem consiste em atualizar a triangulação de Delaunay restrita a S , como descrito em Botsch *et al.* (2010). A Figura 8 apresenta uma demonstração da técnica.

Alliez *et al.* (2003) propõem um algoritmo variacional de *remeshing* baseado no algoritmo de relaxamento de Lloyd, que gera uma tesselação de Voronoi centroidal. Ele aplica relaxamento no espaço de parâmetros usando uma função de densidade projetada para compensar a distorção da área devido ao achatamento. A Figura 9 apresenta uma demonstração da técnica.

Botsch e Kobbelt (2004) apresentam um algoritmo de *remeshing* incremental que produz malhas triangulares isotrópicas, que é uma versão simplificada de Vorsatz *et al.* (2003), e uma extensão de Kobbelt *et al.* (2000). Ela produz resultados comparáveis aos do algoritmo original, mas tem a vantagem de ser mais simples de implementar e mais robusto. O algoritmo recebe como entrada o comprimento da aresta alvo L e repetidamente divide arestas longas, junta arestas curtas e realoca vértices até que todas as arestas sejam aproximadamente do comprimento recebido como entrada. A Figura 10 apresenta uma demonstração da técnica.

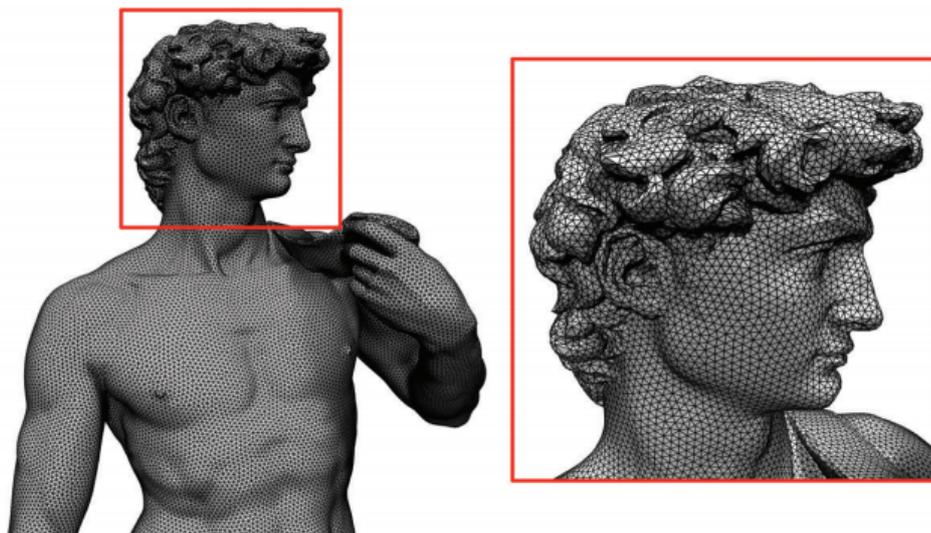
Dunyach *et al.* (2013) apresentam uma simples extensão de uma abordagem de *remeshing* incremental uniforme, como a de Botsch e Kobbelt (2004), que leva a um processo de *remeshing* adaptativo à curvatura eficaz, mas de alta qualidade. A principal contribuição desse trabalho é substituir o comprimento da aresta alvo L por um campo de redimensionamento adaptativo $L(\mathbf{x})$. Assim, nesse algoritmo, a divisão das arestas longas é feita a partir da curvatura máxima e da tolerância de aproximação, calculado da malha de entrada, ou seja, o campo de dimensionamento $L(\mathbf{x})$. A Figura 11 apresenta uma demonstração da técnica.

Figura 8 – *Remeshing* por refinação e filtragem Delaunay. A entrada (esquerda) é uma malha de superfície triangular irregular. A saída (direito) é uma malha de superfície triangular isotrópica.



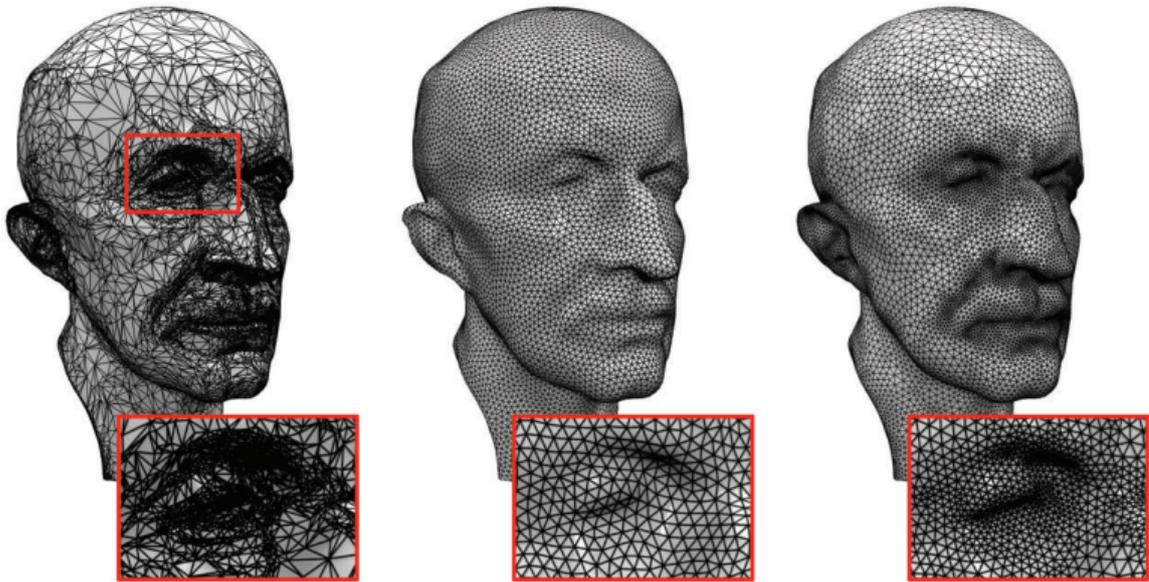
Fonte: Adaptado de Botsch *et al.* (2010).

Figura 9 – *Remeshing* isotrópico com base no relaxamento Lloyd usando parametrizações sobrepostas.



Fonte: Adaptado de Botsch *et al.* (2010).

Figura 10 – *Remeshing* isotrópico. Malha de entrada (esquerda), malha de saída uniforme (centro) e malha de saída adaptativa (direita).



Fonte: Adaptado de Botsch *et al.* (2010).

Figura 11 – *Remeshing* adaptativo.



Fonte: Adaptado de Dunyach *et al.* (2013).

Os trabalhos apresentados acima são técnicas *remeshing* projetadas para o melhoramento da malha de modelos genéricos. Dessa forma, o presente trabalho propõe realizar um estudo comparativo desses e outros algoritmos de *remeshing* em diferentes modelos tridimensionais, a fim de comparar qualidade da malha obtida por esses algoritmos.

5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente trabalho tem como principal objetivo demonstrar o uso de técnicas de *remeshing* para o melhoramento da malha de modelos tridimensionais. A Seção 5.1 mostra como se deu o levantamento das técnicas. A Seção 5.2 mostra como foi feita a preparação do ambiente de teste. A Seção 5.3 mostra como foi feita a preparação da lista de modelos 3D. A Seção 5.4 define a validação.

5.1 Levantamento das técnicas

Inicialmente foi feito o levantamento das diversas técnicas e algoritmos de *remeshing* na literatura. Então, foi feita uma comparação teórica entre essas técnicas a fim de descartar as técnicas que não se enquadraram ao contexto do problema proposto.

Nesta etapa, foi utilizada, para o levantamento bibliográfico das técnicas estudadas, a ferramenta de pesquisa do Google Acadêmico para simplificar o processo de busca dos artigos, e o gerenciador de referencias Mendeley para facilitar o acesso e organização dos artigos e elaboração das referencias.

Uma vez feito o levantamento, foram selecionadas as técnicas presentes na Seção 4, que foram objeto do estudo desse trabalho. O algoritmo guloso *Constrained Delaunay Triangulation* (CDT), que usa refinamento e filtragem da triangulação de Delaunay; o algoritmo variacional *Centroidal Voronoi Optimization* (CVT), que usa tesselações centroide de Voronoi; os algoritmo incrementais de *remeshing* isotrópico uniforme e adaptativo; e o Pyremesh, um algoritmo de *remeshing* baseado nas técnicas incrementais feito em Pymesh.

5.2 Preparação do ambiente de teste

Em seguida, foi feita a preparação do ambiente de testes para os experimentos, onde foram selecionadas todas as ferramentas, *frameworks* e bibliotecas de funções que foram usadas nas realização dos experimentos.

Uma vez que na Seção 5.1 foram levantadas e selecionadas as técnicas de *remeshing* que seriam comparadas neste trabalho, buscou-se ferramentas e *frameworks* onde estas foram implementadas, a fim de servirem de comparação para as nossas implementações. Infelizmente devido a inúmeros contratemplos e problemas técnicos na no processo de implementação e na execução dos algoritmos, não foi possível a implementação da grande maioria destes.

Nessa etapa, foram utilizadas diversas ferramentas do Meshlab (CIGNONI *et al.*, 2008), um *software open-source* de processamento de malha 3D. Com ele, foi possível aplicar algumas das técnicas que foram levantadas, além de proporcionar a visualização e análise meticulosa dos modelos 3D e obter informações importante sobre a geometria de cada modelo, crucial para a comparação das diferentes técnicas comparadas.

Também foi utilizada a implementação das técnicas levantadas de outras ferramentas e *frameworks*. O PMP-Library (SIEGER; BOTSCH, 2020), uma moderna biblioteca C++ *open-source* para processamento e visualização de superfícies de malhas poligonais; o OpenFlipper (MÃ¶BIUS; KOBELT, 2012), uma aplicação multiplataforma e *framework* de programação; o Magic3D (GEOMETRYHUB, 2020), um *software* grátis que fornece funções básicas para processamento de nuvens de pontos 3D e malhas. E finalmente o Pymesh (ZHOU, 2019), uma plataforma Python de prototipagem rápida focada em processamento de geometria.

5.3 Preparação da lista de modelos 3D

Além do ambiente de teste, também foi necessário ter modelos 3D para testar as diferentes técnicas, e para esse fim foi preparada uma lista de modelos para a realização dos experimentos, todos com formatos, características e níveis de detalhes distintos. Foram separados modelos de diferentes conjuntos de modelos da literatura, como o repositório de escaneamentos 3D de Stanford, o conjunto de malhas disponibilizados no site do livro de Botsch *et al.* (2010) e as amostras de malha disponibilizadas no site do Meshlab.

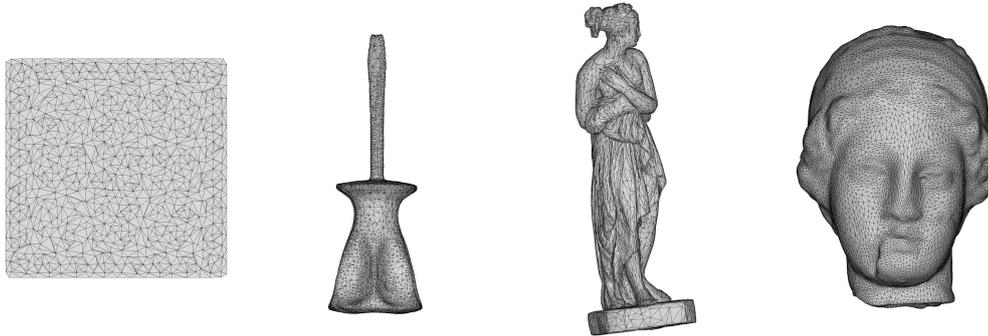
Foram selecionados quatro modelos: Patch, Screwdriver, Iphigenie e Egea (Figura 12). Uma vez selecionados, eles foram analisados usando as ferramentas citadas na Seção 5.2, a fim de conseguir informações sobre esses modelos, o que foi importante para comparar o efeito das diferentes técnicas levantadas na Seção 5.1. Dentre essas informações se encontram a complexidade dos modelos (a quantidade de triângulos que a malha é composta), e a qualidade desses triângulos (o nível de isotropia da malha). Essas informações estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1 – Modelos 3D selecionados

Modelo 3D	Complexidade da malha	Qualidade da malha
Patch	1930	Anisotrópico
Screwdriver	13574	Semi-isotrópico
Iphigenie	10000	Anisotrópico
Egea	29996	Semi-isotrópico

Fonte: Autoria própria.

Figura 12 – Modelos selecionados (Patch, Screwdriver, Iphegenie e Egea, da esquerda para direita).



Fonte: Autoria própria.

5.4 Validação

Nessa etapa, foi feita a implementação de um algoritmo feito em Python baseado nas técnicas incrementais de *remeshing* (Pyremesh). Para isso foi utilizado o pacote Pymesh (ZHOU, 2019), que possui as estruturas de dados necessárias para a representação das malhas, como também inúmeros métodos de processamento de malhas poligonais compilados em C++.

Em seguida, foram feitos os experimentos no ambiente de teste desenvolvido na Seção 5.2, usando os modelos selecionados na Seção 5.3, onde as técnicas serão comparadas de acordo com uma gama de critérios e requisitos de qualidade de malha que também serão definidos nesta etapa.

O principal objetivo desse trabalho é comparar o efeitos das diversas técnicas e algoritmos de *remeshing* em diferentes modelos. Para esse fim foram feitos vários experimentos, o que envolve captar informações importantes sobre a malha dos modelos antes e depois de serem submetidos a essas técnicas de processamento.

Uma vez que as informações dos modelos pré-processamento foram captadas na Seção 5.3, restou apenas captar as informações sobre a qualidade dos modelos depois dos processamentos de malha, o que foi feito durante os experimentos.

O processo experimental foi realizado aplicando cada um das técnicas selecionadas em cada um dos modelos e obter as informações úteis dos modelos resultantes. Foram 20 experimentos ao todo, uma para cada combinação de técnicas e modelos testados. A fim de facilitar esse processo experimental, os experimentos foram feitos em grupos de 5, um grupo para cada modelo. Como nem todas as informações sobre as malhas podem ser facilmente

quantificadas e resumidas a um número, comparar visualmente o resultados dos experimentos de um mesmo modelo foi de suma importância para obter essas informações e visualizar de fato como cada técnica afeta a qualidade da malha de um modelo.

Como a finalidade desse trabalho é comparar diferentes técnicas de *remeshing* comparando a complexidade e a qualidade da malha resultante de cada um deles além da fidelidade ao modelo original, precisou-se definir um conceito de qualidade de malha, que é um conceito muito abrangente e que pode variar bastante de acordo com a aplicação desses modelos. Para esse trabalho, decidiu-se definir, como métrica de qualidade da malha, a isotropia ou equilateralidade (o quão equilátero) de seus triângulos. Essa equilateralidade foi calculada pela razão de seus raios inscritos e circunscritos, baseada na métrica β descrita em Parthasarathy *et al.* (1994), expressada pela seguinte fórmula: $\rho = 2(IR/CR)$, onde IR denota o raio inscrito e CR denota o raio circunscrito. ρ varia de 0 a 1, quanto mais próximo se aproxima de 1, mais equilátero, e conseqüentemente, mais isotrópico é o triângulo.

Na realização dos experimentos, a fim de categorizar a malha resultante de cada técnica em relação a sua qualidade como um todo, estas foram classificadas em: Isotrópico (I), Altamente isotrópico (A.I), Semi-Isotrópico (S) e Anisotrópico (A). Malhas isotrópicas são aquelas que 90% dos elementos possuem qualidade na faixa de 0,8 a 1,0. Já malhas altamente isotrópicas são aquelas que 90% dos elementos possuem qualidade na faixa de 0,6 a 1,0. Por sua vez malhas semi-isotrópicas são aquelas que 90% dos elementos possuem qualidade na faixa de 0,4 a 1,0. E malhas anisotrópicas são aquelas que 90% dos elementos possuem qualidade abaixo da faixa de 0,5 a 1,0. A fim de facilitar visualização das informações sobre a isotropia da malha, usou-se um filtro que mapeia em cores a equilateralidade de cada triângulo da malha.

6 RESULTADOS

Feitos os experimentos, foram obtidos os dados de comparação que foram definidos na Seção 5.4, a complexidade das malha (número de faces/triângulos que compõem a malha), o desvio (o quão a complexidade difere do modelo original), e a qualidade dos triângulos.

A Tabela 2 apresenta os dados gerais de todos os experimentos. Ao longo desse capítulo será detalhado mais a fundo o resultado de cada experimento realizado nas Seções 6.1, 6.2, 6.4 e 6.3, apresentando os dados e imagens obtidos dos resultados de todos os experimentos. Na Seção 6.5 serão discutidos os resultados apresentados neste capítulo.

Tabela 2 – Comparação das técnicas de *remeshing*

Exp	Técnica/ algoritmo	Modelo 3D	Complexidade	Desvio	Qualidade	Implementação
1	Greedy (CDT)	Patch	1930	0	A	Magic3D
2	Variational (CVT)	Patch	1930	0	A.I	Magic3D
3	Incremental(Uniform)	Patch	11620	+9690	I	MeshLab
4	Incremental (Adaptative)	Patch	1198	-732	A.I	OpenFlipper
5	Pyremesh	Patch	21286	+19356	A.I	Pymesh
6	Greedy (CDT)	Screwdriver	13574	0	A	Magic3D
7	Variational (CVT)	Screwdriver	13574	0	A.I	Magic3D
8	Incremental(Uniform)	Screwdriver	11486	-2088	I	MeshLab
9	Incremental (Adaptative)	Screwdriver	12618	-956	A.I	OpenFlipper
10	Pyremesh	Screwdriver	21510	+7936	A.I	Pymesh
11	Greedy (CDT)	Iphigenie	10000	0	A	Magic3D
12	Variational (CVT)	Iphigenie	10000	0	A	Magic3D
13	Incremental(Uniform)	Iphigenie	19576	+9576	A	MeshLab
14	Incremental (Adaptative)	Iphigenie	8994	-1006	A	OpenFlipper
15	Pyremesh	Iphigenie	26794	+16794	A.I	Pymesh
16	Greedy (CDT)	Egea	29996	0	A.I	Magic3D
17	Variational (CVT)	Egea	29996	0	I	Magic3D
18	Incremental(Uniform)	Egea	21756	-8240	I	MeshLab
19	Incremental (Adaptative)	Egea	29084	-912	A.I	OpenFlipper
20	Pyremesh	Egea	41170	+11174	A.I	Pymesh

Fonte: Autoria própria.

6.1 Resultados dos Experimentos 1-5 (Patch)

Nessa seção, será apresentado os resultados dos experimentos referentes ao modelo "Patch" (Tabela 3). Primeiramente, será mostrado através do gráfico na Figura 13 como a complexidade da malha é afetada por cada técnica.

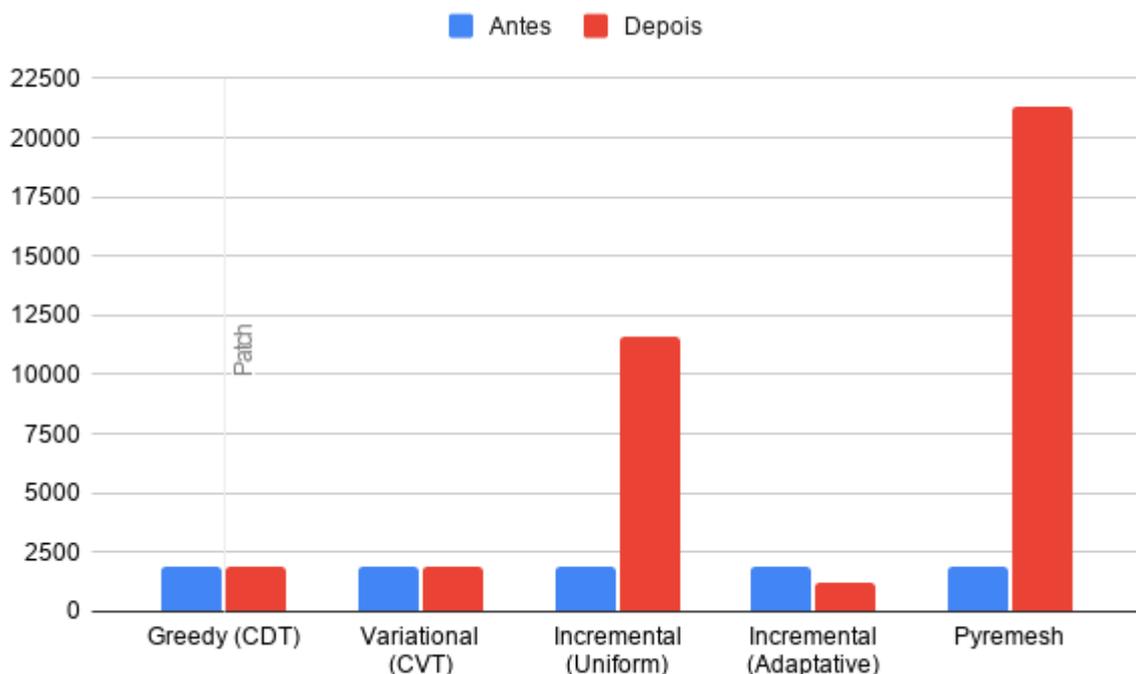
Tabela 3 – Comparação das técnicas de *remeshing* (Patch)

Exp	Técnica/algoritmo	Modelo 3D	Complexidade	Desvio	Qualidade
1	Greedy (CDT)	Patch	1930	0	A
2	Variational (CVT)	Patch	1930	0	A.I
3	Incremental(Uniform)	Patch	11620	+9690	I
4	Incremental (Adaptative)	Patch	1198	-732	A.I
5	Pyremesh	Patch	21286	+19356	A.I

Fonte: Autoria própria.

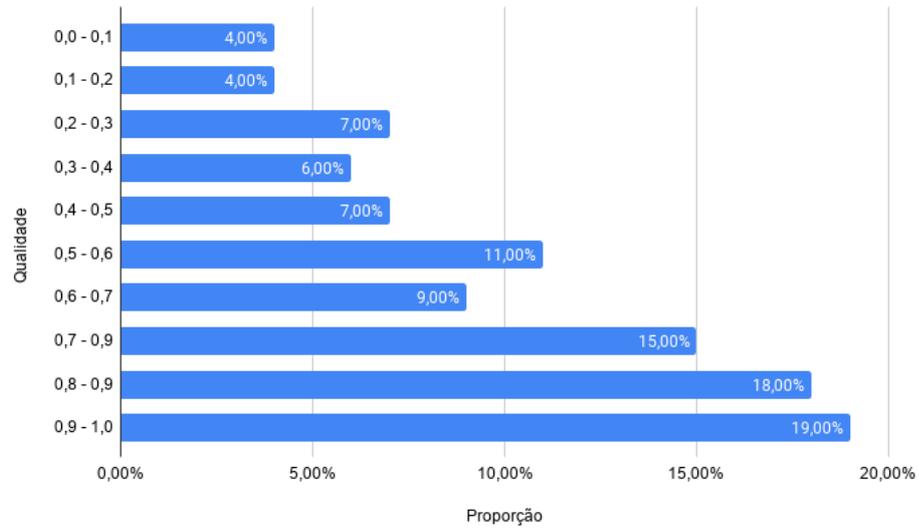
É possível ver na Figura 13 que nos experimentos 1 e 2 (CDT e CVT, respectivamente), a complexidade se mantém inalterada. Enquanto isso, nos experimentos 3 e 5 (Uniforme e Pyremesh, respectivamente) a complexidade aumentou de cerca de 502.07% e 1002.90% (respectivamente). Já no experimento 4 (Adaptativo) houve uma redução razoável em sua complexidade, cerca de 37.92%.

Figura 13 – Complexidade da malha (Patch)



Fonte: Autoria própria.

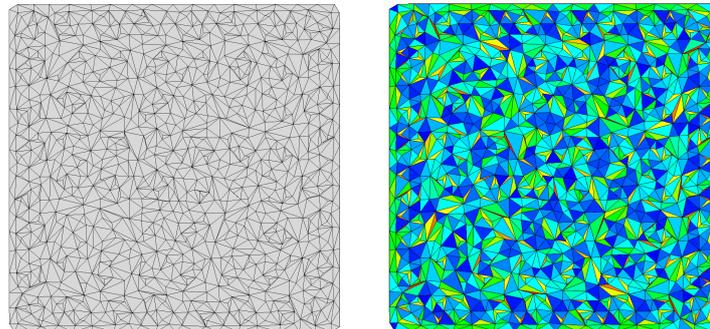
Figura 14 – Qualidade da malha (Patch)



Fonte: Autoria própria.

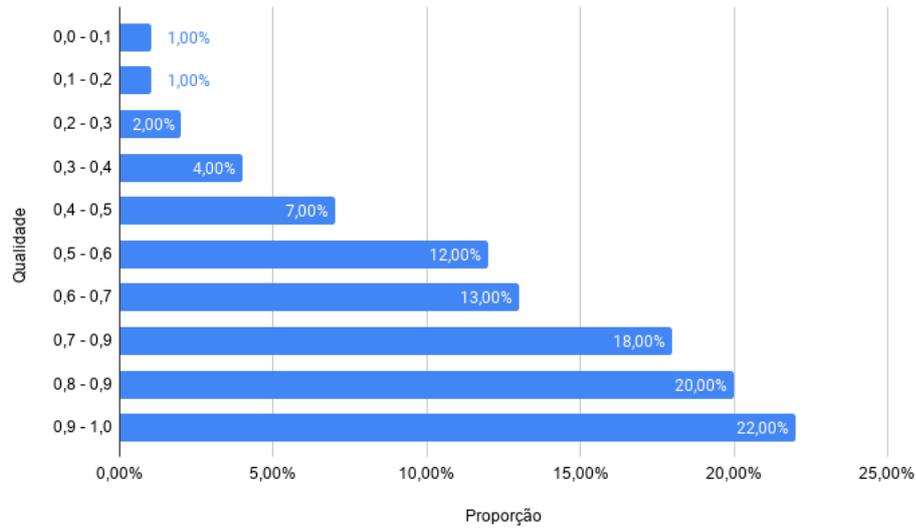
Para melhor compararmos como cada técnica afeta o modelo, a Figura 14 apresenta um gráfico de como está a distribuição da qualidade na malha original do modelo "Patch", juntamente com a representação visual da qualidade de cada triângulo da malha mapeados em cores (quanto mais azul, mais equilátero) na Figura 15. A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, classificou-se essa malha como sendo "Anisotrópica" (A).

Figura 15 – Malha original (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

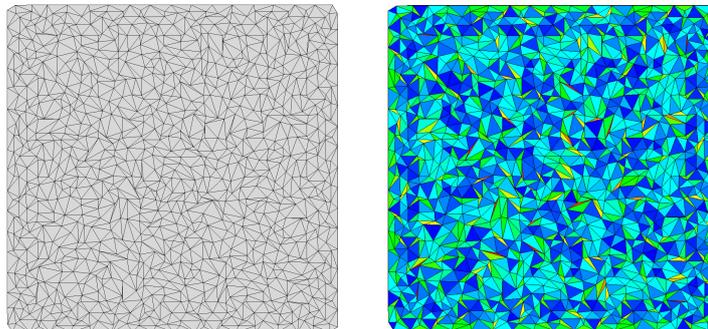
Figura 16 – Qualidade da malha do Experimento 1 (Patch - Greedy)



Fonte: Autoria própria.

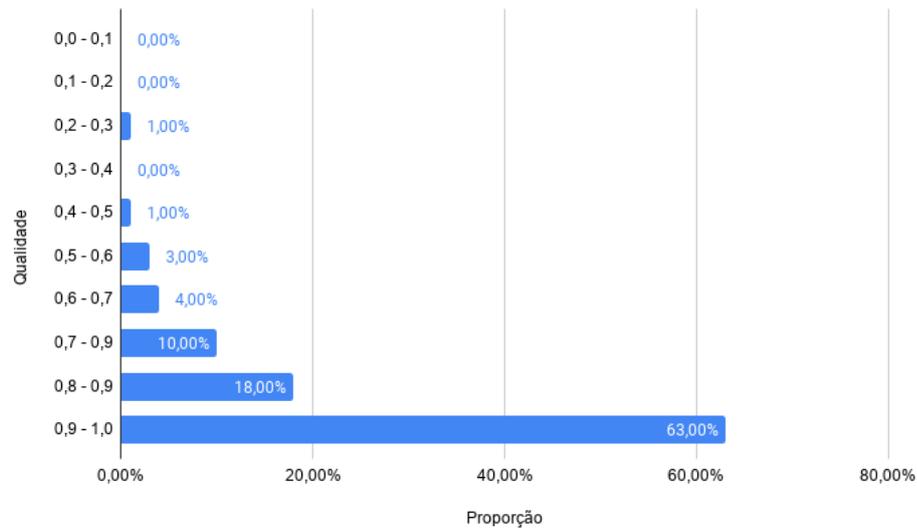
A Figura 16 mostra o gráfico da qualidade malha resultante do Experimento 1 (Greedy). Pode-se notar que não houve uma mudança muito perceptível na malha, com exceção da remoção de alguns triângulos de baixa qualidade, não interferindo muito na qualidade geral da malha (Figura 17). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como ainda sendo "Anisotrópica" (A), assim como a malha original.

Figura 17 – Resultado do Experimento 1 (Greedy). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

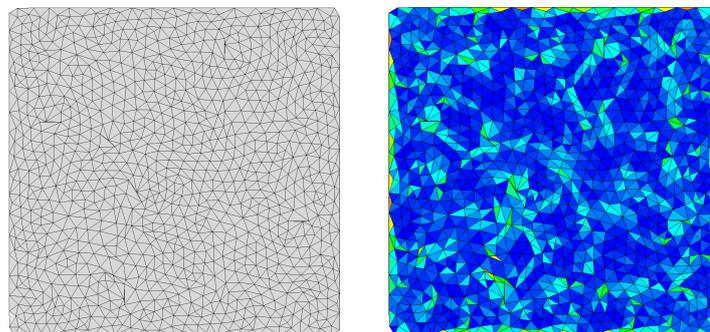
Figura 18 – Qualidade da malha do Experimento 2 (Patch - Variational)



Fonte: Autoria própria.

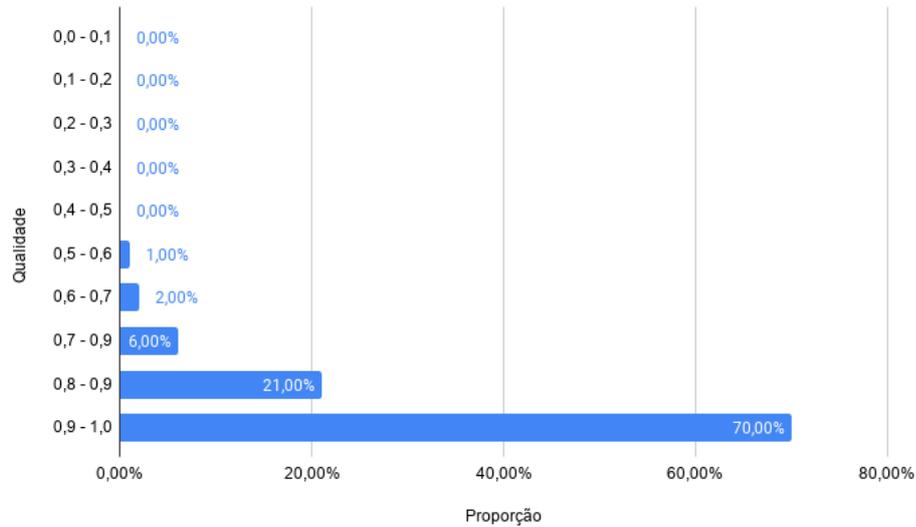
A Figura 18 mostra o gráfico da qualidade malha resultante do Experimento 2 (Variational). Nesse pode-se notar que houve uma mudança muito mais perceptível na malha, removendo grande parte dos triângulos de baixa qualidade, o que proporcionou uma melhora considerável na qualidade geral da malha (Figura 19). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como "Altamente isotrópica" (A.I).

Figura 19 – Resultado do Experimento 2 (Variational). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

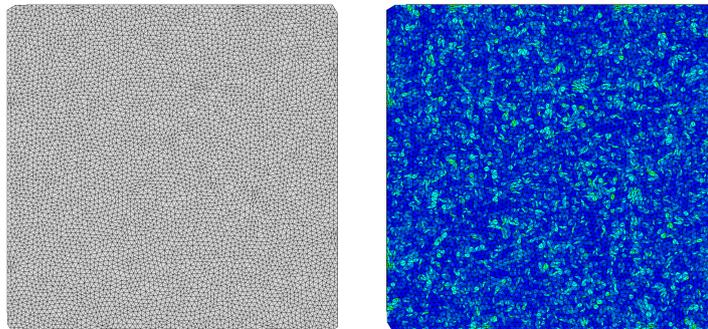
Figura 20 – Qualidade da malha do Experimento 3 (Patch - Uniform)



Fonte: Autoria própria.

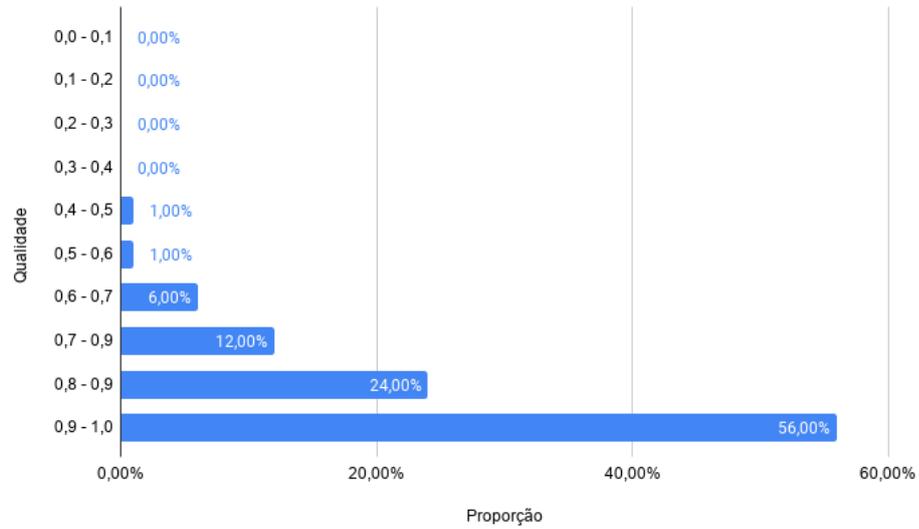
A Figura 20 mostra o gráfico da qualidade malha resultante do Experimento 3 (Uniform). Agora nesse experimento já se pode notar grandes mudanças na malha, desde o aumento considerável na complexidade, até a remoção da grande maioria dos triângulos de baixa qualidade na malha, apresentando uma grande melhoria na qualidade geral da malha (Figura 21). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como sendo "Isotrópica" (I).

Figura 21 – Resultado do Experimento 3 (Uniform). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

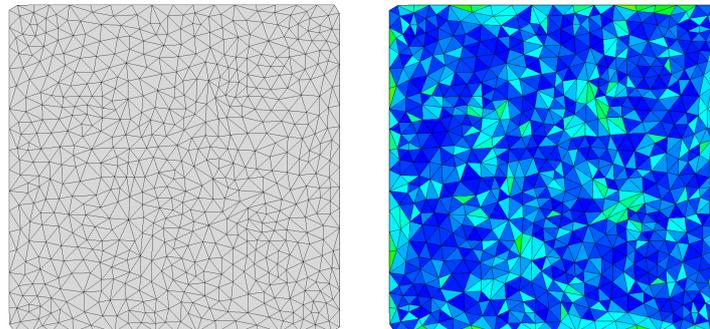
Figura 22 – Qualidade da malha do Experimento 3 (Patch - Adaptative)



Fonte: Autoria própria.

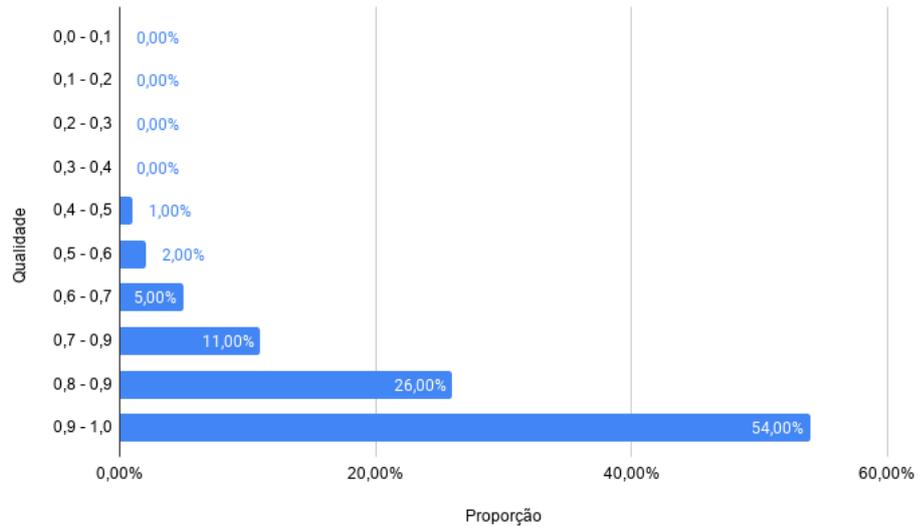
A Figura 22 mostra o gráfico da qualidade malha resultante do Experimento 4 (Adaptative). Nesse pode-se notar um desempenho similar ao Experimento 2 (Variational), removendo grande parte dos triângulos de baixa qualidade, o que proporcionou uma melhora considerável na qualidade geral da malha (Figura 23). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como "Altamente isotrópica" (A.I).

Figura 23 – Resultado do Experimento 4 (Adaptative). Malha processada (esquerda). qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

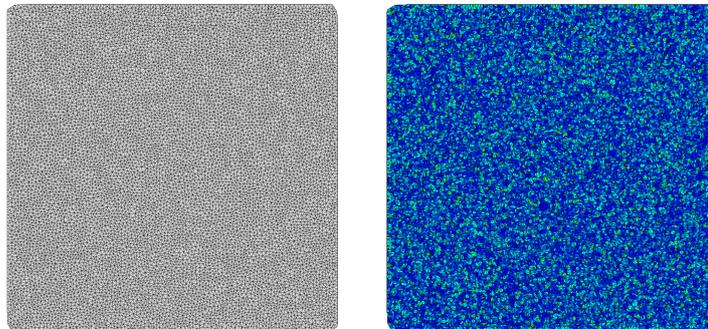
Figura 24 – Qualidade da malha do Experimento 5 (Patch - Pyremesh)



Fonte: Autoria própria.

A Figura 24 mostra o gráfico da qualidade da malha resultante do Experimento 5 (Pyremesh). Nesse observou-se um desempenho similar ao Experimento 4 e 2 (Adaptive e Variational, respectivamente), removendo grande parte dos triângulos de baixa qualidade, proporcionando uma melhora considerável na qualidade geral da malha (Figura 25). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como "Altamente isotrópica" (A.I).

Figura 25 – Resultado do Experimento 5 (Pyremesh). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

6.2 Resultados dos Experimentos 6-10 (Screwdriver)

Nessa seção, será apresentado os resultados dos Experimentos referentes ao modelo "Screwdriver" (Tabela 4). Primeiramente, será mostrado através do gráfico na Figura 25 como a complexidade da malha é afetada por cada técnica.

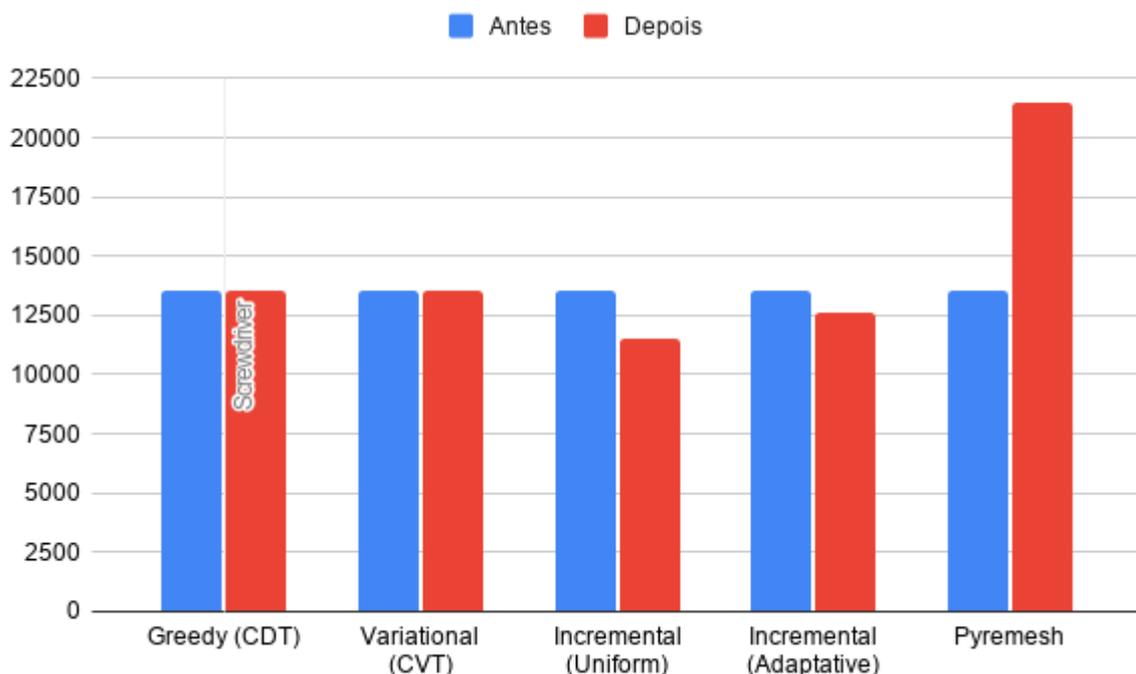
Tabela 4 – Comparação das técnicas de *remeshing* (Screwdriver)

Exp	Técnica/ algoritmo	Modelo 3D	Complexidade	Desvio	Qualidade
6	Greedy (CDT)	Screwdriver	13574	0	A
7	Variational (CVT)	Screwdriver	13574	0	A.I
8	Incremental(Uniform)	Screwdriver	11486	-2088	I
9	Incremental (Adaptative)	Screwdriver	12618	-956	A.I
10	Pyremesh	Screwdriver	21510	+7936	A.I

Fonte: Autoria própria.

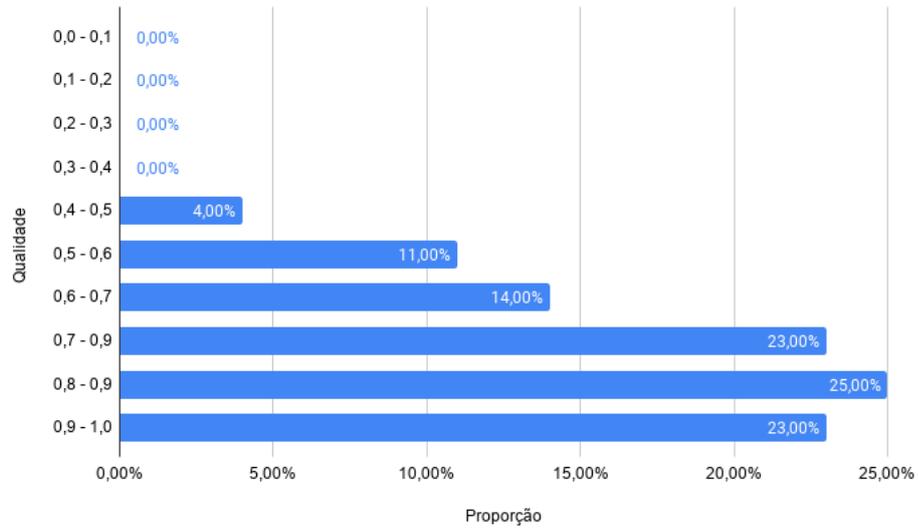
É possível ver na Figura 26 que nos experimentos 6 e 7 (CDT e CVT, respectivamente), a complexidade se mantém inalterada. Enquanto isso, nos experimentos 8 e 9 (Uniforme e Adaptativo, respectivamente) a complexidade diminui levemente em comparação com a original (cerca de 15.38% e 7.04%, respectivamente). Já no experimento 10 (Pyremesh) houve um aumento considerável de 58.46% na sua complexidade.

Figura 26 – Complexidade da malha (Screwdriver)



Fonte: Autoria própria.

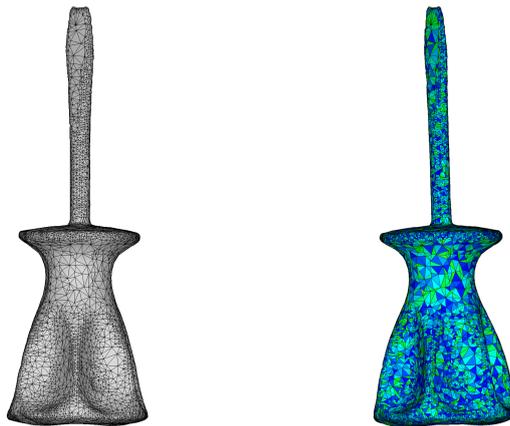
Figura 27 – Qualidade da malha original (Screwdriver - Input)



Fonte: Autoria própria.

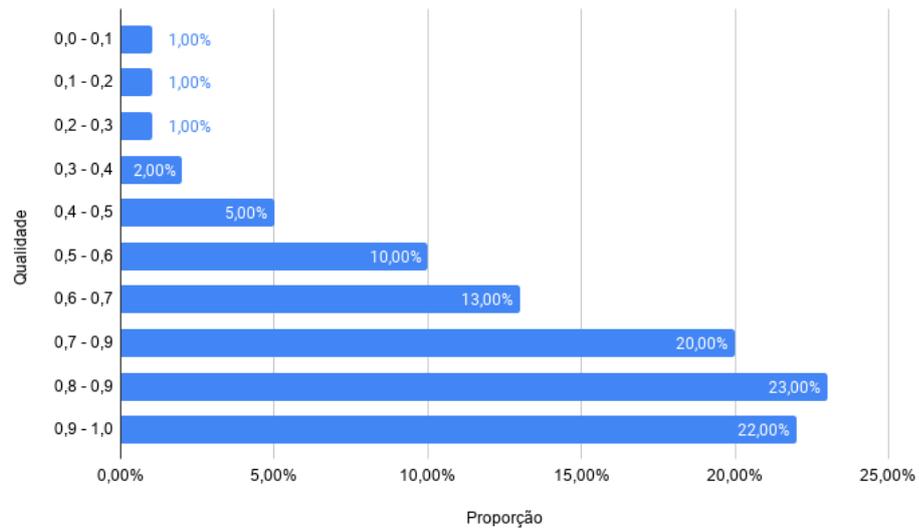
A Figura 27 apresenta um gráfico de como está distribuição da qualidade na malha original do modelo "Screwdriver", juntamente com a representação visual da qualidade de cada triângulo da malha mapeados em cores na Figura 28. A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, classificou-se essa malha como sendo "Semi-isotrópica" (S).

Figura 28 – Malha original (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

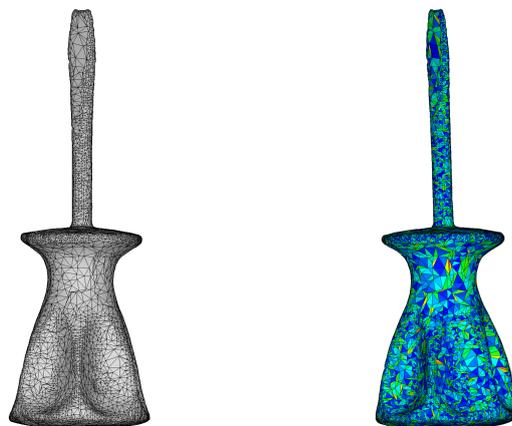
Figura 29 – Qualidade da malha do Experimento 6 (Screwdriver - Greedy)



Fonte: Autoria própria.

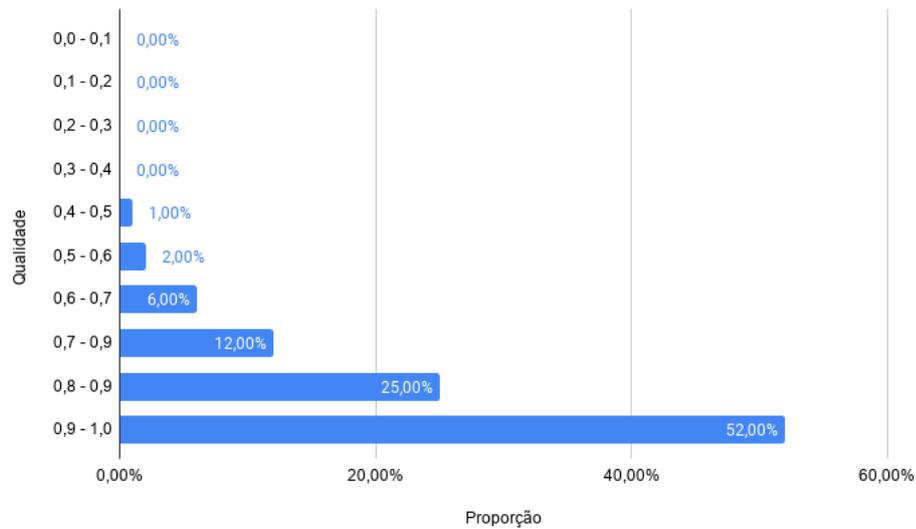
A Figura 29 mostra o gráfico da qualidade da malha resultante do Experimento 6 (Greedy). Pode-se notar que houve uma mudança perceptível na malha, com um aumento na quantidade triângulos de baixa qualidade, diminuindo a qualidade geral da malha (Figura 30). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como sendo "Anisotrópica" (A).

Figura 30 – Resultado do Experimento 6 (Greedy). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

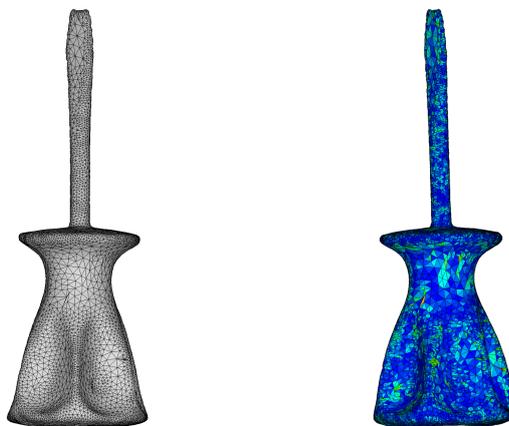
Figura 31 – Qualidade da malha do Experimento 7 (Screwdriver - Variational)



Fonte: Autoria própria.

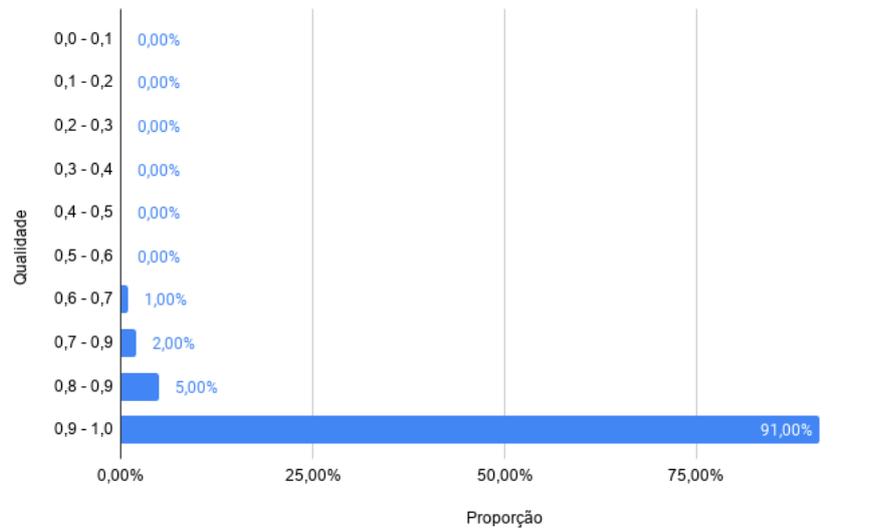
A Figura 31 mostra o gráfico da qualidade malha resultante do Experimento 7 (Variational). Nesse pode-se notar que houve uma mudança muito mais perceptível na malha, removendo parte dos triângulos de baixa qualidade, o que proporcionou uma melhora na qualidade geral da malha (Figura 32). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, essa malha foi classificada como "Altamente isotrópica" (A.I).

Figura 32 – Resultado do Experimento 7 (Variational). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

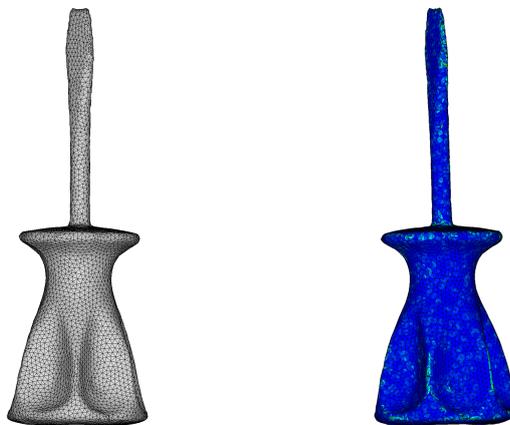
Figura 33 – Qualidade da malha do Experimento 8 (Screwdriver - Uniform)



Fonte: Autoria própria.

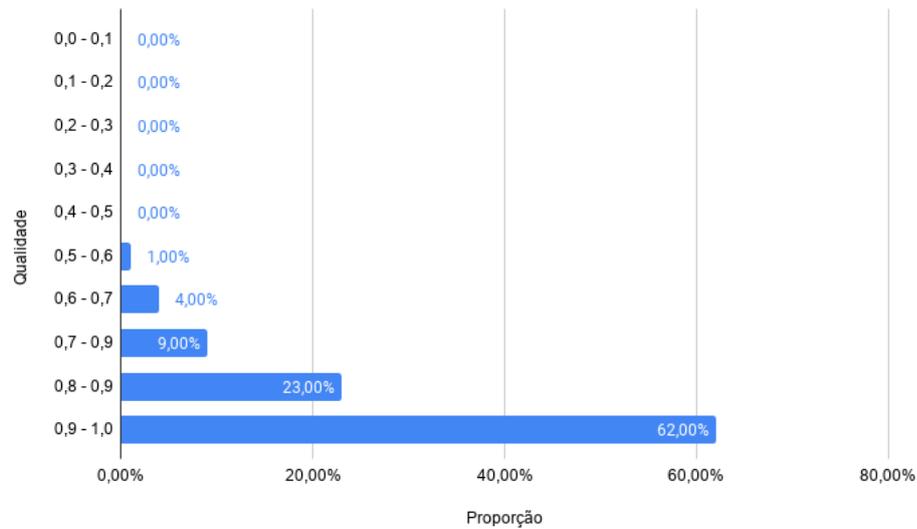
A Figura 33 mostra o gráfico da qualidade malha resultante do Experimento 8 (Uniform). Nesse experimento já se pode notar mudanças gritantes na qualidade da malha, havendo a remoção da grande maioria dos triângulos de baixa qualidade, aumentando a qualidade geral da malha (Figura 34). Além disso, houve uma leve redução em sua complexidade ainda que preservando as características da malha original. A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como sendo "Isotrópica" (I).

Figura 34 – Resultado do Experimento 8 (Uniform). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita) .



Fonte: Autoria própria.

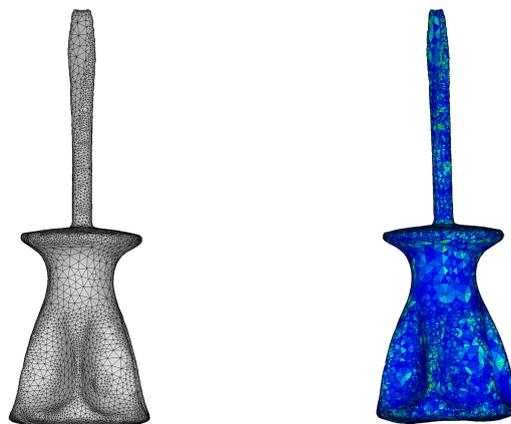
Figura 35 – Qualidade da malha do Experimento 9 (Screwdriver - Adaptative)



Fonte: Autoria própria.

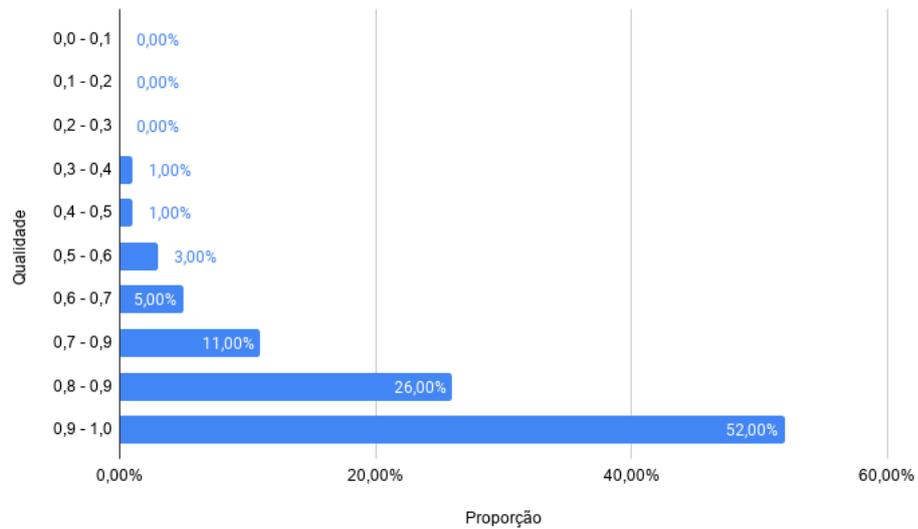
A Figura 35 mostra o gráfico da qualidade malha resultante do Experimento 9 (Adaptative). Nesse pode-se notar um desempenho similar ao Experimento 7 (Variational), removendo uma parte dos triângulos de baixa qualidade, o que proporcionou uma melhora na qualidade geral da malha (Figura 36). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como "Altamente isotrópica" (A.I).

Figura 36 – Resultado do Experimento 9 (Adaptative). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

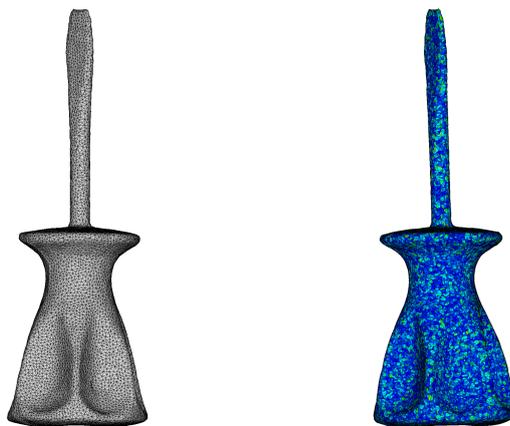
Figura 37 – Qualidade da malha do Experimento 10 (Screwdriver - Pyremesh)



Fonte: Autoria própria.

A Figura 37 mostra o gráfico da qualidade da malha resultante do Experimento 10 (Pyremesh). Nesse observou-se um desempenho similar ao Experimento 9 e 7 (Adaptive e Variational, respectivamente), removendo parte dos triângulos de baixa qualidade, proporcionando uma melhora na qualidade geral da malha (Figura 38). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como "Altamente isotrópica" (A.I).

Figura 38 – Resultado do Experimento 10 (Pyremesh). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita) .



Fonte: Autoria própria.

6.3 Resultados dos Experimentos 11-15 (Iphigenie)

Nessa seção, serão apresentados os resultados dos experimentos referentes ao modelo "Iphigenie" (Tabela 5). Primeiramente, será mostrado através do gráfico na Figura 39 como a complexidade da malha é afetada por cada técnica.

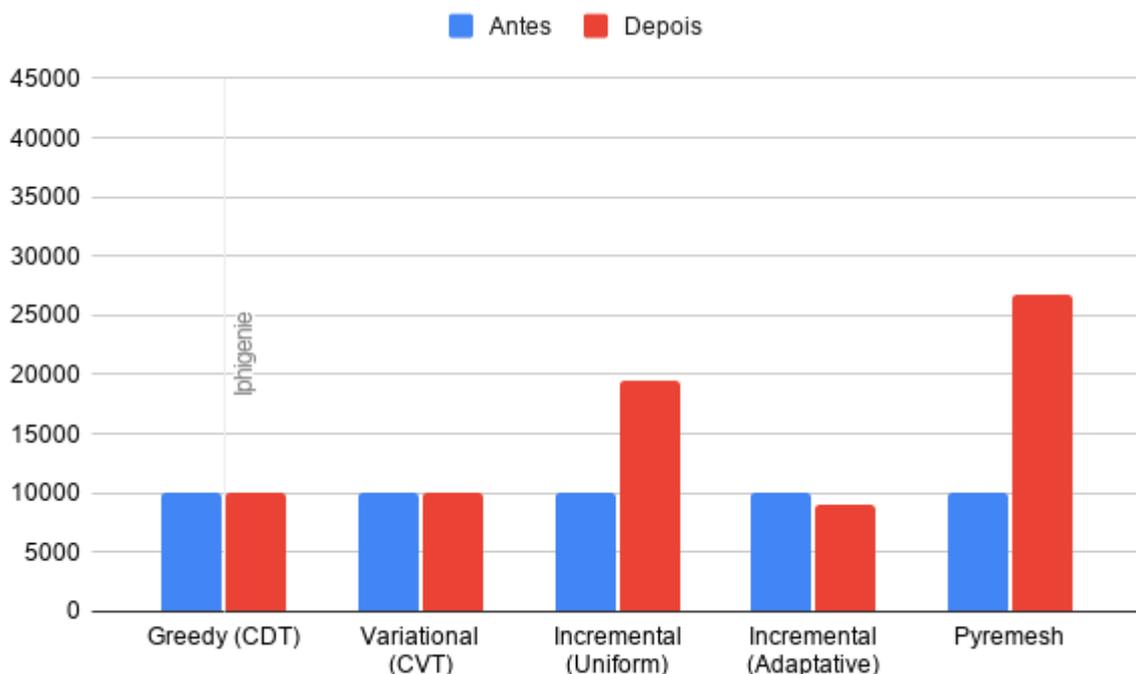
Tabela 5 – Comparação das técnicas de *remeshing* (Iphigenie)

Exp	Técnica/ algoritmo	Modelo 3D	Complexidade	Desvio	Qualidade
11	Greedy (CDT)	Iphigenie	10000	0	A
12	Variational (CVT)	Iphigenie	10000	0	A
13	Incremental(Uniform)	Iphigenie	19576	+9576	A
14	Incremental (Adaptative)	Iphigenie	8994	-1006	A
15	Pyremesh	Iphigenie	26794	+16794	A.I

Fonte: Autoria própria.

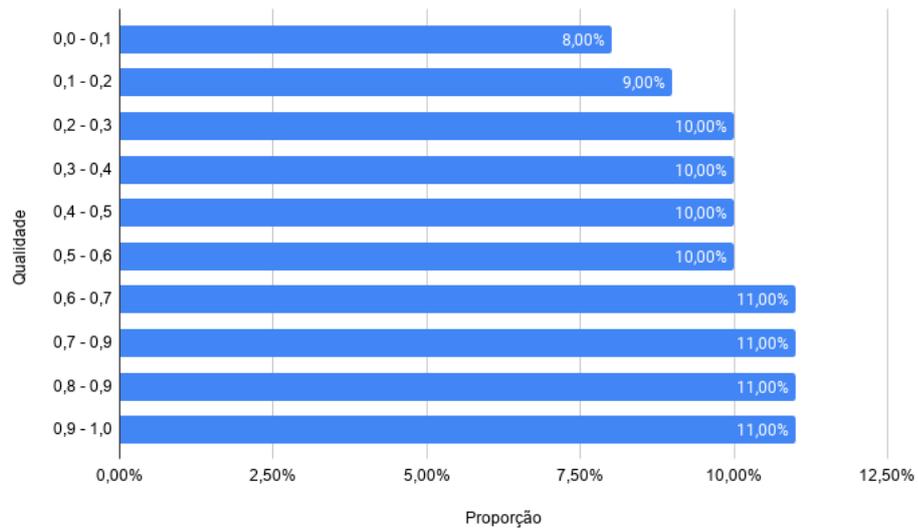
É possível ver na Figura 39 que nos Experimentos 11 e 12 (CDT e CVT, respectivamente), a complexidade se mantém inalterada. Nos experimentos 13 e 15 (Uniforme e Pyremesh, respectivamente) a complexidade aumenta consideravelmente em comparação com a original (cerca de 95.76% e 167.94%, respectivamente). Já no experimento 14 (Adaptativo) houve uma leve redução na sua complexidade (cerca de 10.06%).

Figura 39 – Complexidade da malha (Iphigenie)



Fonte: Autoria própria.

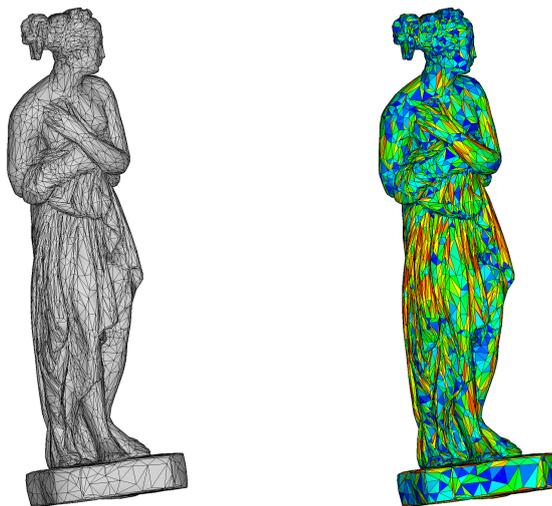
Figura 40 – Qualidade da malha original (Iphigenie - Input)



Fonte: Autoria própria.

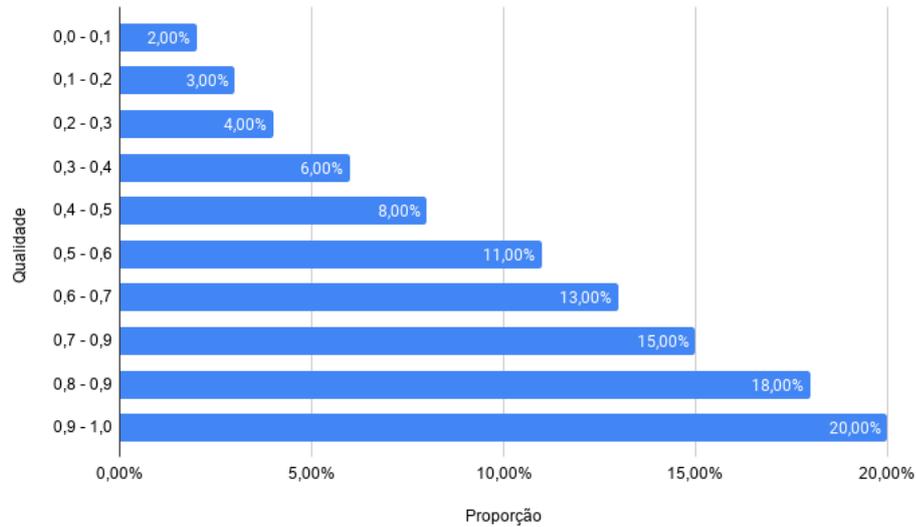
A Figura 40 apresenta um gráfico de como está distribuição da qualidade na malha original do modelo "Iphigenie", juntamente com a representação visual da qualidade de cada triângulo da malha mapeados em cores na Figura 41. A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, classificou-se essa malha como sendo "Anisotrópica" (S).

Figura 41 – Malha original (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

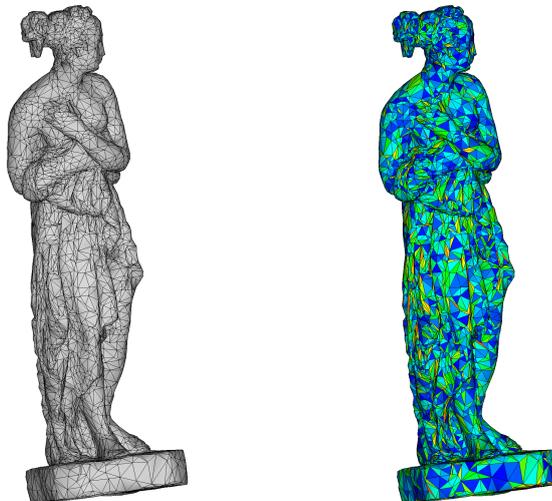
Figura 42 – Qualidade da malha do Experimento 11 (Iphigenie - Greedy)



Fonte: Autoria própria.

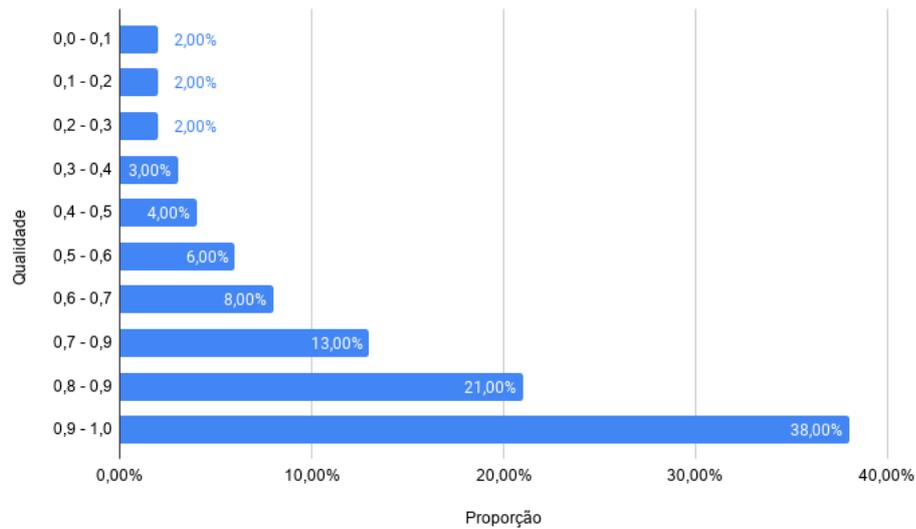
A Figura 42 mostra o gráfico da qualidade da malha resultante do Experimento 11 (Greedy). Apesar de se notar uma mudança perceptível na malha, com a redução no número triângulos de baixa qualidade, não foi o suficiente para refletir em uma melhora na qualidade geral da malha (Figura 43). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como ainda sendo "Anisotrópica" (A), assim como a malha original.

Figura 43 – Resultado do Experimento 11 (Greedy). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

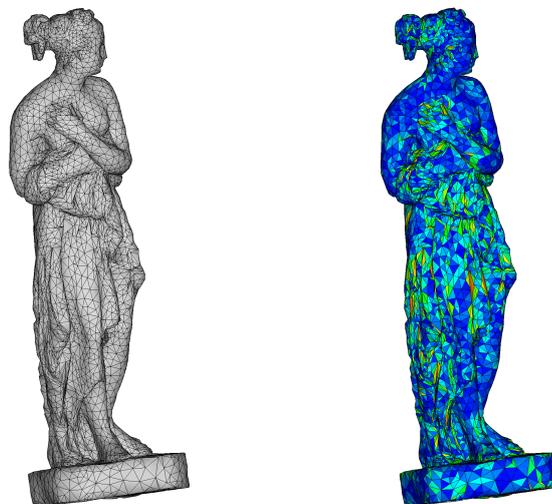
Figura 44 – Qualidade da malha do Experimento 12 (Iphigenie - Variational)



Fonte: Autoria própria.

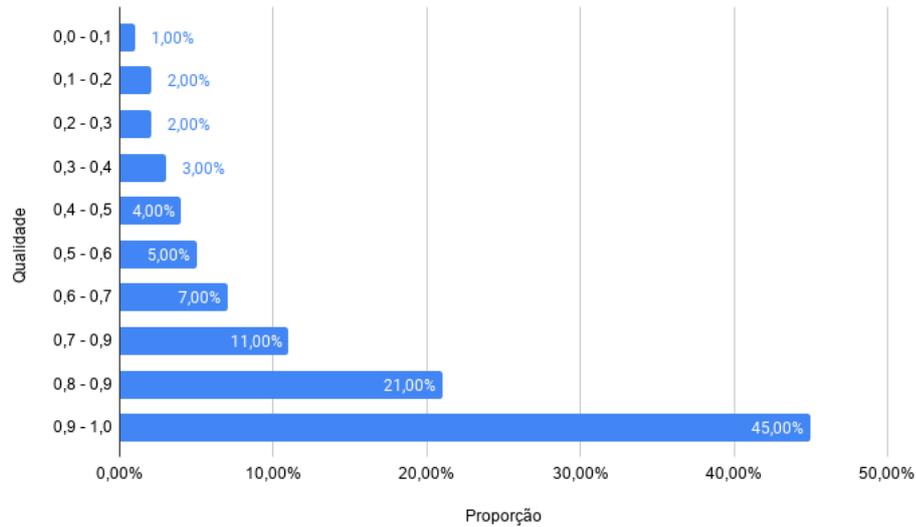
A Figura 42 mostra o gráfico da qualidade da malha resultante do Experimento 12 (Variational). Assim como no Experimento 11 (Greedy), apesar de se notar uma mudança perceptível na malha, com a redução no número triângulos de baixa qualidade, não foi o suficiente para refletir em uma melhora na qualidade geral da malha (Figura 45). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como ainda sendo "Anisotrópica" (A), assim como a malha original.

Figura 45 – Resultado do Experimento 12 (Variational). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

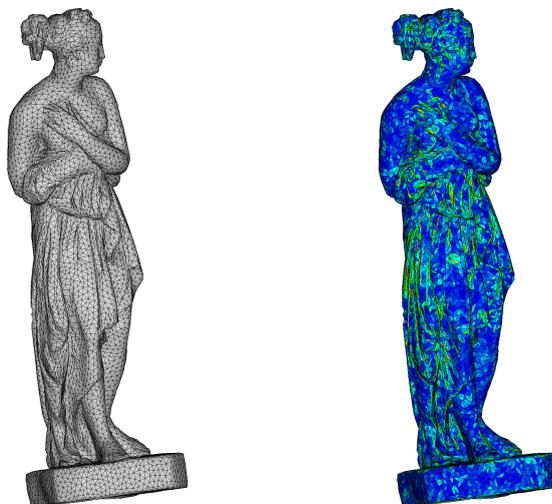
Figura 46 – Qualidade da malha do Experimento 13 (Iphigenie - Uniform)



Fonte: Autoria própria.

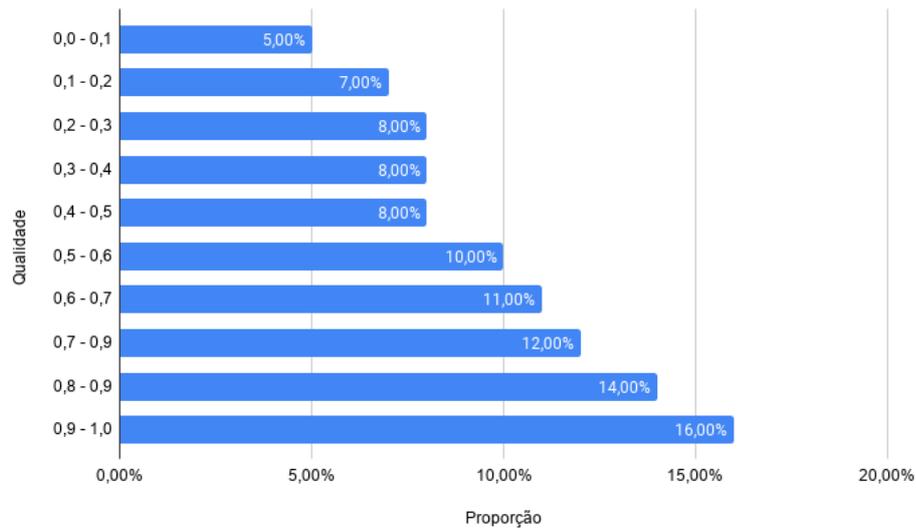
A Figura 46 mostra o gráfico da qualidade da malha resultante do Experimento 13 (Uniform). Assim como no Experimento 11 e 12 (Greedy e Variational, respectivamente), apesar de se notar uma mudança ainda mais perceptível na malha, com a redução no número triângulos de baixa qualidade, não foi o suficiente para refletir em uma melhora na qualidade geral da malha (Figura 47). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como ainda sendo "Anisotrópica" (A), assim como a malha original.

Figura 47 – Resultado do Experimento 13 (Uniform). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

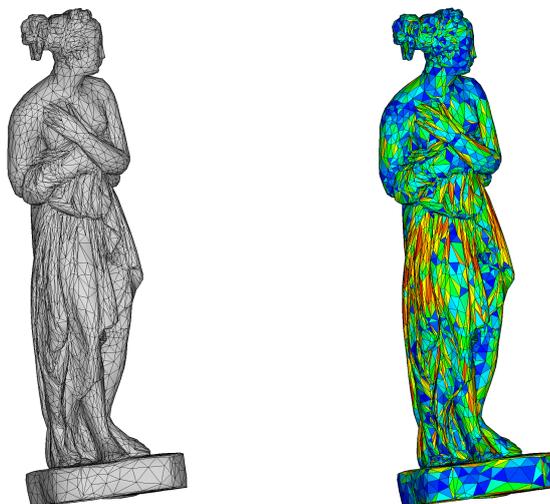
Figura 48 – Qualidade da malha do Experimento 14 (Iphigenie - Adaptive)



Fonte: Autoria própria.

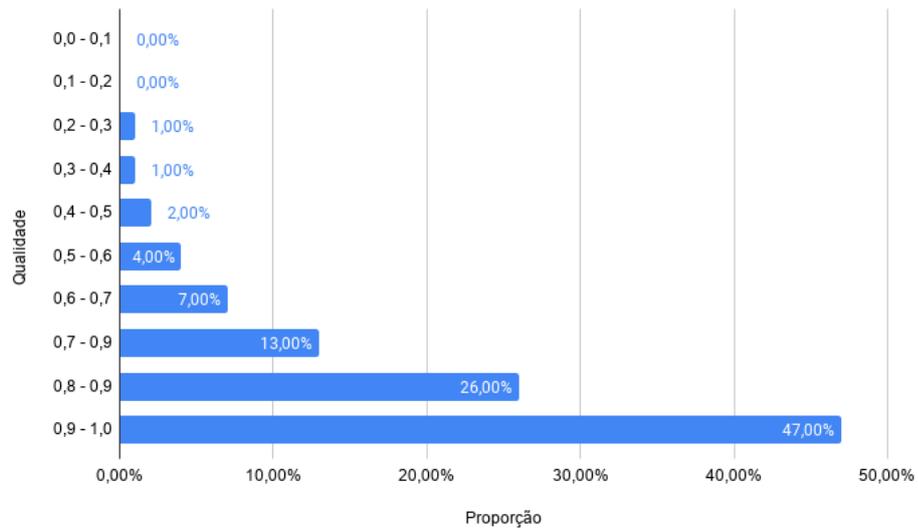
A Figura 48 mostra o gráfico da qualidade malha resultante do Experimento 14 (Adaptive). Pode-se notar que não houve uma mudança muito perceptível na malha, com exceção da remoção de alguns triângulos de baixa qualidade, não refletindo muito na qualidade geral da malha (Figura 49). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como ainda sendo "Anisotrópica" (A), assim como a malha original.

Figura 49 – Resultado do Experimento 14 (Adaptive). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

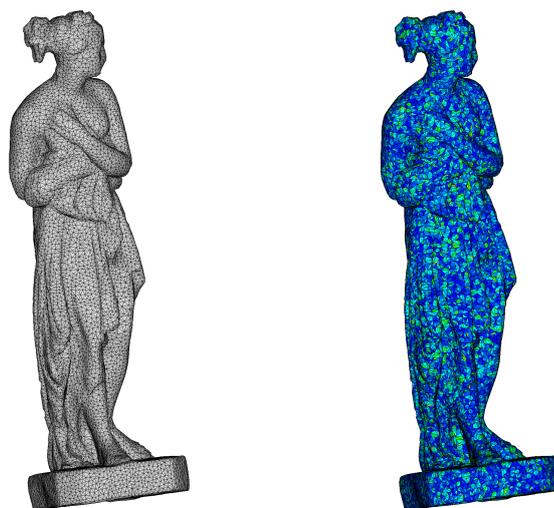
Figura 50 – Qualidade da malha do Experimento 15 (Iphigenie - Pyremesh)



Fonte: Autoria própria.

A Figura 50 mostra o gráfico da qualidade malha resultante do Experimento 15 (Pyremesh). Nesse pode-se notar que houve uma mudança muito mais perceptível na malha, removendo grande parte dos triângulos de baixa qualidade, o que proporcionou uma melhora considerável na qualidade geral da malha (Figura 51). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como "Altamente isotrópica" (A.I).

Figura 51 – Resultado do Experimento 15 (Pyremesh). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

6.4 Resultados dos Experimentos 16-20 (Egea)

Nessa seção, será apresentado os resultados dos Experimentos referentes ao modelo "Egea" (Tabela 6). Primeiramente, será mostrado através do gráfico na Figura 52 como a complexidade da malha é afetada por cada técnica.

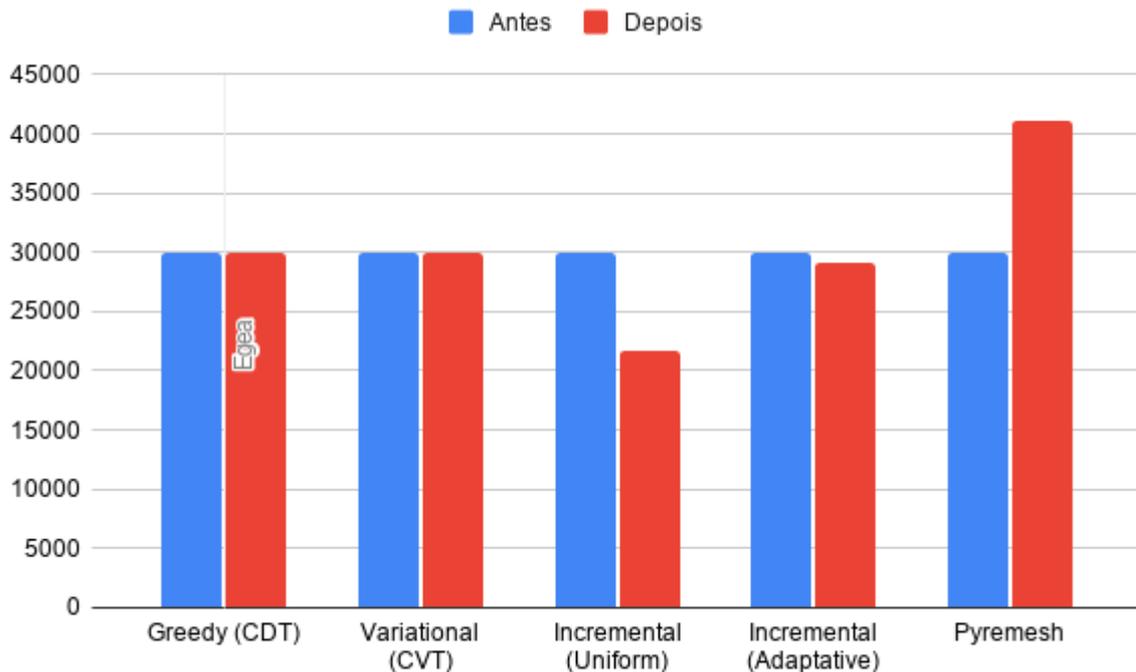
Tabela 6 – Comparação das técnicas de *remeshing* (Egea)

Exp	Técnica/ algoritmo	Modelo 3D	Complexidade	Desvio	Qualidade
16	Greedy (CDT)	Egea	29996	0	A.I
17	Variational (CVT)	Egea	29996	0	I
18	Incremental(Uniform)	Egea	21756	-8240	I
19	Incremental (Adaptative)	Egea	29084	-912	A.I
20	Pyremesh	Egea	41170	+11174	A.I

Fonte: Autoria própria.

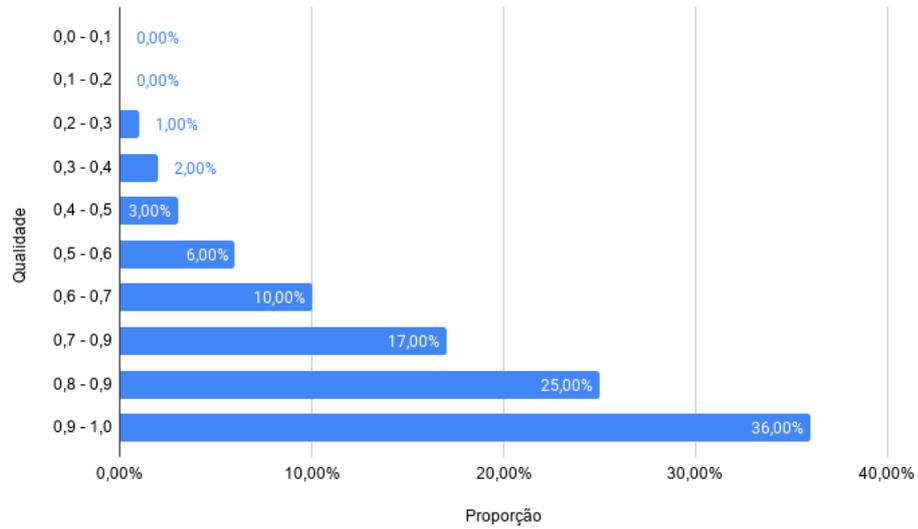
Na Figura 52 é possível ver que nos experimentos 16 e 17 (CDT e CVT, respectivamente), a complexidade se mantém inalterada. Nos experimentos 18 e 19 (Uniforme e Adaptativo, respectivamente) a complexidade sofrem reduções (cerca de 27.47% e 3.04%, respectivamente). Já no experimento 20 (Pyremesh) houve uma aumento na sua complexidade (cerca de 37.25%).

Figura 52 – Complexidade da malha (Egea)



Fonte: Autoria própria.

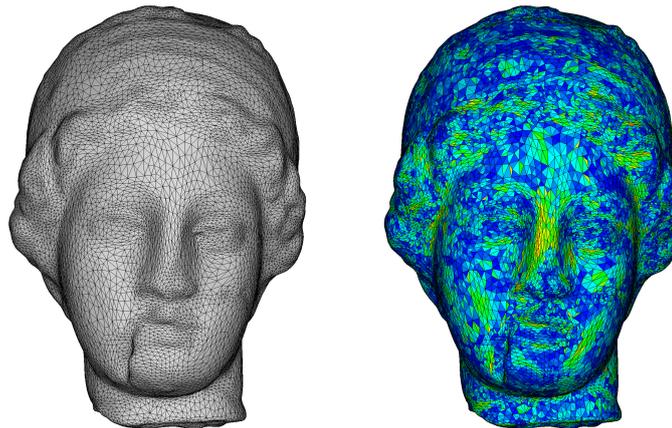
Figura 53 – Qualidade da malha original (Egea - Input)



Fonte: Autoria própria.

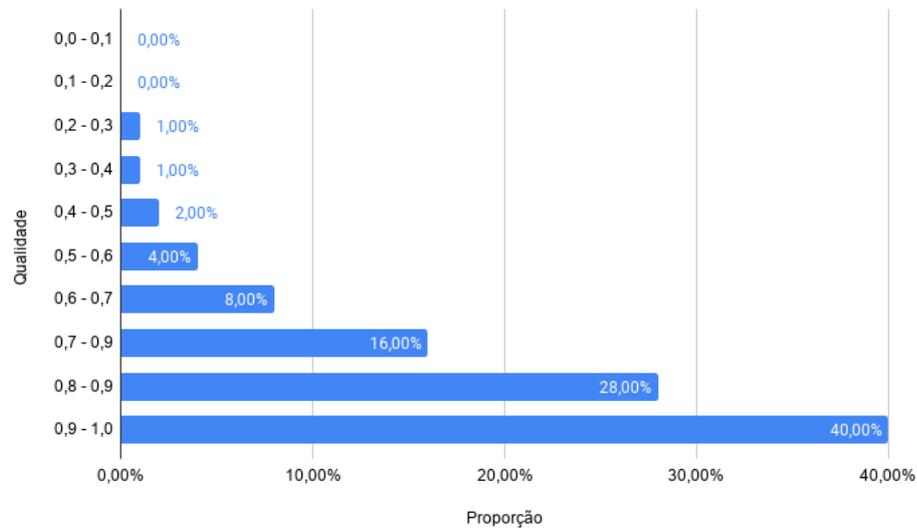
A Figura 53 apresenta um gráfico de como está distribuição da qualidade na malha original do modelo "Egea", juntamente com a representação visual da qualidade de cada triângulo da malha mapeados em cores na Figura 52. A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, classificou-se essa malha como sendo "Semi-isotrópica" (S).

Figura 54 – Malha original (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

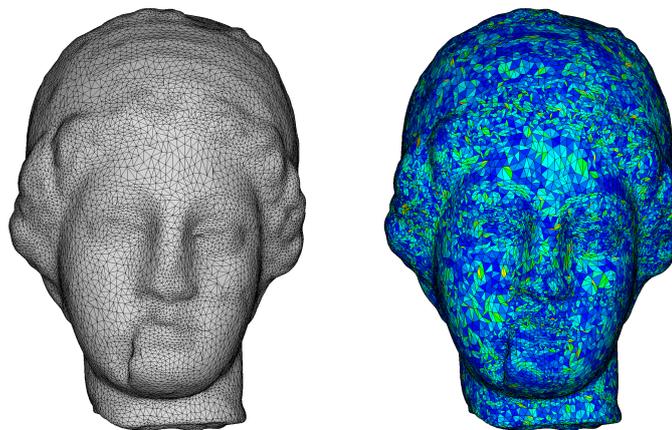
Figura 55 – Qualidade da malha do Experimento 16 (Egea - Greedy)



Fonte: Autoria própria.

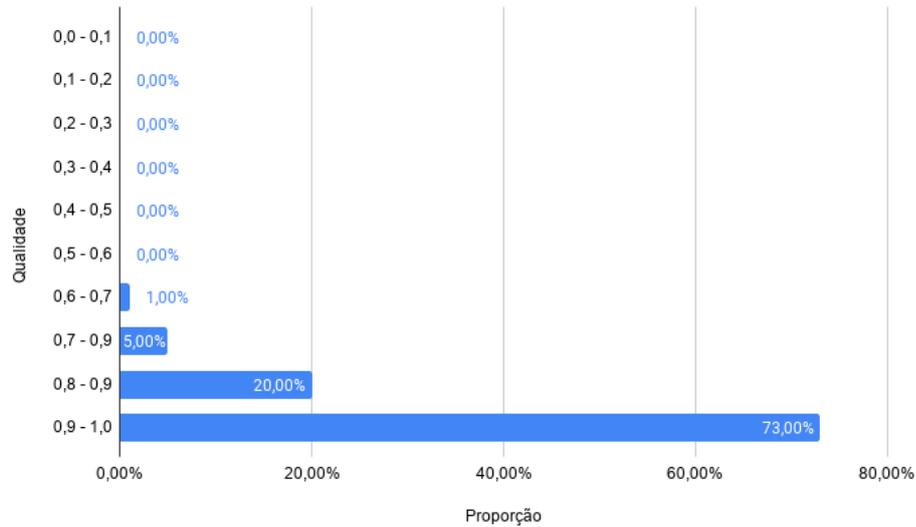
A Figura 55 mostra o gráfico da qualidade malha resultante do Experimento 16 (Greedy). Nesse pode-se notar que houve uma mudança perceptível na malha, removendo boa parte dos triângulos de baixa qualidade, o que proporcionou uma melhora na qualidade geral da malha (Figura 56). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como "Altamente isotrópica" (A.I).

Figura 56 – Resultado do Experimento 16 (Greedy). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

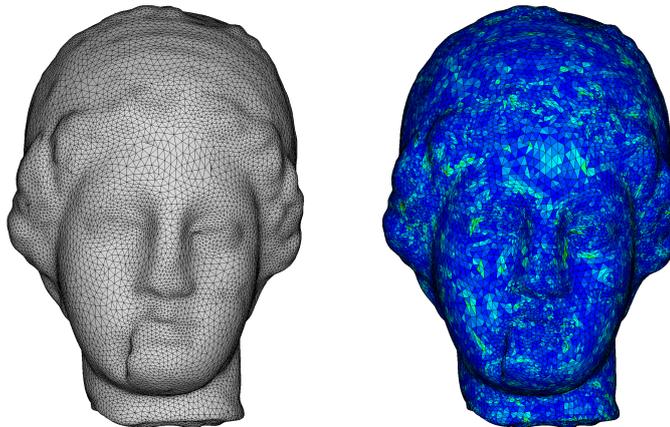
Figura 57 – Qualidade da malha do Experimento 17 (Egea - Variational)



Fonte: Autoria própria.

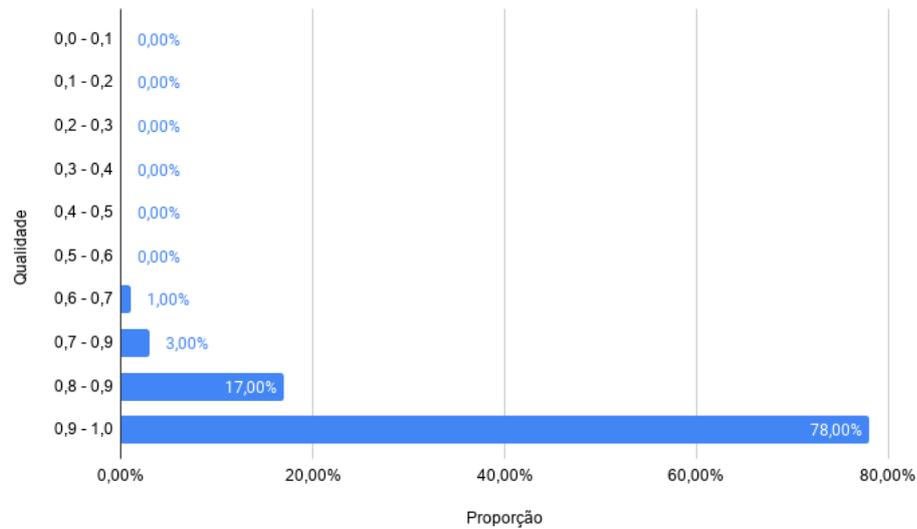
A Figura 57 mostra o gráfico da qualidade malha resultante do Experimento 17 (Variational). Nesse pode-se notar que houve uma mudança muito mais perceptível na malha, removendo grande parte dos triângulos de baixa qualidade, o que proporcionou uma melhora considerável na qualidade geral da malha (Figura 58). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como "Isotrópica" (I).

Figura 58 – Resultado do Experimento 17 (Variational). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

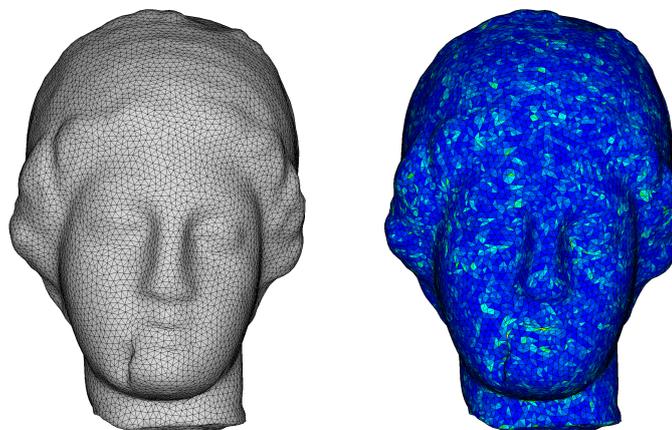
Figura 59 – Qualidade da malha do Experimento 18 (Egea - Uniform)



Fonte: Autoria própria.

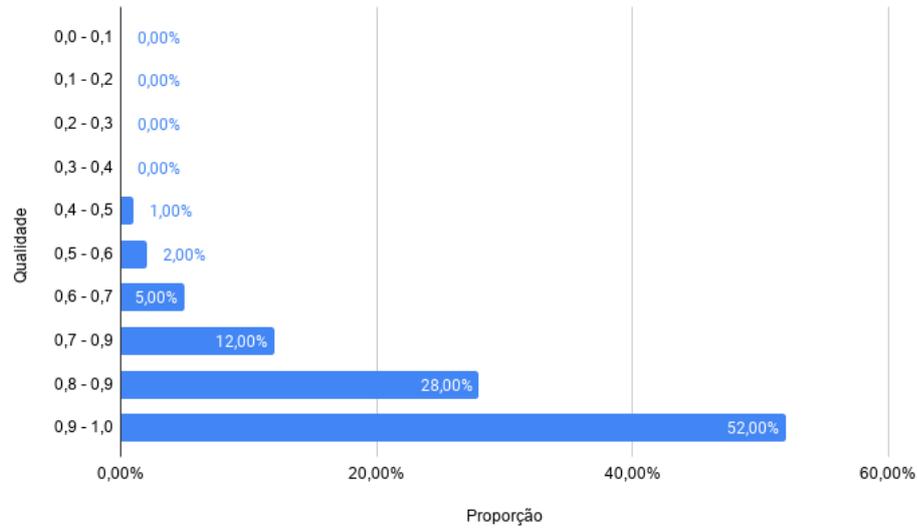
A Figura 59 mostra o gráfico da qualidade malha resultante do Experimento 18 (Uniform). Nesse experimento já se pode notar mudanças gritantes na qualidade da malha, havendo a remoção da grande maioria dos triângulos de baixa qualidade, aumentando a qualidade geral da malha (Figura 60). Além disso, houve uma redução notável em sua complexidade ainda que preservando as características da malha original. A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como sendo "Isotrópica" (I).

Figura 60 – Resultado do Experimento 18 (Uniform). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

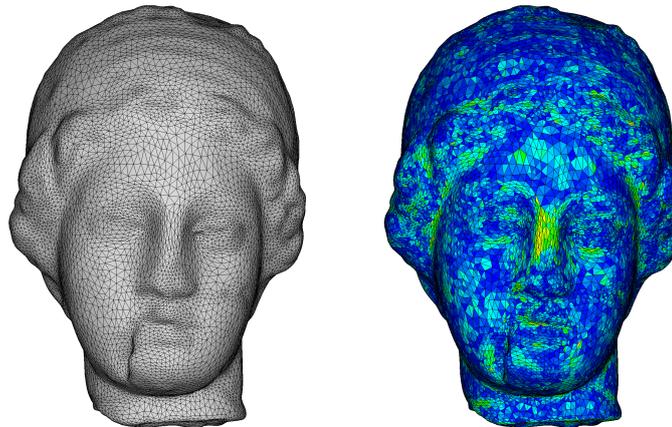
Figura 61 – Qualidade da malha do Experimento 19 (Egea - Adaptive)



Fonte: Autoria própria.

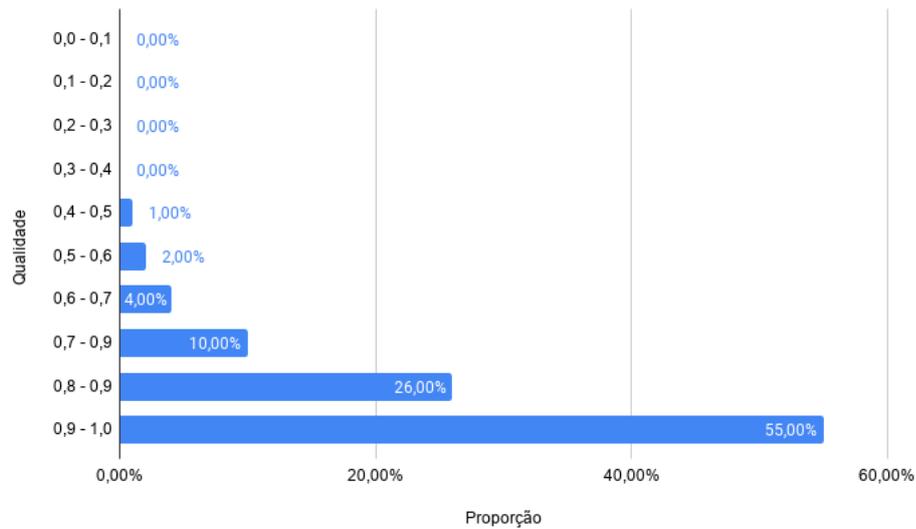
A Figura 61 mostra o gráfico da qualidade malha resultante do Experimento 19 (Adaptativo). Nesse pode-se notar um desempenho semelhante ao do Experimento 16 (Greedy), removendo boa parte dos triângulos de baixa qualidade, o que proporcionou uma melhora na qualidade geral da malha (Figura 62). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como "Altamente isotrópica" (A.I).

Figura 62 – Resultado do Experimento 19 (Adaptive). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

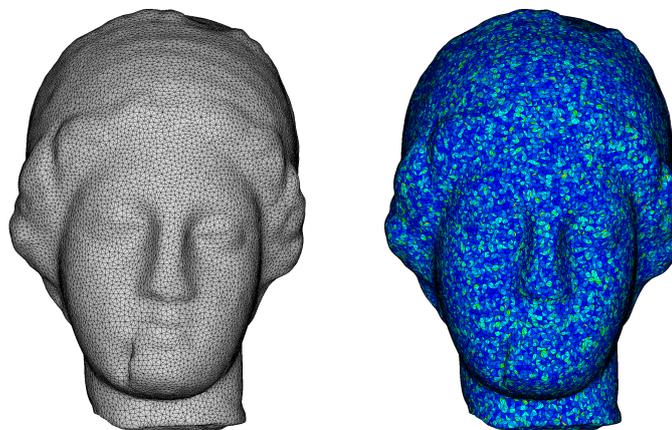
Figura 63 – Qualidade da malha do Experimento 20 (Egea - Pyremesh)



Fonte: Autoria própria.

A Figura 63 mostra o gráfico da qualidade malha resultante do Experimento 20 (Pyremesh). Nesse pode-se notar um desempenho semelhante ao do Experimento 16 e 19 (Greedy e Adaptativo, respectivamente), removendo boa parte dos triângulos de baixa qualidade, refletindo em uma melhora na qualidade geral da malha (Figura 64). A partir da análise desses dados, usando os critérios definidos, foi possível classificar essa malha como "Altamente isotrópica" (A.I).

Figura 64 – Resultado do Experimento 20 (Pyremesh). Malha processada (esquerda). Qualidade da malha (direita).



Fonte: Autoria própria.

6.5 Discussão dos Resultados

A partir dos resultados apresentados nesse capítulo e resumidos na Tabela 7, pode-se observar as particularidades de cada uma dessas técnicas. A técnica de *remeshing* Greedy (CDT) apresentou consistentemente um desempenho bastante tímido durante os experimentos, além de não interferir na complexidade das malhas de forma consistente, na maioria dos casos a técnica não resulta em uma mudança aparente, e as vezes, melhorando um pouco a qualidade, e outras, até piorando a qualidade da malha.

Já a técnica de *remeshing* Variational (CVT), apesar de também não influenciar na complexidade das malhas, teve um desempenho bem melhor, resultando em malhas altamente isotrópicas em quase todos os seus experimentos.

A técnica de *remeshing* Uniform foi a que teve o melhor desempenho em relação a qualidade de malha, resultando em malhas isotrópicas em 75% dos seus experimentos. Entretanto, essa técnica apresenta um comportamento inconsistente quanto à complexidade da malha resultante, em metade dos casos há um aumento considerável na complexidade (chegando a um aumento de até 502.07%), e na outra metade uma redução na complexidade (de até 27.47%), o que pode ser considerado um problema.

Por outro lado a técnica de *remeshing* Adaptive, que apesar de não ter tido um desempenho tão bom em relação a qualidade da malha quanto a técnica uniforme, ainda assim resultou em malhas altamente isotrópicas em quase todos seus experimentos (75%), e ainda foi consistente quanto a complexidade da malha resultante, reduzindo a complexidade em todos os seus casos (redução de até 37.92%), o que pode ser considerado um aspecto positivo da técnica.

E finalmente a técnica de *remeshing* Pyremesh, que foi a técnica que mais impactou na complexidade da malha, aumentando consideravelmente a complexidade em todos seus experimentos (chegando a um aumento de até 1002.90%). Foi a técnica com maior consistência em relação a qualidade da malha gerada, resultando em malhas altamente isotrópicas em 100% dos seus experimentos, mas ainda assim deve-se considerar se o alto custo de complexidade da malha compensa a qualidade resultante.

Tabela 7 – Comparação das Técnicas

Técnica	Modelo	Desvio na complexidade	Qualidade da malha
Greedy (CDT)	Patch	0.00%	Anisotrópico
	Screwdriver	0.00%	Anisotrópico
	Iphigenie	0.00%	Anisotrópico
	Egea	0.00%	Altamente isotrópico
Variational (CVT)	Patch	0.00%	Anisotrópico
	Screwdriver	0.00%	Anisotrópico
	Iphigenie	0.00%	Anisotrópico
	Egea	0.00%	Altamente isotrópico
Uniform	Patch	+502.07%	Isotrópico
	Screwdriver	-15.38%	Isotrópico
	Iphigenie	+95.76%	Anisotrópico
	Egea	-27.47%	Isotrópico
Adaptative	Patch	-37.92%	Altamente isotrópico
	Screwdriver	-7.04%	Altamente isotrópico
	Iphigenie	-10.06%	Anisotrópico
	Egea	-3.04%	Altamente isotrópico
Pyremesh	Patch	+1002.90%	Altamente isotrópico
	Screwdriver	+58.46%	Altamente isotrópico
	Iphigenie	+167.94%	Altamente isotrópico
	Egea	+37.25%	Altamente isotrópico

Fonte: Autoria própria.

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho propõe um estudo comparativo das técnicas de *remeshing* baseada em triângulos no melhoramento da malha de modelos tridimensionais, e ao longo dele, pode-se observar as particularidades de cada uma dessas técnicas.

A partir de todos os dados obtidos com os experimentos, concluiu-se que certas técnicas são melhores que outra em certos casos. Se a aplicação não se importa com o aumento da complexidade, e sim com a qualidade geral da malha resultante, a melhor opção seria a técnica Uniform, seguido da técnica Pyremesh, pois ambas apresentam resultados de alta qualidade, em sacrifício do alto ganho na complexidade. Entretanto, caso a aplicação necessite de uma técnica mais econômica quanto a complexidade, mesmo sacrificando um pouco a qualidade, a técnica Variational (CVT) é a escolha mais apropriada, pois apresenta resultados de boa qualidade sem interferir complexidade da malha, seguido da técnica Adaptive, com desempenho um pouco pior, mas com a vantagem de reduzir a complexidade da malha.

REFERÊNCIAS

- ALLIEZ, P.; UCELLI, G.; GOTSMAN, C.; ATTENE, M. Recent advances in remeshing of surfaces. In: **Shape analysis and structuring**. [S.l.]: Springer, 2008. p. 53–82.
- ALLIEZ, P.; VERDIRE, E. C. D.; DEVILLERS, O.; ISENBURG, M. Isotropic surface remeshing. In: IEEE. **2003 Shape Modeling International**. [S.l.], 2003. p. 49–58.
- AURENHAMMER, F. Voronoi diagrams—a survey of a fundamental geometric data structure. **ACM Computing Surveys (CSUR)**, ACM, v. 23, n. 3, p. 345–405, 1991.
- BEN-CHEN, M. **Geometry Processing Algorithms**. Stanford Computer Graphics Laboratory, 2012. Disponível em: <http://graphics.stanford.edu/courses/cs468-12-spring/LectureSlides/13_Remeshing1.pdf>.
- BOISSONNAT, J.-D.; OUDOT, S. Provably good sampling and meshing of surfaces. **Graphical Models**, Elsevier, v. 67, n. 5, p. 405–451, 2005.
- BOTSCH, M.; KOBBELT, L. A remeshing approach to multiresolution modeling. In: ACM. **Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing**. [S.l.], 2004. p. 185–192.
- BOTSCH, M.; KOBBELT, L.; PAULY, M.; ALLIEZ, P.; LÉVY, B. **Polygon mesh processing**. [S.l.]: AK Peters/CRC Press, 2010.
- CHRSCHN. **Polygon mesh**. Wikimedia Foundation, 2007. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polygon_mesh>.
- CIGNONI, P.; CALLIERI, M.; CORSINI, M.; DELLEPIANE, M.; GANOVELLI, F.; RANZUGLIA, G. MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool. In: SCARANO, V.; CHIARA, R. D.; ERRA, U. (Ed.). **Eurographics Italian Chapter Conference**. [S.l.]: The Eurographics Association, 2008. ISBN 978-3-905673-68-5.
- DUNYACH, M.; VANDERHAEGHE, D.; BARTHE, L.; BOTSCH, M. Adaptive remeshing for real-time mesh deformation. In: . [S.l.: s.n.], 2013.
- FUKUDA, K. *et al.* Frequently asked questions in polyhedral computation. **Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne and Zurich, Switzerland. Available at: ftp://ftp.ife.math.ethz.ch/pub/fukuda/reports/polyfaq040618.pdf**, Citeseer, 2004.
- GEOMETRYHUB. **Magic3D**. 2020.
- KOBBELT, L. P.; BAREUTHER, T.; SEIDEL, H.-P. Multiresolution shape deformations for meshes with dynamic vertex connectivity. In: WILEY ONLINE LIBRARY. **Computer Graphics Forum**. [S.l.], 2000. v. 19, n. 3, p. 249–260.
- MÃ¶BIUS, J.; KOBBELT, L. Openflipper: An open source geometry processing and rendering framework. In: BOISSONNAT, J.-D.; CHENIN, P.; COHEN, A.; GOUT, C.; LYCHE, T.; MAZURE, M.-L.; SCHUMAKER, L. (Ed.). **Curves and Surfaces**. Springer Berlin / Heidelberg, 2012, (Lecture Notes in Computer Science, v. 6920). p. 488–500. ISBN 978-3-642-27412-1. 10.1007/978-3-642-27413-8_31. *Disponvelem* : <>.

- PARTHASARATHY, V.; GRAICHEN, C.; HATHAWAY, A. A comparison of tetrahedron quality measures. **Finite Elements in Analysis and Design**, Elsevier, v. 15, n. 3, p. 255–261, 1994.
- SIEGER, D.; BOTSCH, M. **The Polygon Mesh Processing Library**. 2020. [Http://www.pmp-library.org](http://www.pmp-library.org).
- STERNISHA, K. **Freebie: ArtMesh - Mesh generation software**. 2016. Disponível em: <https://www.toolfarm.com/news/freebie_artmesh_mesh_generation_software1/>.
- TOBLER, R. F.; MAIERHOFER, S. A mesh data structure for rendering and subdivision. Václav Skala-UNION Agency, 2006.
- VORSATZ, J.; RÖSSL, C.; SEIDEL, H.-P. Dynamic remeshing and applications. In: **ACM. Proceedings of the eighth ACM symposium on Solid modeling and applications**. [S.l.], 2003. p. 167–175.
- ZHONG, Z.; GUO, X.; WANG, W.; LÉVY, B.; SUN, F.; LIU, Y.; MAO, W. *et al.* Particle-based anisotropic surface meshing. **ACM Trans. Graph.**, Citeseer, v. 32, n. 4, p. 99–1, 2013.
- ZHOU, Q. Pymesh—geometry processing library for python. **Software available for download at <https://github.com/PyMesh/PyMesh>**, 2019.