



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

LUCAS ANDRADE BENEVIDES

**UMA TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO DE MALHAS COM RUÍDOS POR FILTRAGEM
BILATERAL COM PRÉ-PROCESSAMENTO**

FORTALEZA

2017

LUCAS ANDRADE BENEVIDES

UMA TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO DE MALHAS COM RUÍDOS POR FILTRAGEM
BILATERAL COM PRÉ-PROCESSAMENTO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Computação Gráfica

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Bento Cavalcante Neto

Coorientador: Prof. Dr. Creto Augusto Vidal

FORTALEZA

2017

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)

A568t Andrade Benevides, Lucas.
Uma técnica de otimização de malhas com ruídos por filtragem bilateral com pré-processamento / Lucas
Andrade Benevides. – 2017.
55 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, , Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Joaquim Bento Cavalcante Neto.
Coorientação: Prof. Dr. Creto Augusto Vidal.

1. Processamento de geometria. 2. Otimização de malhas. 3. Remoção de ruídos em malhas. 4. Filtragem
de malha. I. Título.

CDD

LUCAS ANDRADE BENEVIDES

UMA TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO DE MALHAS COM RUÍDOS POR FILTRAGEM
BILATERAL COM PRÉ-PROCESSAMENTO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Computação Gráfica

Aprovada em: 29/11/2017

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Joaquim Bento Cavalcante
Neto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Creto Augusto Vidal (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dr^a. Emanuele Marques dos Santos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Evandro Parente Junior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Valber e Herbene que sempre se esforçaram e investiram em mim e no meu futuro. À minha irmã Raiza pela companhia e apoio. Aos meus tios, primos e avós que sempre se importaram comigo e ajudaram na minha criação.

Aos professores orientadores, Joaquim Bento e Creto Vidal, por terem sempre acreditado no meu trabalho e constantemente me incentivado a continuá-lo.

A todos os colegas de laboratório e amigos, pelas discussões, revisões e prestações de ajuda em momentos onde me via sem conseguir prosseguir no trabalho.

Agradeço ao Programa de Mestrado e Doutorado em Ciência da Computação (MDCC) da Universidade Federal do Ceará (UFC) e ao Grupo de Pesquisa em Computação Gráfica, Realidade Virtual e Animação (CRAb), pela oportunidade concedida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo apoio financeiro para minha pesquisa de mestrado via bolsa de estudos.

RESUMO

Modelos de alta resolução, baseados em malha, são principalmente gerados por scanners ópticos 3D. Esta abordagem de aquisição de malha introduz ruídos e irregularidades, de várias fontes distintas, na malha, fazendo com que ela seja inutilizável em aplicações práticas onde modelos de alta qualidade são necessários. Otimizar malhas com ruído, enquanto preservam-se suas características geométricas, é uma tarefa desafiadora. Muitos métodos anisotrópicos de otimização de malha, inspirados nos conceitos de Processamento de Imagens, foram propostos na década passada tentando resolver este problema. Eles obtêm bons resultados na maioria dos casos, falhando em otimizar malhas com grande quantidade de ruído ou com amostragem de elementos extremamente ruins. É apresentada, neste trabalho, uma técnica de filtragem de normais com pré-processamento baseada no filtro bilateral conjunto (*joint bilateral filtering*), a ser aplicada, principalmente, em malhas com amostragem de elementos extremamente ruim. A técnica consiste, basicamente, em uma abordagem de dois passos: primeiramente, a qualidade dos elementos da malha é aprimorada detectando e remalhando regiões com amostragem de elementos ruim; consecutivamente, é aplicada a filtragem bilateral conjunta nas normais das faces da malha seguida de uma atualização da posição dos vértices de acordo com o novo campo de normais filtradas. É mostrado que, ao empregar esse novo método, podem-se produzir melhores resultados ao otimizar malhas com amostragem de elementos irregular. A eficácia do método proposto é validada através de experimentos considerando diferentes modelos baseados em malha.

Palavras-chave: Processamento de geometria. Otimização de malhas. Remoção de ruídos em malhas. Filtragem de malha.

ABSTRACT

High-resolution mesh models are mainly generated by advanced 3D optical laser scanners. This mesh acquisition approach introduces noise from various sources and irregularities on the mesh, making it unusable in practical applications where high quality models are required. Optimizing a noisy mesh, while preserving its geometric features, is a challenging task. Many anisotropic mesh optimization methods, inspired by the concepts in image processing, were proposed in the past decade attempting to solve this problem. They attain fine results in most cases, failing on optimizing meshes with large amounts of noise or with extremely irregular sampling. We present, in this work, a preprocessed normal filtering technique based on the joint bilateral filtering to be applied mainly on meshes with extremely irregular sampling. It is a two-stage approach: first, we improve the quality of the mesh elements by detecting and re-meshing irregular sampling regions; subsequently, we apply a joint bilateral filtering to the face normals followed by the vertex position update according to the new face normals field. We show that, by employing this new method, we can produce better results optimizing such irregular sampling meshes. The effectiveness of the proposed method is validated through experiments evaluation that considers different mesh models.

Keywords: Geometry processing. Mesh optimization. Mesh denoising. Mesh filtering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aquisição de modelo do mundo real por scanner 3D.	13
Figura 2 – Exemplo de modelo 3D baseado em malha e baseado em superfície.	14
Figura 3 – Exemplos de modelos 3D com ruídos derivados do processo de aquisição por scanner.	15
Figura 4 – Laplaciano aplicado ao modelo <i>cow</i> . Redução de volume e perda de características podem ser notadas ao longo da aplicação do operador.	16
Figura 5 – Definição de \mathbf{d}_i para mover os vértices produzidos pelo <i>Laplaciano</i> . O vértice \mathbf{o}_i não representado na figura, é o vértice na sua posição original antes de todas as iterações do Laplaciano.	17
Figura 6 – Esquerda: malha original, malha com ruído, 3 iterações de Laplace. Direita: malha original, malha com ruído, 3 iterações da técnica apresentada em (VOLLMER <i>et al.</i> , 1999).	18
Figura 7 – Definição do operador <i>umbrella</i> . O ponto p será movido pela média ponderada dos seus vizinhos q_1, \dots, q_n	18
Figura 8 – Otimização Laplaciana global com restrição de vértices. Os vértices da restrição estão na cor preta em destaque: (a) malha original; (b) malha otimizada.	19
Figura 9 – Resultado do uso da técnica de (LIU <i>et al.</i> , 2007), no modelo <i>dragon</i> , para remoção de ruídos: (a) o modelo <i>dragon</i> com ruído; (b) o modelo <i>dragon</i> otimizado com restrições de vértices e baricentro de faces.	20
Figura 10 – (a) A predição $\Pi_q(p)$ para um ponto p , baseado na superfície de q , é a projeção de p no plano tangente formado pela superfície de q . Pontos em regiões de linhas características (arestas) resultam em predições mais distantes e, portanto, causando menos influência. (b) Normais com ruídos podem levar a más predições. (c) Normais melhoradas mitigam este problema, pois os planos tangentes são construídos baseados nelas.	21

Figura 11 – (a) Cima: Fotografia tirada em um ambiente escuro, a imagem possui ruído e embaçamento. Baixo: Mesma fotografia com flash, provendo uma imagem com maiores detalhes, porém plana e possuindo sombras indesejadas na silhueta dos objetos. (b) Ampliação da imagem mostrando o ruído presente. (c) Técnica de (EISEMANN; DURAND, 2004) misturando as duas imagens (com flash e sem flash) para transferir a luz do ambiente à imagem principal.	22
Figura 12 – Remoção de ruídos do modelo cilindro (a esquerda). A formulação local (meio) recupera, mais eficientemente, as características geométricas do que a formulação global (direita) quando o nível de ruído é elevado.	23
Figura 13 – <i>Kernels</i> f_1 e f_2 definidos em relação a uma esfera e a uma textura, respectivamente.	23
Figura 14 – Otimização do modelo <i>Filgree</i> usando a técnica proposta em (WEI <i>et al.</i> , 2013). A primeira linha mostra a geometria do modelo com ruído (esquerda) e do modelo otimizado (direita). A linha do meio ilustra a visualização da curvatura média, e a linha de baixo mostra os fragmentos ampliados.	24
Figura 15 – Da esquerda para a direita: Modelo sem ruído (<i>ground-truth</i>), <i>ground-truth</i> mostrando a malha associada ao modelo, modelo com ruído sintético, resultado da técnica de (ZHANG <i>et al.</i> , 2015).	25
Figura 16 – Fluxo geral da técnica proposta: Primeiramente é selecionado um ou mais <i>patches</i> de faces de qualidade inferior às demais, representados pela cor verde clara na figura; em sequência esses <i>patches</i> são apagados e melhores elementos são gerados em seu lugar. Como último passo, k iterações são executadas intercalando o filtro bilateral nas normais das faces e a atualização da posição dos vértices baseado nessas normais filtradas.	27
Figura 17 – Filtro bilateral sem pré-processamento aplicado ao modelo <i>block</i> com ruído artificial. Na área demarcada pode-se notar perda de característica do modelo original.	27
Figura 18 – Uma seleção válida de <i>patches</i> a serem utilizados no passo de pré-processamento. Em vermelho são mostradas as normais dos triângulos pertencentes aos <i>patches</i> selecionados.	28

Figura 19 – Exemplo do processo de seleção de <i>patches</i> e criação de novas malhas. Da esquerda para a direita: malha original com ruído M , malha suporte M_p e malha M'	29
Figura 20 – Visão geral do processo de geração de malha de superfície descrito em (MIRANDA <i>et al.</i> , 2009).	29
Figura 21 – Processo de encontrar a posição de um ponto ideal para a criação de um novo triângulo.	30
Figura 22 – Aresta AB de borda detectada pela grande diferença entre as normais das suas duas faces incidentes.	32
Figura 23 – Um <i>patch</i> de triângulos de um modelo com ruído mostrando a divergência das normais de suas faces. Dessa forma, as normais não funcionam como um sinal guia confiável para a filtragem bilateral e não indicam informações geométricas precisas.	32
Figura 24 – Um <i>patch</i> de faces e suas arestas. Linhas tracejadas ilustram as arestas pertencentes ao conjunto E_p	33
Figura 25 – Cálculo da função de consistência para todos os <i>patches</i> que a face f_i (em azul) está contida. O <i>patch</i> P com menor valor (destacado em vermelho) de função de consistência $H(P)$, calculado pela Equação 3.4, será o escolhido, e sua normal média será atribuída à face f_i	34
Figura 26 – Diferença da definição de vizinhança. A esquerda temos a vizinhança imediata de f_i ; a direita, a vizinhança próxima de f_i , onde o parâmetro r , que representa o raio, é definido pelo usuário.	35
Figura 27 – Modelos utilizados na técnica proposta. Na primeira metade da imagem temos <i>block</i> e <i>carter</i> , seguidos do modelo <i>mechanic</i> em duas visões diferentes. Mais a direita temos o modelo <i>angel</i> que foi digitalizado do mundo real a partir de um <i>scanner</i> 3D.	37
Figura 28 – Processo de criação dos modelos de entrada. A esquerda temos os modelos <i>ground-truth</i> : <i>block</i> , <i>carter</i> e <i>mechanic</i> em duas visões diferentes. As regiões em destaque representam a zona onde a qualidade de triangulação foi propositalmente reduzida. A direita tem-se o segundo passo da criação dos modelos artificiais: a aplicação de um ruído branco aleatório e artificial ao longo das normais dos vértices.	38

Figura 29 – A distância de <i>Hausdorff</i> entre dois subconjuntos X e Y : $d_H(X, Y)$ irá resultar na maior das duas distâncias.	40
Figura 30 – Comparação da técnica proposta com as técnicas de (ZHANG <i>et al.</i> , 2015), (SUN <i>et al.</i> , 2007) e (ZHENG <i>et al.</i> , 2011) para o modelo <i>block</i> . Primeira linha: <i>ground-truth</i> , <i>ground-truth</i> com malha, modelo com ruído sintético, modelo com ruído sintético e malha. Segunda linha: técnicas de (ZHANG <i>et al.</i> , 2015), (SUN <i>et al.</i> , 2007), (ZHENG <i>et al.</i> , 2011) e a técnica proposta, respectivamente. Terceira linha: as mesmas técnicas da linha anterior mostrando as malhas dos modelos.	42
Figura 31 – Comparação da técnica proposta com as técnicas de (ZHANG <i>et al.</i> , 2015), (SUN <i>et al.</i> , 2007) e (ZHENG <i>et al.</i> , 2011) para o modelo <i>carter</i> . Primeira linha: <i>ground-truth</i> , <i>ground-truth</i> com malha, modelo com ruído sintético, modelo com ruído sintético e malha. Segunda linha: técnicas de (ZHANG <i>et al.</i> , 2015), (SUN <i>et al.</i> , 2007), (ZHENG <i>et al.</i> , 2011) e a técnica proposta, respectivamente. Terceira linha: as mesmas técnicas da linha anterior mostrando as malhas dos modelos.	43
Figura 32 – Comparação da técnica proposta com as técnicas de (ZHANG <i>et al.</i> , 2015), (SUN <i>et al.</i> , 2007) e (ZHENG <i>et al.</i> , 2011) para o modelo <i>mechanic</i> . Primeira linha: <i>ground-truth</i> , <i>ground-truth</i> com malha, modelo com ruído sintético, modelo com ruído sintético e malha. Segunda linha: técnicas de (ZHANG <i>et al.</i> , 2015), (SUN <i>et al.</i> , 2007), (ZHENG <i>et al.</i> , 2011) e a técnica proposta, respectivamente. Terceira linha: as mesmas técnicas da linha anterior mostrando as malhas dos modelos.	44
Figura 33 – Comparação da técnica proposta com as técnicas de (ZHANG <i>et al.</i> , 2015), (SUN <i>et al.</i> , 2007) e (ZHENG <i>et al.</i> , 2011) para o modelo <i>mechanic</i> . Primeira linha: <i>ground-truth</i> , <i>ground-truth</i> com malha, modelo com ruído sintético, modelo com ruído sintético e malha. Segunda linha: técnicas de (ZHANG <i>et al.</i> , 2015), (SUN <i>et al.</i> , 2007), (ZHENG <i>et al.</i> , 2011) e a técnica proposta, respectivamente. Terceira linha: as mesmas técnicas da linha anterior mostrando as malhas dos modelos.	45

Figura 34 – Visualização do modelo <i>block</i> e um histograma dos 6 milhões de pontos de amostragem e seus respectivos valores de distância de <i>Hausdorff</i> . Primeira linha: técnicas de (ZHANG <i>et al.</i> , 2015) e (SUN <i>et al.</i> , 2007). Segunda linha: técnica (ZHENG <i>et al.</i> , 2011) e a técnica proposta.	46
Figura 35 – Visualização do modelo <i>carter</i> e um histograma dos 6 milhões de pontos de amostragem e seus respectivos valores de distância de <i>Hausdorff</i> . Primeira linha: técnicas de (ZHANG <i>et al.</i> , 2015) e (SUN <i>et al.</i> , 2007). Segunda linha: técnica (ZHENG <i>et al.</i> , 2011) e a técnica proposta.	47
Figura 36 – Visualização do modelo <i>mechanic</i> e um histograma dos 6 milhões de pontos de amostragem e seus respectivos valores de distância de <i>Hausdorff</i> . Primeira linha: técnicas de (ZHANG <i>et al.</i> , 2015) e (SUN <i>et al.</i> , 2007). Segunda linha: técnica (ZHENG <i>et al.</i> , 2011) e a técnica proposta.	48
Figura 37 – Visualização do modelo <i>mechanic</i> e um histograma dos 6 milhões de pontos de amostragem e seus respectivos valores de distância de <i>Hausdorff</i> . Primeira linha: técnicas de (ZHANG <i>et al.</i> , 2015) e (SUN <i>et al.</i> , 2007). Segunda linha: técnica (ZHENG <i>et al.</i> , 2011) e a técnica proposta.	49
Figura 38 – Técnica proposta utilizada no modelo <i>angel</i> . Acima: modelo <i>angel</i> com ruído e ao lado com ruído e malha. Abaixo: o resultado da técnica proposta aplicada ao modelo <i>angel</i>	50
Figura 39 – Detalhe da região do olho do modelo <i>angel</i> . Da esquerda para a direita: modelo <i>angel</i> original com ruído, resultado da técnica proposta sem o passo de pré-processamento, resultado da técnica proposta com passo de pré-processamento.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação da técnica proposta com (ZHANG <i>et al.</i> , 2015), (SUN <i>et al.</i> , 2007) e (ZHENG <i>et al.</i> , 2011).	51
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Motivação	13
1.2	Objetivos e Contribuições	14
1.3	Organização do Trabalho	15
2	TRABALHOS RELACIONADOS	16
2.1	Métodos isotrópicos	16
2.2	Métodos anisotrópicos	20
2.3	Considerações Finais	24
3	TÉCNICA PROPOSTA	26
3.1	Descrição Geral	26
3.1.1	<i>Pré-processamento</i>	27
3.1.1.1	<i>Seleção de patches</i>	28
3.1.1.2	<i>Reconstrução</i>	28
3.1.2	<i>Processo de filtragem para otimização da malha</i>	31
3.1.2.1	<i>Filtragem bilateral das normais das faces</i>	31
3.1.2.2	<i>Atualizando vértices</i>	34
4	EXEMPLOS E RESULTADOS	37
4.1	Modelos	37
4.2	Métricas de Qualidade	39
4.3	Resultados	41
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	52
5.1	Principais Contribuições	52
5.2	Trabalhos Futuros	52
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Com o crescente uso de scanners ópticos e a laser (Figura 1), modelos 3D (baseados em malha) de alta resolução puderam ser adquiridos com mais facilidade e, dessa forma, utilizados em uma grande variedade de aplicações. Tais scanners, mesmo com resultados fidedignos, falham em produzir modelos completamente sem falhas e ruídos, fazendo com que seu uso seja impraticável em aplicações que necessitam de modelos com alta resolução.

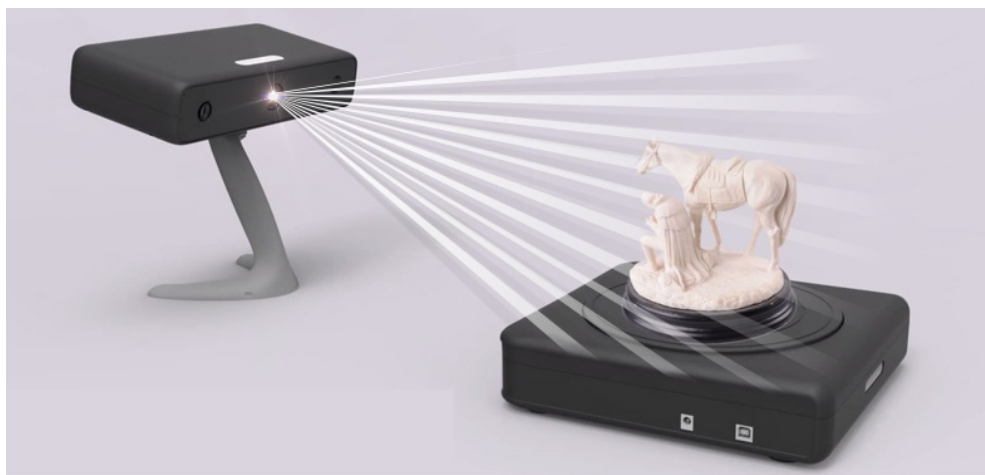


Figura 1 – Aquisição de modelo do mundo real por scanner 3D.

Fonte: www.3dprintingsystems.com

No entanto, otimizar uma malha com ruídos, preservando as suas características geométricas, não é uma tarefa simples. Efeitos colaterais podem ocorrer, como perda de características e retração ou expansão de volume. Para superar esses desafios, muitas técnicas de otimização de malhas foram propostas nos últimos anos. Essas técnicas fazem parte de uma área chamada Processamento de Geometria, também conhecida como Processamento de Malha, que utiliza conceitos da matemática aplicada, ciência da computação e engenharia para desenvolver algoritmos eficientes para aquisição, reconstrução, análise, manipulação, simulação e transmissão de modelos 3D complexos. Aplicações de algoritmos de processamento de malha cobrem desde áreas de multimídia, entretenimento, CAD, à computação biomédica e científica e engenharia reversa. O nome sugere uma analogia ao processamento de sinais e processamento de imagem. Muitos conceitos, estruturas de dados e algoritmos são diretamente análogos. A técnica de otimização de malha apresentada nesta dissertação se baseia diretamente nos conceitos apresentados em suavização de imagens.

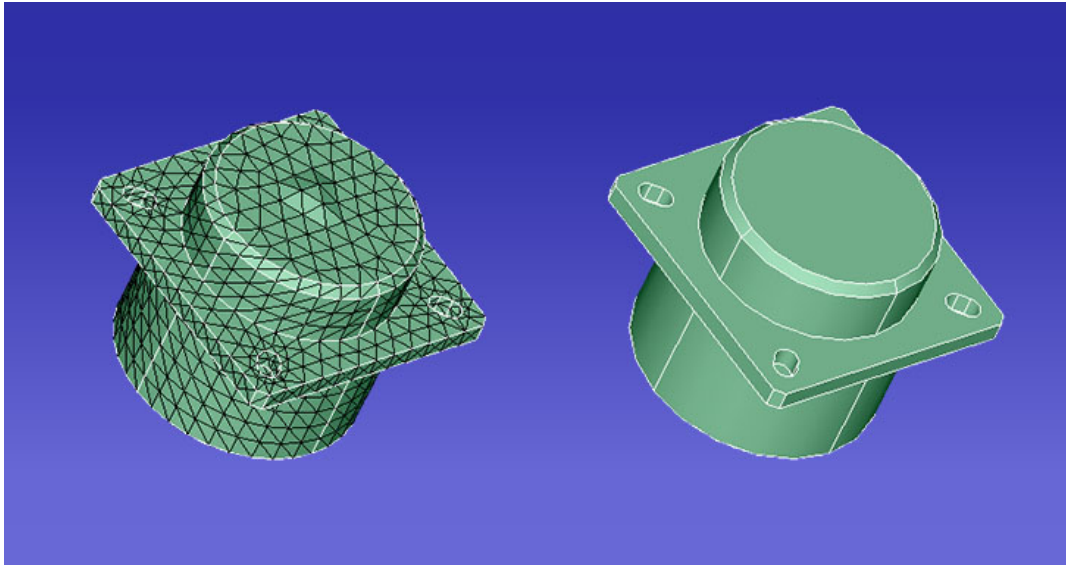


Figura 2 – Exemplo de modelo 3D baseado em malha e baseado em superfície.

Fonte: www.altairhyperworks.com

De forma geral, o processamento de geometria trabalha com modelos, geralmente 2D ou 3D, baseados em malha (Figura 2). Processar um modelo envolve três estágios: aquisição, tratamento e finalização. Um modelo pode ser criado por programas de modelagem, representações matemáticas ou scanner. Depois que o modelo é adquirido, ele passa por um processo de otimização, onde todas as falhas e ruídos (Figura 3) serão tratados e eliminados. Finalmente, na última fase do processamento, o modelo pode ser utilizado como produto (impressoras 3D) ou em algum outro programa.

1.2 Objetivos e Contribuições

O principal objetivo deste trabalho é apresentar uma técnica de otimização de malhas de filtragem bilateral com um passo de pré-processamento. A técnica proposta visa otimizar, principalmente, malhas que possuem regiões com elementos de baixa qualidade. Entretanto, o método apresentado otimiza com sucesso qualquer tipo de malha com ruído. A técnica foi projetada para atender aos seguintes propósitos:

- Detectar regiões com elementos de baixa qualidade que possam atrapalhar a otimização da malha e, então, gerar melhores elementos nessas regiões;
- Suavizar e remover com sucesso ruídos da malha;
- Manter, ao máximo, todas as características, detalhes e volume da malha.

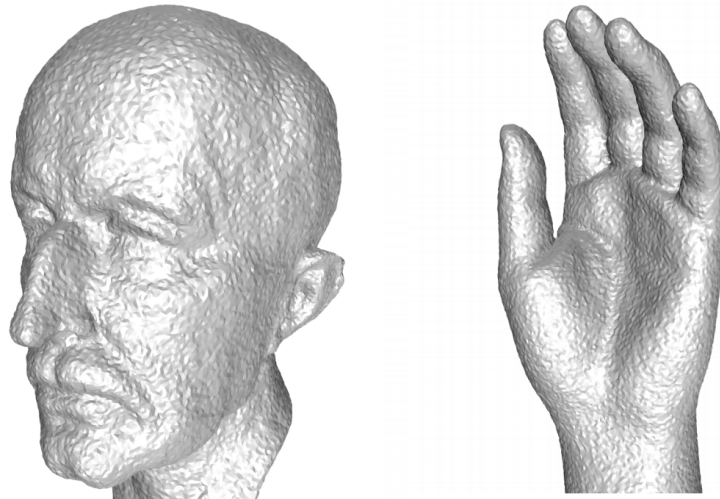


Figura 3 – Exemplos de modelos 3D com ruídos derivados do processo de aquisição por scanner.

Fonte: www.altairhyperworks.com

1.3 Organização do Trabalho

O restante deste trabalho está organizado em quatro capítulos. No Capítulo 2, apresenta-se uma visão geral das técnicas de otimização de malhas com ruídos, dividindo-as em categorias e salientando suas vantagens, desvantagens e propósitos. No Capítulo 3, é apresentada a técnica de otimização de malhas com ruído desenvolvida, detalhando todo o processo e a criação dos modelos de teste. No Capítulo 4, são apresentados os resultados da aplicação da técnica desenvolvida nos modelos de teste criados e em um modelo do mundo real, para demonstrar a sua eficácia. Os resultados obtidos são analisados por métricas para que eles sejam validados com sucesso. Por fim, no Capítulo 5, são expostas as conclusões sobre o trabalho e ideias para futuras melhorias.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo, são apresentados os trabalhos relacionados na área de otimização de malhas com ruídos, mostrando as vantagens e desvantagens de cada técnica apresentada. Eles podem ser divididas basicamente em duas categorias: técnicas *isotrópicas* e *anisotrópicas*. Métodos isotrópicos são mais simples e só consideram informações intrínsecas ao modelo, enquanto métodos anisotrópicos, dentre os quais a técnica proposta se enquadra, usam outras informações, não inerentes diretamente ao modelo, para decidir como a filtragem deve ocorrer.

2.1 Métodos isotrópicos

O mais simples, e de melhor custo-benefício, método isotrópico é a suavização *Laplaciana* (Figura 4), que move, iterativamente, todos os vértices do modelo em direção ao centro dos seus vizinhos, definindo, para cada vértice, a seguinte equação:

$$x_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j, \quad (2.1)$$

onde N representa a quantidade de vértices adjacentes ao vértice de índice i , x_j é a posição do vértice de índice j adjacente ao vértice de índice i , e x_i é a nova posição do vértice de índice i .

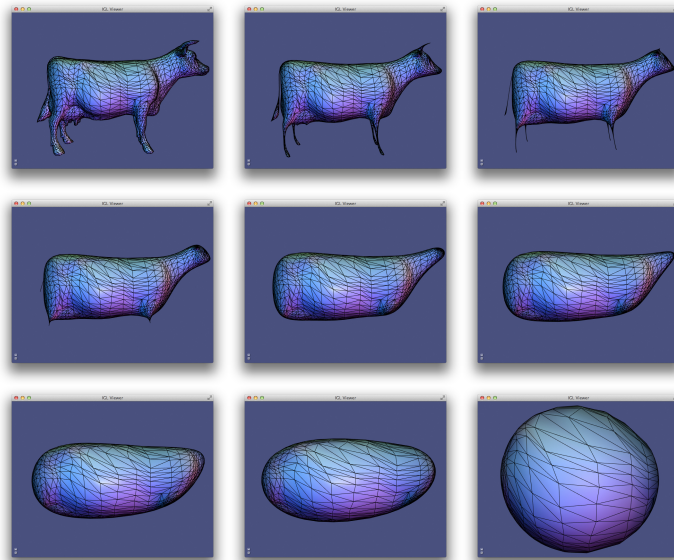


Figura 4 – Laplaciano aplicado ao modelo *cow*. Redução de volume e perda de características podem ser notadas ao longo da aplicação do operador.

Fonte: <http://libigl.github.io/>

Apesar desta técnica ser muito rápida e simples, ela pode causar redução ou ampliação de volume e perda de características da malha, caso aplicada seguidas vezes, tornando-a não

recomendável em um problema real.

Algumas melhorias foram apresentadas em (VOLLMER *et al.*, 1999) tentando resolver o problema da redução do volume ao aplicar uma operação de mover o vértice à sua posição original, depois de cada iteração. O vértice modificado \mathbf{p}_i (produzido pelo *Laplaciano*) é movido em direção ao vértice \mathbf{q}_i e (ou) em direção ao vértice original \mathbf{o}_i pela média das diferenças:

$$\mathbf{d}_i = -(\beta \mathbf{b}_i + \frac{1 - \beta}{|Adj(i)|} \sum_{j \in Adj(i)} \mathbf{b}_j), \quad (2.2)$$

onde $\beta \in [0, 1]$ é um escalar que define a influência do vértice central e seus vizinhos, $Adj(i)$ é o conjunto de vértices na vizinhança de \mathbf{q}_i e $\mathbf{b}_i = \mathbf{p}_i - (\alpha \mathbf{o}_i + (1 - \alpha) \mathbf{q}_i)$, onde $\alpha \in [0, 1]$ define a influência do vértice anterior \mathbf{q}_i e do vértice original \mathbf{o}_i . A Figura 5 ilustra a Equação 2.2.

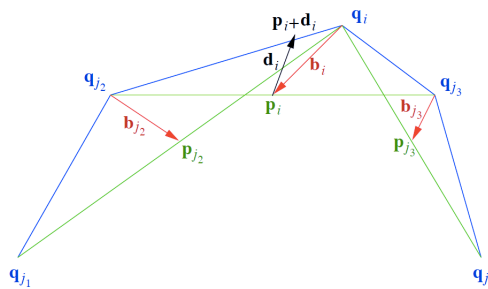


Figura 5 – Definição de \mathbf{d}_i para mover os vértices produzidos pelo *Laplaciano*. O vértice \mathbf{o}_i não representado na figura, é o vértice na sua posição original antes de todas as iterações do *Laplaciano*.

Fonte: (VOLLMER *et al.*, 1999)

Esta técnica simples consegue resolver o problema da redução do volume encontrada no algoritmo de *Laplace* (Figura 6) e possui algumas vantagens:

- pode produzir malhas com mesmo grau de suavização do algoritmo de *Laplace*;
- preserva forma e volume da malha;
- rápida e de fácil implementação.

Porém, só apresenta bons resultados para modelos mais simples. Por ser uma técnica antiga, modelos mais complexos, como encontramos atualmente, não são contemplados.

Em (LIU *et al.*, 2007) um operador de otimização global é apresentado para malhas arbitrárias. Este operador global é composto de dois termos principais: operador Laplaciano global e condições de restrição para manter a fidelidade da malha.

O operador Laplaciano, também conhecido como coordenadas diferenciais, pode ser

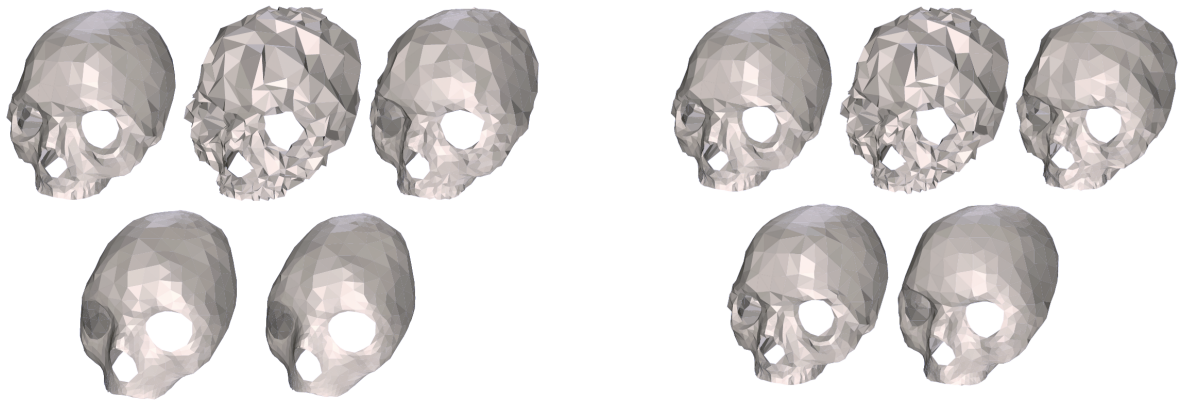


Figura 6 – Esquerda: malha original, malha com ruído, 3 iterações de Laplace. Direita: malha original, malha com ruído, 3 iterações da técnica apresentada em (VOLLMER *et al.*, 1999).

Fonte: (VOLLMER *et al.*, 1999)

aproximado em cada vértice pelo operador *umbrella* (Figura 7):

$$L(\mathbf{v}_i) = \sum_{j \in i^*} w_{ij}(\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i), \quad (2.3)$$

onde i^* é o conjunto de índices dos vértices vizinhos de \mathbf{v}_i , e w_{ij} é o peso da aresta (i, j) correspondendo ao vértice \mathbf{v}_i com $\sum_{j \in i^*} w_{ij} = 1$.

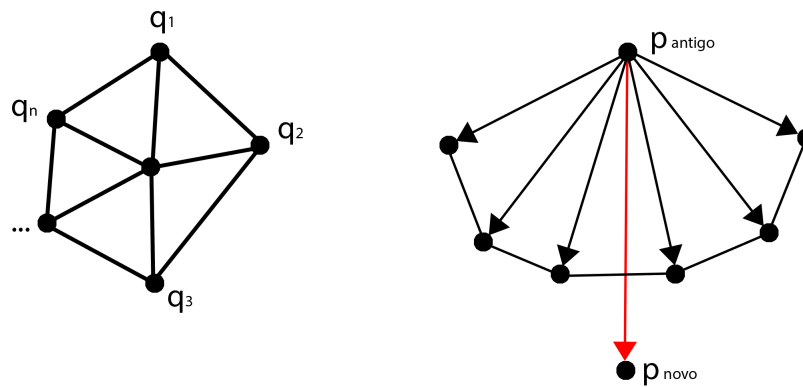


Figura 7 – Definição do operador *umbrella*. O ponto p será movido pela média ponderada dos seus vizinhos q_1, \dots, q_n .

Foi observado que o vértice \mathbf{v}_i permanece na média ponderada dos seus vizinhos imediatos (*1-ring*) se a seguinte equação for satisfeita:

$$\mathbf{v}_i - \sum_{j \in i^*} w_{ij} \mathbf{v}_j = 0, \quad (2.4)$$

portanto, isto também é considerado na criação do Laplaciano global. As condições de otimização global para todos os vértices é definida da seguinte forma:

$$\mathbf{LX} = 0, \quad (2.5)$$

onde \mathbf{L} é uma matriz $n \times n$ com elementos derivados de w_{ij} :

$$L_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ -w_{ij} & (i, j) \in E, \\ 0 & c.c., \end{cases} \quad (2.6)$$

onde X é o vetor coluna dos vértices correspondentes e E é o conjunto de arestas da malha. Formando, dessa forma, toda a restrição de otimização do Laplaciano global.

Restrições de vértices (Figura 8) e restrições de baricentro das faces também são aplicadas para manter características da malha. Esses vértices são detectados automaticamente ou com a ajuda do usuário.

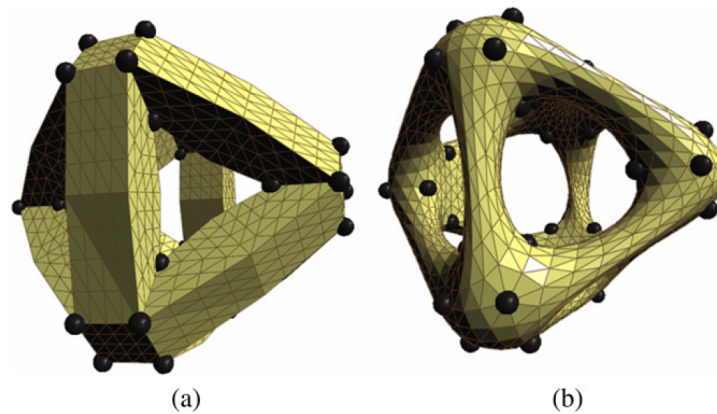


Figura 8 – Otimização Laplaciana global com restrição de vértices. Os vértices da restrição estão na cor preta em destaque: (a) malha original; (b) malha otimizada.

Fonte: (LIU *et al.*, 2007)

Apesar de resultados relevantes (Figura 9) e da grande contribuição dos métodos isotrópicos para a área de otimização de malhas, métodos baseados no Laplaciano geralmente não conseguem preservar características e volume da malha, enquanto remove os ruídos existentes.

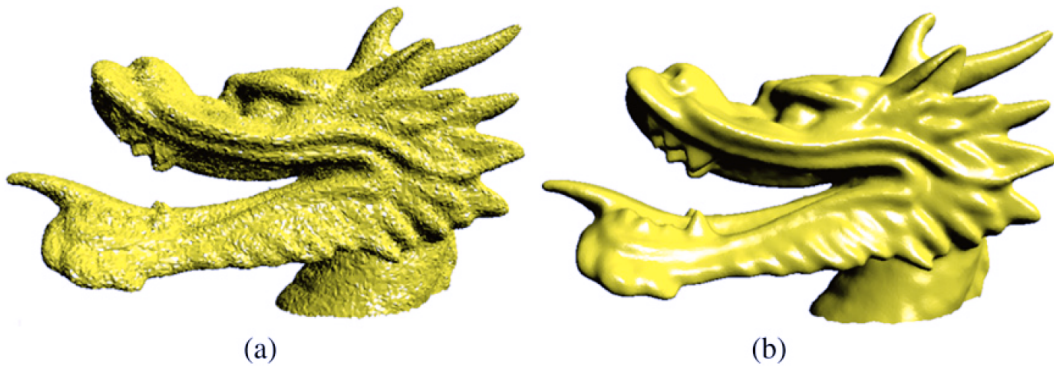


Figura 9 – Resultado do uso da técnica de (LIU *et al.*, 2007), no modelo *dragon*, para remoção de ruídos: (a) o modelo *dragon* com ruído; (b) o modelo *dragon* otimizado com restrições de vértices e baricentro de faces.

Fonte: (LIU *et al.*, 2007)

2.2 Métodos anisotrópicos

Neste mesmo contexto, uma variedade de métodos anisotrópicos foram criados no intuito de uma melhor preservação das características geométricas do modelo. Alguns deles se inspiraram nos conceitos propostos em processamento de imagens, como a filtragem bilateral (TOMASI; MANDUCHI, 1998), que é, essencialmente, um filtro não-linear, para suavização de imagens, que preserva características importantes, tais como as arestas. Esta técnica substitui o valor de intensidade de um pixel pela média ponderada dos valores de intensidade dos pixels próximos. Desta forma, um pixel só é influenciado por pixels próximos com intensidade similares. A filtragem bilateral para uma imagem $I(\mathbf{u})$, em uma coordenada $\mathbf{u} = (x, y)$ é definida em (TOMASI; MANDUCHI, 1998) como:

$$\hat{I}(\mathbf{u}) = \frac{\sum_{\mathbf{p} \in N(\mathbf{u})} W_c(\|\mathbf{p} - \mathbf{u}\|) W_s(|I(\mathbf{u}) - I(\mathbf{p})|) I(\mathbf{p})}{\sum_{\mathbf{p} \in N(\mathbf{u})} W_c(\|\mathbf{p} - \mathbf{u}\|) W_s(|I(\mathbf{u}) - I(\mathbf{p})|)}, \quad (2.7)$$

onde $N(\mathbf{u})$ é a vizinhança de pixels de \mathbf{u} , $W_c(x) = e^{-x^2/2\sigma_c^2}$, com parâmetro σ_c , representa o kernel Gaussiano de proximidade e $W_s(x) = e^{-x^2/2\sigma_s^2}$, com parâmetro σ_s , representa o kernel de intensidade.

O sucesso dessa abordagem em processamento de imagens levou à sua adaptação na área de processamento de geometria, em técnicas de remoção de ruído e suavização de malhas (FLEISHMAN *et al.*, 2003; JONES *et al.*, 2003; ZHENG *et al.*, 2011; SOLOMON *et al.*, 2014).

Em (FLEISHMAN *et al.*, 2003), os vértices são filtrados na direção da normal usando-se os seus vizinhos locais. A técnica parte do pressuposto de que todo vértice v na malha

com ruído está a uma distância d_v para a malha *ground-truth*, que é a malha completamente sem ruído utilizada para comparação do resultado da otimização da malha com ruído. Portanto essa distância é estimada aplicando o filtro iterativamente, atualizando v da seguinte forma:

$$v = v + d \cdot n, \quad (2.8)$$

onde n é o vetor normal associado a v , que irá direcionar o deslocamento de v . O filtro é aplicado a cada vértice, calculando o seu deslocamento e atualizando sua posição baseada na Equação 2.7.

Em (JONES *et al.*, 2003), uma técnica de filtragem bilateral de malhas com ruídos, baseada em estimativas estatísticas robustas, é apresentada. O modelo se baseia na afirmação de que uma técnica de suavização, que preserva as características da malha, pode ser vista meramente como um problema de estimar uma superfície na presença de *outliers*. A extensão de métodos estatísticos robustos para técnicas de filtragem de superfície não é algo trivial. Para a obtenção da suavidade de uma superfície, são definidos preditores locais de primeira ordem (Figura 10). Com um estimador robusto, são achadas as novas posições de cada vértice como uma soma ponderada das predições na sua vizinhança espacial.

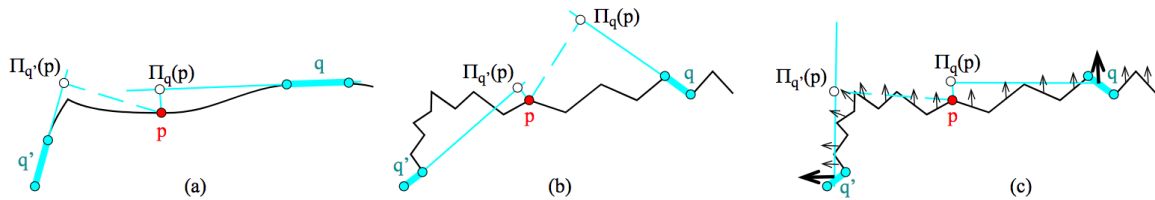


Figura 10 – (a) A predição $\Pi_q(p)$ para um ponto p , baseado na superfície de q , é a projeção de p no plano tangente formado pela superfície de q . Pontos em regiões de linhas características (arestas) resultam em predições mais distantes e, portanto, causando menos influência. (b) Normais com ruídos podem levar a más predições. (c) Normais melhoradas mitigam este problema, pois os planos tangentes são construídos baseados nelas.

Fonte: (JONES *et al.*, 2003)

Apesar de apresentar bons resultados, e mostrar que a filtragem bilateral é robusta a *outliers*, esse método depende, fortemente, da aproximação dos preditores locais, e estes são muito sensíveis a ruídos, mesmo com o passo de melhoria das normais.

A eficácia da filtragem bilateral foi estendida pela filtragem bilateral conjunta (*joint*) em (EISEMANN; DURAND, 2004), (PETSCHNIGG *et al.*, 2004). A ideia é que os pesos associados podem ser determinados usando as diferenças de intensidades de uma outra imagem, chamada **guia** (Figura 11). A filtragem bilateral conjunta atinge melhores resultados que a filtragem bilateral clássica, quando a imagem guia proporciona melhores informações do que

a imagem de entrada a ser tratada. A filtragem bilateral conjunta foi usada com sucesso em processamento de imagens, conseguindo bons resultados. O verdadeiro desafio é a sua adaptação aos sinais geométricos, para que possa ser usado, também, em técnicas de otimização de malhas. Diferentemente dos sinais definidos nas imagens (e.g valor de intensidade em um pixel), que estão limitados a domínios simples e retangulares, os sinais geométricos (e.g posição de um vértice, normais, planos tangentes etc) são, geralmente, definidos em relação à superfície da malha, que possui topologia arbitrária e amostragem de elementos irregular. Esse guia geométrico tem que ser, comumente, construído computacionalmente.

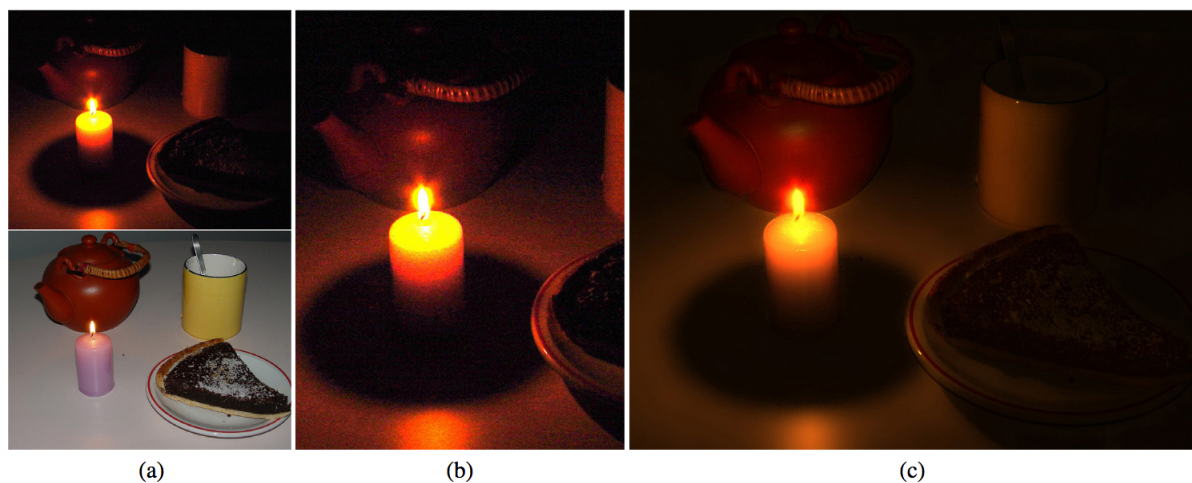


Figura 11 – (a) Cima: Fotografia tirada em um ambiente escuro, a imagem possui ruído e embaçamento. Baixo: Mesma fotografia com flash, provendo uma imagem com maiores detalhes, porém plana e possuindo sombras indesejadas na silhueta dos objetos. (b) Ampliação da imagem mostrando o ruído presente. (c) Técnica de (EISEMANN; DURAND, 2004) misturando as duas imagens (com flash e sem flash) para transferir a luz do ambiente à imagem principal.

Fonte: (EISEMANN; DURAND, 2004)

Em (ZHENG *et al.*, 2011) também é apresentada uma técnica baseada no filtro bilateral de (TOMASI; MANDUCHI, 1998) e o filtro bilateral conjunto de (EISEMANN; DURAND, 2004) e (PETSCHNIGG *et al.*, 2004). São apresentados dois esquemas de remoção de ruídos. Além da abordagem de aplicar o filtro bilateral nas normais da malha com uma formulação iterativa e local (apenas considerando a intensidade das normais na vizinhança), é apresentado, também, uma formulação, não iterativa, global para remoção de ruídos em malhas. É mostrado que a formulação global é mais robusta para malhas com ruídos possuindo triangulações irregulares, enquanto que a formulação local recupera mais rapidamente, e mais efetivamente, malhas com uma maior quantidade e intensidade de ruídos (Figura 12).

Em (SOLOMON *et al.*, 2014), uma generalização do filtro bilateral é apresentada.

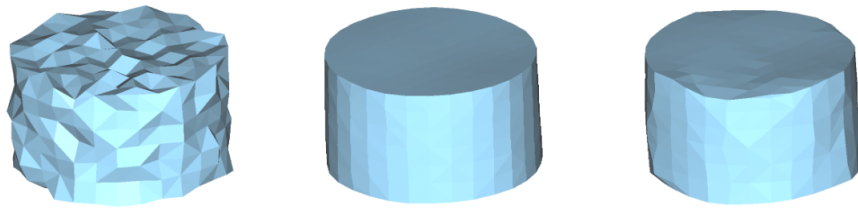


Figura 12 – Remoção de ruídos do modelo cilindro (a esquerda). A formulação local (meio) recupera, mais eficientemente, as características geométricas do que a formulação global (direita) quando o nível de ruído é elevado.

Fonte: (ZHENG *et al.*, 2011)

Um *framework* que pode ser usado para suavizar sinais definidos em imagens, malhas e outros domínios. A construção da técnica é reduzida, exatamente, ao filtro bilateral para imagens em domínios retangulares. É mostrado também a aplicação do *framework* a outros efeitos geométricos como o aprimoramento de características. A principal contribuição da técnica é a maior customização dos *kernels* definidos no filtro bilateral (Figura 13), fazendo com que seja possível aplicar a técnica de uma forma generalizada e em várias aplicações.

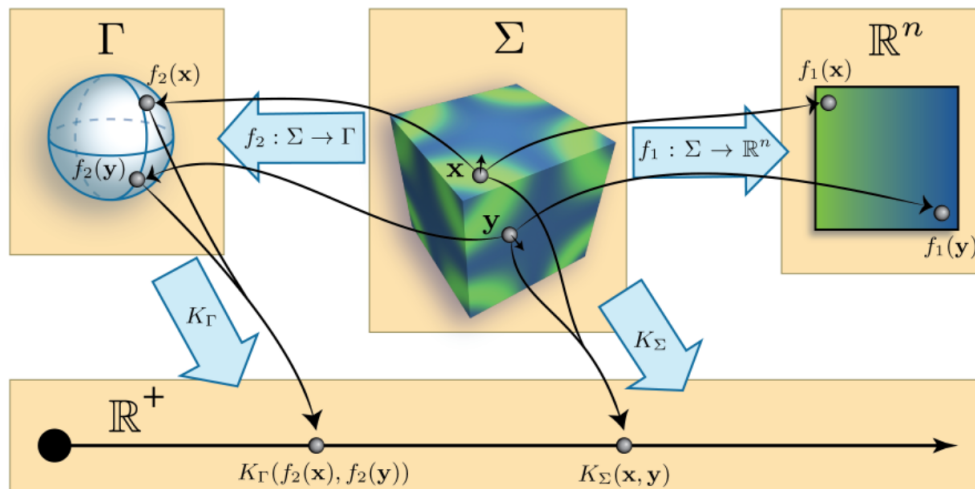


Figura 13 – *Kernels* f_1 e f_2 definidos em relação a uma esfera e a uma textura, respectivamente.

Fonte: (SOLOMON *et al.*, 2014)

Em suma, (FLEISHMAN *et al.*, 2003) e (JONES *et al.*, 2003) usam a filtragem bilateral simples, aplicando o filtro diretamente nos vértices da malha, enquanto (ZHENG *et al.*, 2011) e (SOLOMON *et al.*, 2014) aplicam a filtragem bilateral conjunta nas normais das faces, seguido de uma atualização nas posições dos vértices baseada nas normais filtradas. A dificuldade encontrada nesse processo advém da natureza das normais encontradas em modelos com ruídos, que geralmente estão corrompidas pelo próprio ruído da malha, não sendo um bom guia para a filtragem bilateral conjunta, levando assim a resultados insatisfatórios.

Em (ZHANG *et al.*, 2015), é mostrado como calcular um campo de normais guia mais confiável e robusto para a filtragem bilateral conjunta de malhas com ruídos. As novas normais guias serão computadas a partir da média das normais das faces vizinhas, e essas novas normais irão guiar a atualização dos vértices da malha (no trabalho proposto nessa dissertação, a mesma construção do campo de normais guia será utilizada, portanto mais detalhes sobre este processo serão descritos no Capítulo 3). A abordagem de usar a filtragem bilateral conjunta nas normais das faces e atualizar as posições dos vértices a partir dessas normais também foi adotada por muitos outros trabalhos (SUN *et al.*, 2007; YAGOU *et al.*, 2002; CHEN; CHENG, 2005; SUN *et al.*, 2008), diferindo entre eles na estratégia de filtragem das normais. Todos esses métodos anisotrópicos são focados principalmente em preservar características do modelo no processo de remoção de ruído, demonstrando pouca atenção na melhoria da qualidade da malha. Afim de otimizar uma malha com ruído enquanto melhora sua regularidade, (WEI *et al.*, 2013) apresentam um método de dois passos que usa a filtragem bilateral conjunta juntamente com a suavização Laplaciana com restrições (Figura 14).

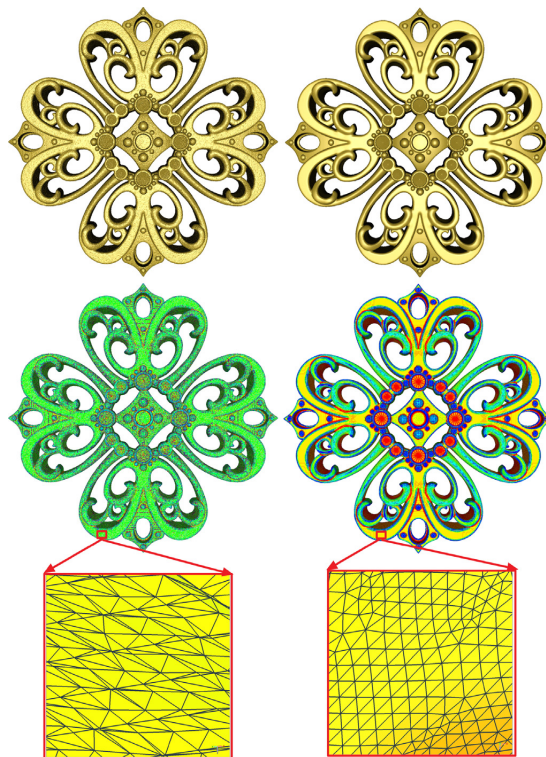


Figura 14 – Otimização do modelo *Filgree* usando a técnica proposta em (WEI *et al.*, 2013). A primeira linha mostra a geometria do modelo com ruído (esquerda) e do modelo otimizado (direita). A linha do meio ilustra a visualização da curvatura média, e a linha de baixo mostra os fragmentos ampliados.

Fonte: (WEI *et al.*, 2013)

2.3 Considerações Finais

As técnicas discutidas neste capítulo apresentam bons resultados na maioria dos casos, mas falham em otimizar malhas com grande presença de ruídos ou com amostragem de faces extremamente irregular (Figura 15). Não há garantia de que modelos gerados a partir de um *scanner* 3D possuam uma malha com amostragem regular de faces. Desta forma, uma técnica de otimização de modelos com ruídos pode gerar resultados indesejados.

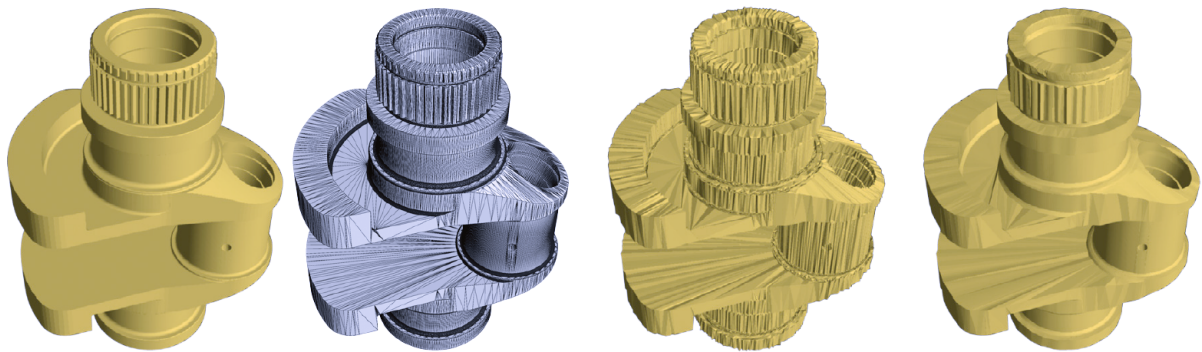


Figura 15 – Da esquerda para a direita: Modelo sem ruído (*ground-truth*), *ground-truth* mostrando a malha associada ao modelo, modelo com ruído sintético, resultado da técnica de (ZHANG *et al.*, 2015).

Fonte: (ZHANG *et al.*, 2015)

3 TÉCNICA PROPOSTA

Nesse capítulo é apresentada a técnica proposta de filtragem bilateral com pré-processamento. Ela visa atender principalmente modelos com ruídos que possuem qualidade de triangulação ruim e foi projetada para atender os seguintes propósitos:

- Detectar regiões com elementos de baixa qualidade que possam atrapalhar a otimização da malha e, então, gerar melhores elementos nelas;
- Suavizar e remover com sucesso ruídos da malha;
- Manter, ao máximo, todas as características, detalhes e volume da malha.

O primeiro ponto é muito importante visto que alguns modelos gerados por scanners ópticos, geralmente, não geram uma boa triangulação e, a maioria das técnicas de filtragem bilateral não apresenta bons resultados para este tipo de malha.

O segundo ponto trata do quesito mais importante de qualquer técnica de filtragem de malha para remoção de ruídos: apresentar uma malha resultante semelhante reduzindo quase que totalmente os ruídos da malha original.

Quanto ao terceiro ponto, embora existem técnicas mais simples e menos robustas (operador de Laplace-Beltrami ou Laplaciano) para suavização de malhas, mas nelas podem-se notar perdas de características essenciais e redução ou aumento de volume na malha resultante. A filtragem bilateral de normais combate esses dois problemas de forma mais eficiente.

3.1 Descrição Geral

Na técnica proposta a entrada é uma malha M com ruído. Uma análise será feita à procura de regiões (*patches*) com qualidade de triangulação ruim. Todas essas regiões selecionadas serão apagadas da malha M (gerando uma nova malha M') e mantida em outra malha M_p , que será utilizada como base na reconstrução das regiões apagadas de M' . Um processo de reconstrução é implementado nas regiões apagadas da malha M' (utilizando a malha M_p como guia) gerando uma malha similar a M , porém com mais detalhes nas regiões reconstruídas, denominada M_0 . Após a reconstrução, o filtro bilateral é executado k vezes, produzindo uma malha final M_k sem ruídos. A Figura 16 mostra o fluxo geral da técnica proposta.

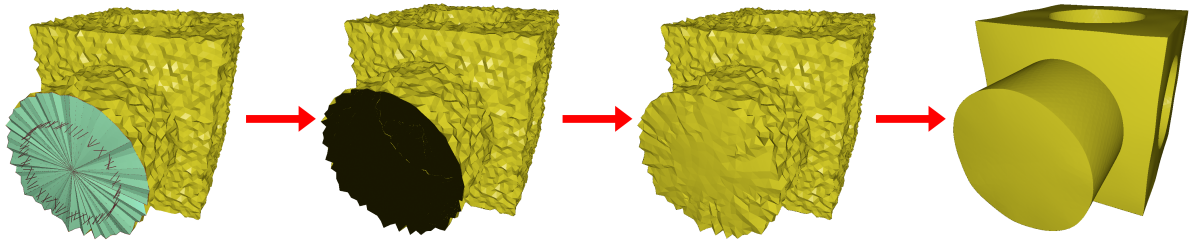


Figura 16 – Fluxo geral da técnica proposta: Primeiramente é selecionado um ou mais *patches* de faces de qualidade inferior às demais, representados pela cor verde clara na figura; em sequência esses *patches* são apagados e melhores elementos são gerados em seu lugar. Como último passo, k iterações são executadas intercalando o filtro bilateral nas normais das faces e a atualização da posição dos vértices baseado nessas normais filtradas.

3.1.1 Pré-processamento

Processos de aquisição de modelos 3D do mundo real algumas vezes não conseguem êxito na digitalização sem falhas do objeto, podendo ele ser processado com ruído e até mesmo ser gerado possuindo uma malha de elementos com qualidade insatisfatória. Como primeiro passo da técnica proposta, uma análise é feita na malha a ser processada. Este processo tem como objetivo identificar possíveis elementos que possam prejudicar o resultado final do filtro bilateral. A Figura 17 exibe o resultado da aplicação da filtragem bilateral em um modelo que possui alguns elementos de qualidade ruim, mostrando assim a necessidade de um pré-processamento para que o modelo não aumente ou diminua seu volume e nem perca suas características provindas do modelo original.

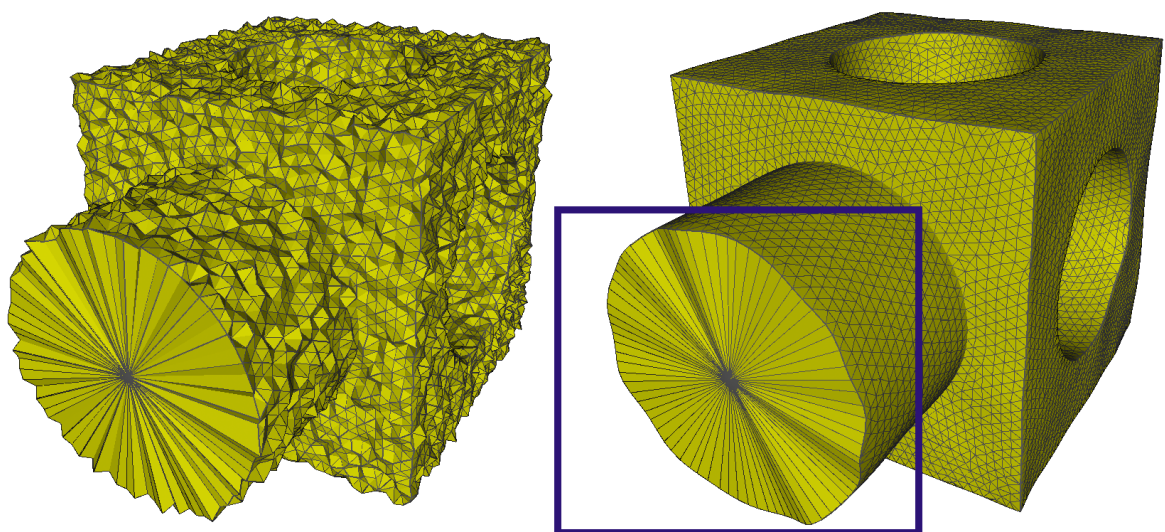


Figura 17 – Filtro bilateral sem pré-processamento aplicado ao modelo *block* com ruído artificial. Na área demarcada pode-se notar perda de característica do modelo original.

3.1.1.1 Seleção de patches

Seja $M = (V, E, F)$ uma malha com ruído, onde V , E e F são os conjuntos de vértices, arestas e faces, respectivamente, de M . Um conjunto de faces (*patches*) de M , que pode interferir no filtro bilateral, será então selecionado, de forma manual ou automática (Figura 18) e extraído. Uma nova malha M_p será então gerada contendo apenas os elementos deletados de M . No final deste processo (Figura 19) terão-se duas novas malhas:

- $M_p = (V_p, E_p, F_p)$, onde $V_p \subseteq V$, $E_p \subseteq E$ e $F_p \subseteq F$.
- $M' = (V', E', F')$, resultante da extração dos *patches* de M , onde $V' \subseteq V$, $E' \subseteq E$ e $F' = F - F_p$.

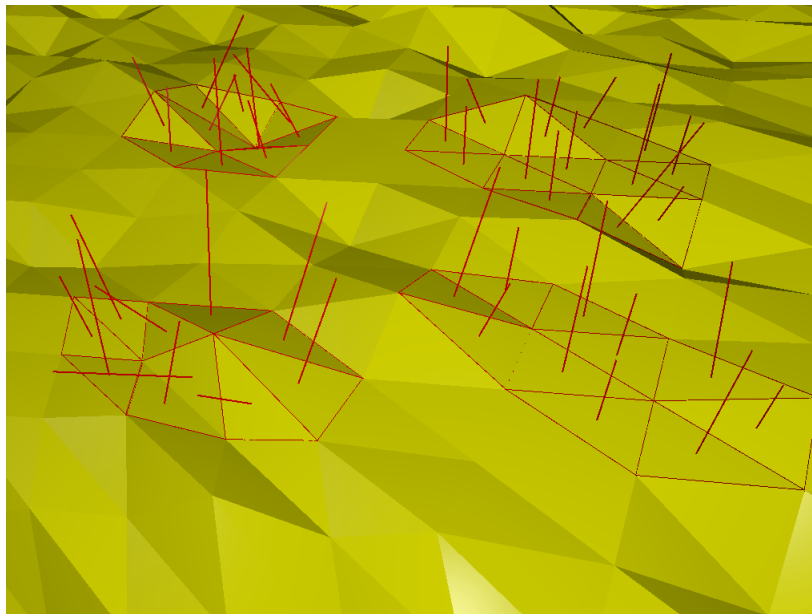


Figura 18 – Uma seleção válida de *patches* a serem utilizados no passo de pré-processamento. Em vermelho são mostradas as normais dos triângulos pertencentes aos *patches* selecionados.

Ainda no processo de deleção de *patches*, a informação de fronteira de arestas é mantida para auxiliar na reconstrução dos elementos de M' . É então gerado um conjunto de arestas definido por:

$$B = \{e : e \in (E_p \cap E')\}. \quad (3.1)$$

3.1.1.2 Reconstrução

O segundo passo do pré-processamento é a reconstrução de M' . É descrito em (MIRANDA *et al.*, 2009) uma técnica de reconstrução de malhas de superfície que considera

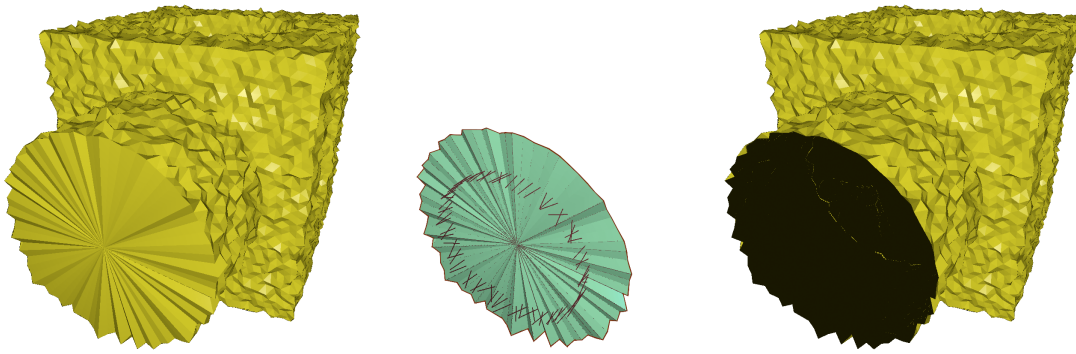


Figura 19 – Exemplo do processo de seleção de *patches* e criação de novas malhas. Da esquerda para a direita: malha original com ruído M , malha suporte M_p e malha M' .

curvaturas e seu algoritmo foi utilizado nesse passo do pré-processamento. Esta técnica é essencialmente um algoritmo de avanço de fronteira que gera elementos, em superfícies arbitrárias, com a melhor forma possível.

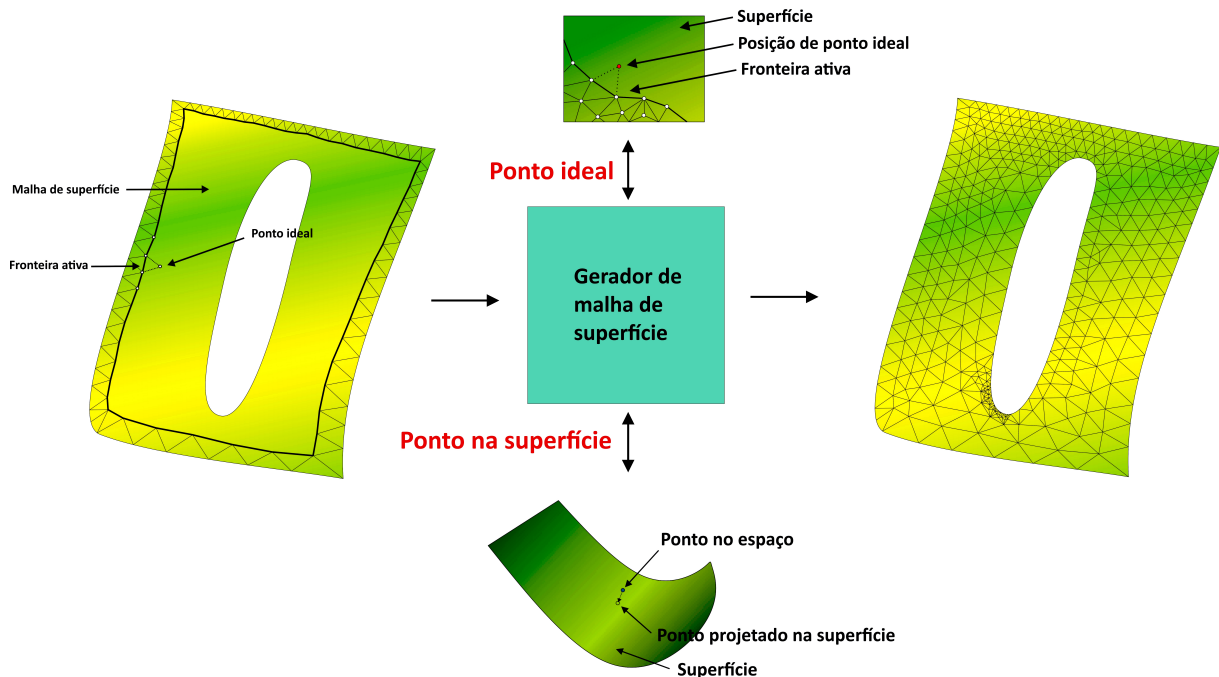


Figura 20 – Visão geral do processo de geração de malha de superfície descrito em (MIRANDA *et al.*, 2009).

A Figura 20 mostra a visão geral do método de geração de malha proposto. A entrada para o algoritmo é uma descrição poligonal do contorno da superfície a ser gerada a malha e uma superfície de suporte que é representada abstratamente por três métodos:

- *Primeiro método*: Dada uma posição de um ponto, o método retorna o tamanho característico desejado de um triângulo equilátero ideal a ser criado com nesta posição. O tamanho do lado do triângulo é considerado como tamanho característico.

- *Segundo método*: Dada uma aresta corrente na fronteira atual, o método localiza o ponto *apex* ideal que forma um novo triângulo. O método tem dois argumentos de entrada: a altura do triângulo equilátero candidato e um vetor unitário perpendicular à direção da aresta base.
- *Terceiro método*: Dado um ponto no espaço, o método retorna o ponto da superfície suporte mais próximo ao ponto dado. Este método é usado apenas no estágio final da geração de malha para melhoria da malha local.

A técnica se inicializa com um processo de avanço de fronteira na região de borda definida pelo conjunto B (Equação 3.1) e continua até que toda a região esteja com uma malha gerada. Para cada aresta base na fronteira ativa, será criado um novo triângulo, processo esse realizado da seguinte forma:

- A posição ideal para o vértice de um triângulo equilátero a ser formado é determinado usando o *Primeiro* e *Segundo* métodos. Usando o ponto médio da aresta base corrente como entrada, o tamanho do lado de um triângulo equilátero, a ser formado naquela posição, é retornado pelo *Primeiro* método. Com este tamanho, a altura do triângulo candidato é obtida. Então fazendo o produto vetorial entre a normal à superfície e a aresta da fronteira, definido apenas por: **Normal** \times **Tangente**, é descoberto o vetor unitário perpendicular a ser utilizado no *Segundo* método, que então retorna a posição ideal para o novo ponto a ser gerado. A Figura 21 ilustra este processo.

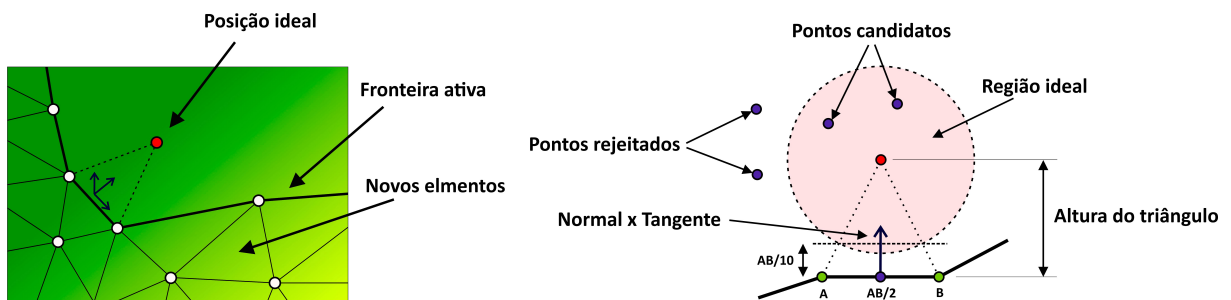


Figura 21 – Processo de encontrar a posição de um ponto ideal para a criação de um novo triângulo.

Como último passo, um processo de suavização é aplicado para aprimorar a qualidade da malha. Uma formulação para este passo é dado na Equação 3.2, que é uma forma geral de um *Laplaciano* com pesos atribuídos:

$$X_O^{n+1} = X_O^n + \phi \frac{\sum_{i=1}^m w_{iO} (X_i^n - X_O^n)}{\sum_{i=1}^m w_{iO}}, \quad (3.2)$$

onde m representa a quantidade de vértices conectados ao vértice O , X_O^{n+1} é a posição do vértice O na iteração $n + 1$, w_{iO} é o peso atribuído entre os vértices i e O , e ϕ é um parâmetro de relaxamento normalmente determinado entre $(0, 1]$. Em (MIRANDA *et al.*, 2009) foi observado bons resultados com $\phi = w_{iO} = 1.0$, fazendo com que apenas os vértices adjacentes influenciem o vértice O . Esse processo de suavização geralmente faz com que os vértices se distanciem da superfície suporte. O *Terceiro* método é utilizado com o intuito de reposicionar os vértices de volta à superfície suporte. Maiores detalhes podem ser encontrados em (MIRANDA *et al.*, 2009).

Ao final deste processo de reconstrução, teremos como resultado uma malha M_0 com ruído, completamente pré-processada e pronta para ser utilizada no passo seguinte de remoção de ruídos do modelo.

3.1.2 *Processo de filtragem para otimização da malha*

Após o pré-processamento da malha, será utilizada uma técnica de remoção de ruídos no modelo que consistirá essencialmente em dois passos:

- Aplicação da filtragem bilateral das normais das faces da malha;
- Reposicionamento dos vértices de acordo com as normais filtradas no passo anterior.

3.1.2.1 *Filtragem bilateral das normais das faces*

Manter as características do modelo é um grande desafio em uma técnica de filtragem bilateral. Filtrar diretamente os vértices da malha como descrito em (FLEISHMAN *et al.*, 2003) e (JONES *et al.*, 2003) pode ocasionar perdas de características importantes dependendo do modelo. Normais das faces de uma malha fornecem descrições mais precisas das características geométricas de um modelo. Uma aresta de borda pode ser detectada simplesmente calculando a diferença entre as normais das faces incidentes, como é ilustrado na Figura 22.

Quando uma malha não possui ruído, as normais das faces podem fornecer um bom sinal guia na filtragem bilateral, no entanto, em um modelo com ruído, essa informação é perdida devido a grande divergência das normais presentes. O exemplo na Figura 23 mostra que duas normais de triângulos vizinhos, compartilhando uma aresta, ainda podem ter valores muito divergentes de direção e essa aresta não ser de borda. É necessário então criar um conjunto de normais guia mais robusto que forneça informações geométricas mais precisas na presença de ruído.

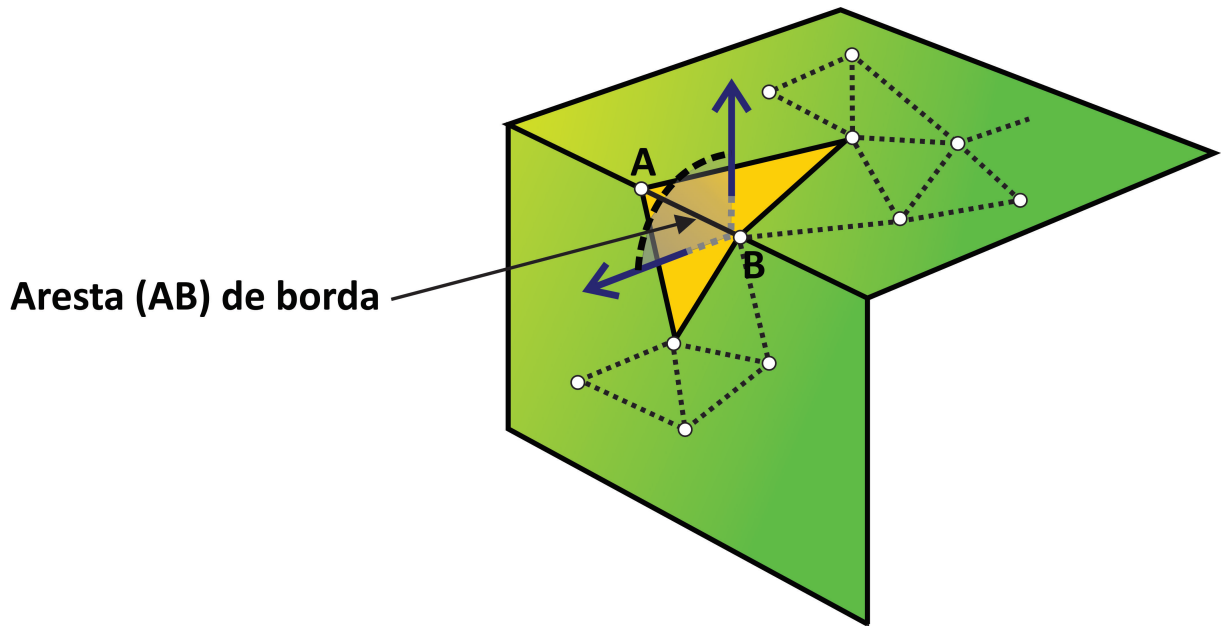


Figura 22 – Aresta AB de borda detectada pela grande diferença entre as normais das suas duas faces incidentes.

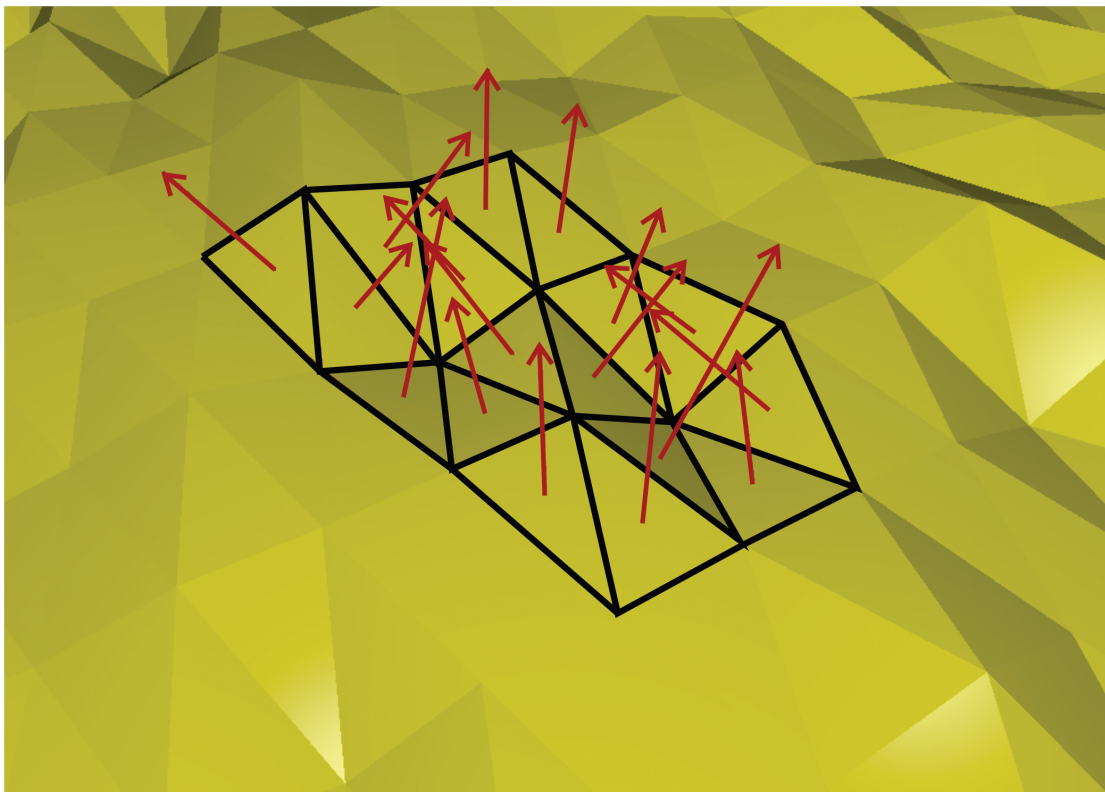


Figura 23 – Um *patch* de triângulos de um modelo com ruído mostrando a divergência das normais de suas faces. Dessa forma, as normais não funcionam como um sinal guia confiável para a filtragem bilateral e não indicam informações geométricas precisas.

Um modelo baseado em malha pode ser decomposto em vários pequenos *patches*, cada um consistindo de múltiplas faces com normais de direção similar. Decompor uma malha dessa forma não é intuitivo. Foi usado o mesmo processo descrito em (ZHANG *et al.*, 2015): para

cada face f_k é definido um *patch* P_k como a união de f_k e suas faces vizinhas que compartilham pelo menos um vértice com f_k . Para achar a normal guia de uma face f_i é procurado dentre todos os *patches* que f_i faz parte, aquele que possui normais mais semelhantes, e então a normal média desse *patch* é atribuída a f_i . O conjunto de *patches* candidatos pode ser definido como:

$$C(f_i) = \{P_k | f_i \in P_k\}. \quad (3.3)$$

Para cada *patch* $P \in C(f_i)$, é definida uma função de consistência que calcula o quão similares as normais no *patch* P são:

$$H(P) = \Phi(P) \cdot R(P), \quad (3.4)$$

onde $\Phi(P)$ mede a diferença máxima entre duas normais do *patch*:

$$\Phi(P) = \max_{f_j, f_k \in P} \|\mathbf{n}_j - \mathbf{n}_k\| \quad (3.5)$$

e $R(P)$ é uma medida relativa de saliência de aresta no *patch*:

$$R(P) = \frac{\max_{e_j \in E_p} \varphi(e_j)}{\varepsilon + \sum_{e_j \in E_p} \varphi(e_j)}, \quad (3.6)$$

onde E_p é o conjunto de arestas com ambas as faces incidentes contidas no *patch* P (Figura 24), $\varphi(e_j)$ mede a saliência de uma aresta e_j pela diferença entre as normais das duas faces incidentes f_{j_1} e f_{j_2} :

$$\varphi(e_j) = \|\mathbf{n}_{j_1} - \mathbf{n}_{j_2}\|, \quad (3.7)$$

e ε é um valor positivo e pequeno para evitar divisões por 0.

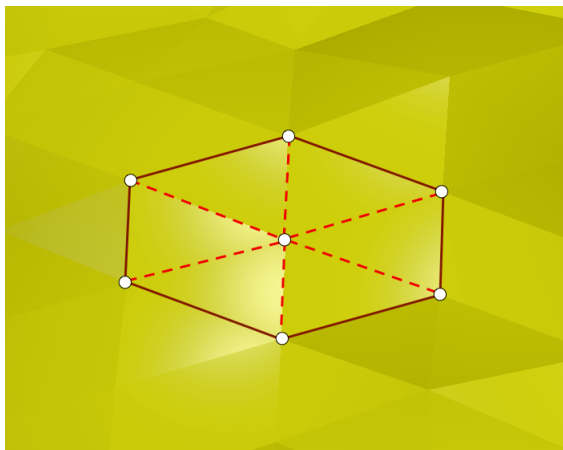


Figura 24 – Um *patch* de faces e suas arestas. Linhas tracejadas ilustram as arestas pertencentes ao conjunto E_p .

Entre todos os *patches* candidatos para f_i , é escolhido o *patch* P^* que possui o menor valor para a função de consistência e é então computada a sua normal média \mathbf{g}_i , ponderada pela área das faces contidas no *patch*:

$$\mathbf{g}_i = \frac{\sum_{f_j \in P^*} A_j \mathbf{n}_j}{\|\sum_{f_j \in P^*} A_j \mathbf{n}_j\|}, \quad (3.8)$$

onde A_j é a área da face f_j . Todo o processo é ilustrado na Figura 25.

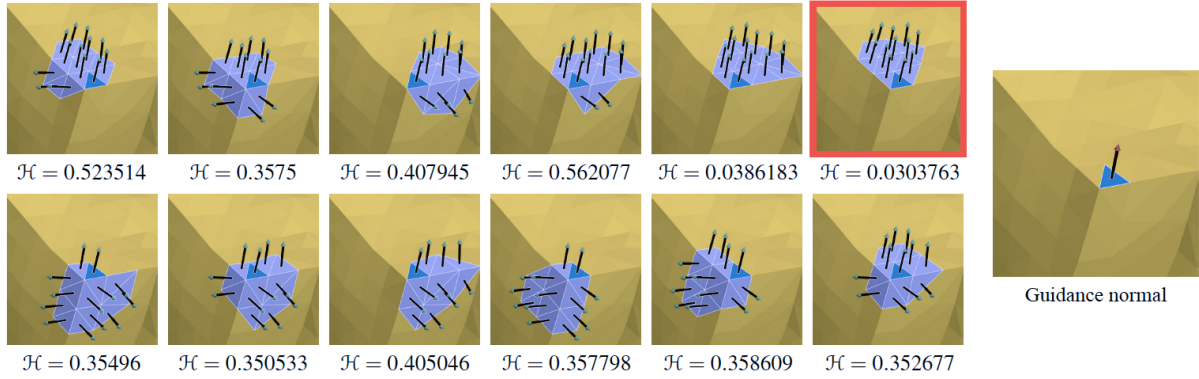


Figura 25 – Cálculo da função de consistência para todos os *patches* que a face f_i (em azul) está contida. O *patch* P com menor valor (destacado em vermelho) de função de consistência $H(P)$, calculado pela Equação 3.4, será o escolhido, e sua normal média será atribuída à face f_i .

Fonte: (ZHANG *et al.*, 2015)

Após a construção do conjunto de normais guia para toda a malha, o processo de filtragem irá prosseguir. Para cada face f_i , com vetor normal unitário \mathbf{n}_i , centróide c_i , e normal guia \mathbf{g}_i , é computado a normal filtrada $\bar{\mathbf{n}}_i$ pelo seguinte filtro bilateral:

$$\bar{\mathbf{n}}_i = \frac{1}{W_i} \sum_{f_j \in \mathcal{N}_i} A_j K_s(c_i, c_j) K_r(\mathbf{g}_i, \mathbf{g}_j) \mathbf{n}_j, \quad (3.9)$$

onde \mathcal{N}_i é o conjunto de faces na vizinhança de f_i ; A_j é a área da face f_j ; K_s e K_r são os *kernels* espacial e de distância respectivamente; \mathbf{n}_j é a normal da face f_j e $W_i = \|\sum_{f_j \in \mathcal{N}_i} A_j K_s(c_i, c_j) K_r(\mathbf{g}_i, \mathbf{g}_j) \mathbf{n}_j\|$ é um fator de normalização para garantir que a normal filtrada será um vetor unitário. Para este trabalho, foram usadas as seguintes funções para K_s e K_r :

$$K_s(c_i, c_j) = \exp\left(-\frac{\|c_i - c_j\|^2}{2\sigma_s^2}\right), \quad (3.10)$$

$$K_r(\mathbf{g}_i, \mathbf{g}_j) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{g}_i - \mathbf{g}_j\|^2}{2\sigma_r^2}\right), \quad (3.11)$$

onde os parâmetros de variância σ_s e σ_r controlam a zona de influência dos *kernels*. O conjunto \mathcal{N}_i contém a face f_i e suas faces vizinhas (Figura 26). Elas podem ser definidas como:

- **Vizinhas imediatas:** faces que compartilham pelo menos um vértice com f_i .
- **Vizinhas próximas:** faces cujo centróide está a uma distância r do centróide de f_i .

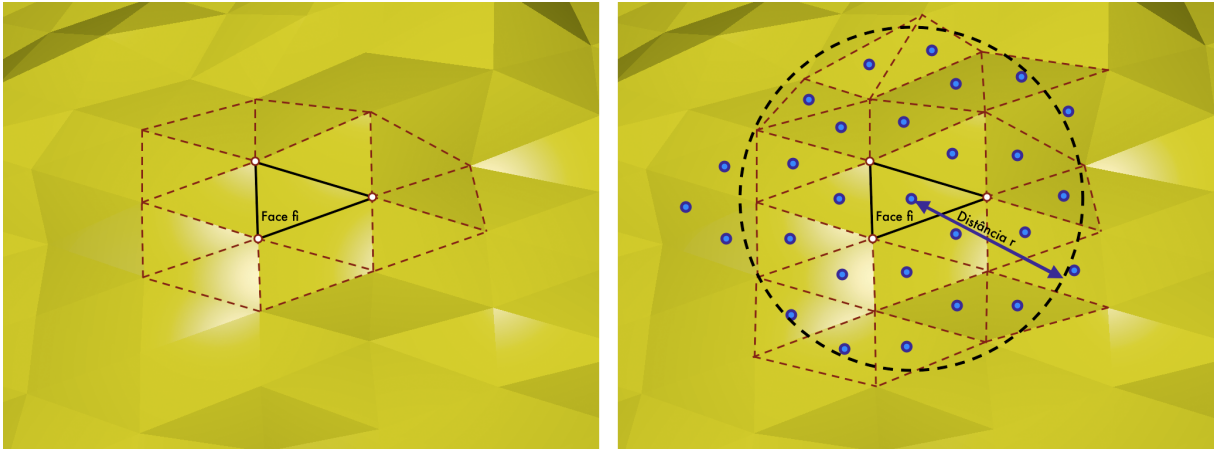


Figura 26 – Diferença da definição de vizinhança. A esquerda temos a vizinhança imediata de f_i ; a direita, a vizinhança próxima de f_i , onde o parâmetro r , que representa o raio, é definido pelo usuário.

3.1.2.2 Atualizando vértices

Após o processo de filtragem das normais, os vértices da malha têm que ser atualizados para corresponder às novas normais calculadas na Equação 3.9. Aqui foi usado o mesmo procedimento descrito em (ZHANG *et al.*, 2015) e (SUN *et al.*, 2007): para cada face f_i com posições de vértice: \bar{v}_{ix} , \bar{v}_{iy} e \bar{v}_{iz} , elas serão atualizadas pela seguinte iteração:

$$\bar{v}_i^{(k+1)} = \bar{v}_i^{(k)} + \frac{1}{|\mathcal{F}_i|} \sum_{j \in \mathcal{F}_i} \bar{n}_j \left[\bar{n}_j \cdot \left(\bar{c}_j^{(k)} - \bar{v}_i^{(k)} \right) \right], \quad (3.12)$$

onde $\bar{v}_i^{(k)}$ representa o valor de \bar{v}_i na k -ésima iteração, \mathcal{F}_i é o conjunto de índices das faces incidentes para o vértice \bar{v}_i e $\bar{c}_j^{(k)}$ é o centróide de f_j na k -ésima iteração. Esse procedimento é intercalado k vezes com a filtragem das normais até que um resultado satisfatório seja obtido. Nos exemplos mostrados no capítulo seguinte, $k \in [10, 20]$ obteve bons resultados nos testes aplicados aos modelos.

O Algoritmo 1 resume toda a técnica proposta no presente trabalho, mostrando os passos principais e omitindo detalhes que já foram discutidos ao longo do capítulo.

Algoritmo 1: Filtragem Bilateral das normais da malha com passo de pré-processamento

Input : Malha inicial \mathbf{M} , número de iterações k

Output : Malha \mathbf{M}_k sem ruídos

Selecione *patches* $\{p\}$ de faces em \mathbf{M} ;

Delete o conjunto $\{p\}$ de \mathbf{M} gerando \mathbf{M}' e \mathbf{M}_p ;

Construa o conjunto \mathbf{B} de fronteiras;

Gere \mathbf{M}_0 reconstruindo \mathbf{M}' a partir de \mathbf{B} e \mathbf{M}_p ;

para $i = 1$ até k **faça**

 Construa o conjunto de normais guia $\{\mathbf{g}_i\}$;

 Compute as normais filtradas $\{\bar{\mathbf{n}}_i\}$;

 Atualize os vértices de \mathbf{M}_i de acordo com $\{\bar{\mathbf{n}}_i\}$;

fim

retorne \mathbf{M}_k ;

4 EXEMPLOS E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados de aplicação da técnica proposta nesse trabalho em alguns modelos. Os resultados para a técnica descrita neste trabalho são nomeados como *pre-guided* e comparados com os resultados obtidos pelos trabalhos de (ZHANG *et al.*, 2015), (SUN *et al.*, 2007) e (ZHENG *et al.*, 2011), que serão denotados como *guided*, *fast-and-effective* e *bilateral-normal-filtering*.

A técnica descrita neste trabalho foi implementada em C++, utilizando a biblioteca de API gráfica livre *modern OpenGL* (Open Graphics Library), *libigl* (<https://github.com/libigl/libigl>), *GLEW*, *glfw* e *assimp*.

O computador utilizado para a técnica foi um MacBook Air, com processador Intel Core i5, 1.3 GHz, 8 GB de memória DDR3 1600 MHz e placa de vídeo Intel HD Graphics 5000 com 1546 MB de memória gráfica.

4.1 Modelos

Ao todo, foram utilizados 4 modelos, sendo 3 modelos com ruído artificial e regiões com triangulação de baixa qualidade e 1 modelo digitalizado do mundo real para mostrar a eficiência da técnica em problemas reais. Eles serão referidos como: *block*, *carter*, *mechanic* e *angel* (Figura 27).

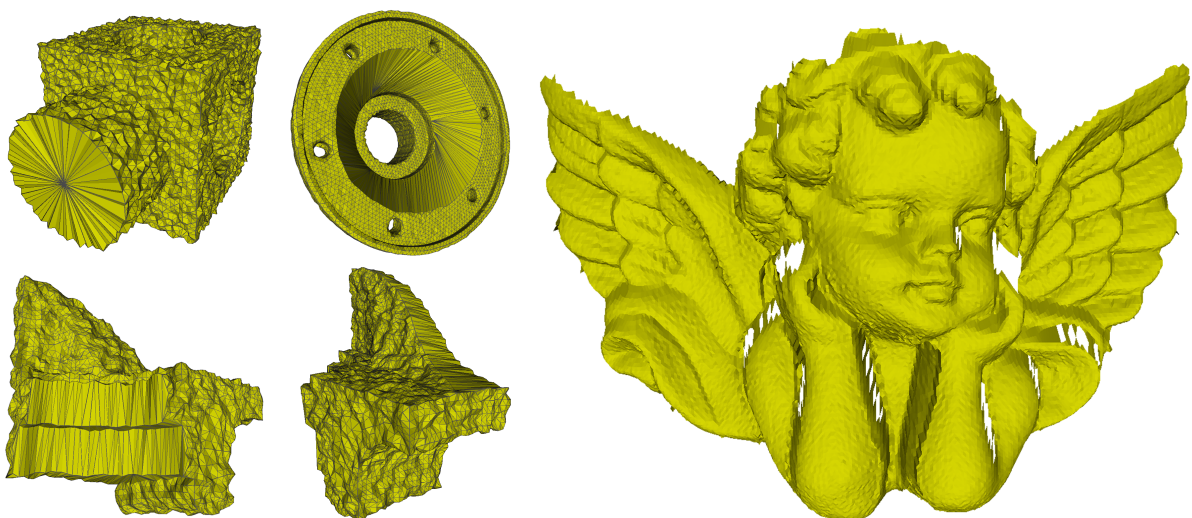


Figura 27 – Modelos utilizados na técnica proposta. Na primeira metade da imagem temos *block* e *carter*, seguidos do modelo *mechanic* em duas visões diferentes. Mais a direita temos o modelo *angel* que foi digitalizado do mundo real a partir de um *scanner* 3D.

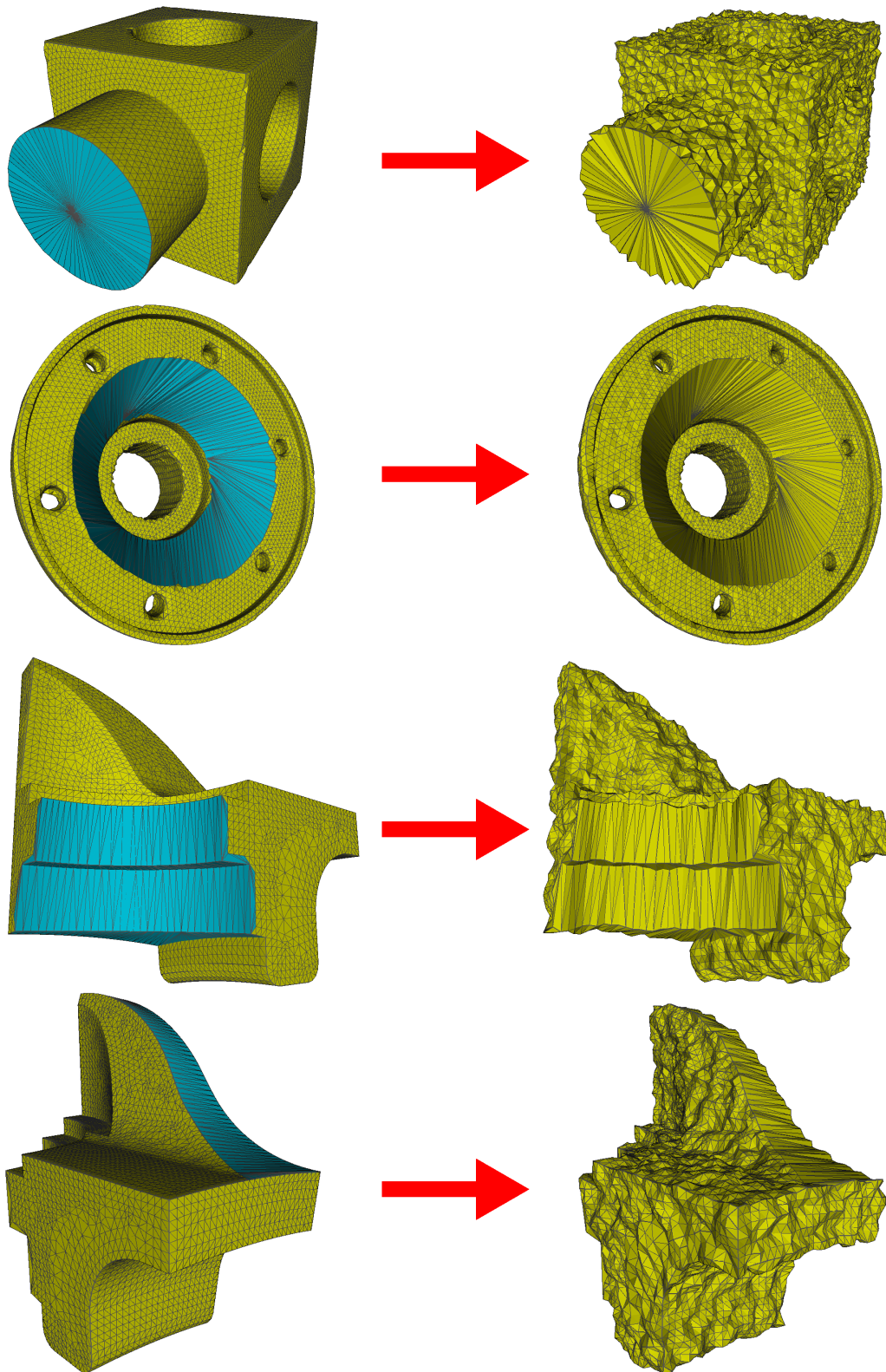


Figura 28 – Processo de criação dos modelos de entrada. A esquerda temos os modelos *ground-truth*: *block*, *carter* e *mechanic* em duas visões diferentes. As regiões em destaque representam a zona onde a qualidade de triangulação foi propositalmente reduzida. A direita tem-se o segundo passo da criação dos modelos artificiais: a aplicação de um ruído branco aleatório e artificial ao longo das normais dos vértices.

Para mostrar a robustez da técnica apresentada, utilizamos dois processos na criação dos 3 primeiros modelos de entrada:

- Algumas regiões do modelo foram reconstruídas, deixando a triangulação com qualidade ruim.
- Um processo de ruído artificial é aplicado. Os vértices são movidos a uma pequena distância aleatória (positiva ou negativa) na direção da sua normal.

Ao final deste processo, ilustrado na Figura 28, terão-se os 3 modelos com as duas pré-condições suficientes para que a técnica proposta mostre bons resultados em relação às demais.

4.2 Métricas de Qualidade

Para medir qualidade e eficiência em uma técnica de remoção de ruídos, a grande maioria dos artigos na literatura seguem o seguinte padrão:

- Uma malha sem ruído, chamada *ground-truth*, é adquirida.
- É aplicado um ruído sintético na *ground-truth*.
- A técnica é aplicada obtendo uma malha resultante.
- Métricas de comparação são executadas entre a malha resultante e a *ground-truth*.

Dessa forma, é medido o quão semelhante a malha resultante ficou da sua forma esperada. Uma forma de medir essa semelhança é calcular a proximidade da malha resultante com a *ground-truth*.

A métrica de qualidade mais comum na literatura é a *distância de erro média* (MDE), definida para uma malha resultante X e uma malha *ground-truth* G , pela seguinte equação:

$$MDE(X, G) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|x_i - g_i\|, \quad (4.1)$$

onde n é o número de vértices em ambas as malhas, x_i é um vértice da malha resultante e g_i é o mesmo vértice na malha *ground-truth*. Essa métrica simplesmente calcula a distância média que cada vértice está do resultado ideal (*ground-truth*). Quanto mais próximo o $MDE(X, G)$ estiver de 0, mais eficiente será a técnica. Como a técnica proposta tem um passo de pré-processamento, em geral a malha resultante vai possuir mais vértices do que a malha *ground-truth*, então essa métrica não deve ser usada diretamente, pois estariam-se ignorando informações relevantes na medida de erro.

Para este fim, como medida de qualidade, foi usado a técnica presente em (CIGNONI *et al.*, 1998) para estimar o erro em nosso processo de remoção de ruídos. Esta técnica faz amostragens de pontos na superfície da malha resultante e calcula a distância mínima entre esses pontos e a malha *ground-truth* baseado na distância de *Hausdorff*.

A distância de *Hausdorff*, ilustrada na Figura 29, mede o quão distante dois conjuntos de um espaço métrico estão um do outro. Seja X e Y dois subconjuntos não vazios de um espaço métrico. A distância de *Hausdorff* $d_H(X, Y)$ é definida por:

$$d_H(X, Y) = \max\left\{\sup_{x \in X} \inf_{y \in Y} d(x, y), \sup_{y \in Y} \inf_{x \in X} d(x, y)\right\}, \quad (4.2)$$

onde *sup* representa o *supremum*, *inf* o *infimum* e $d(x, y)$ representa a distância entre os pontos $x \in X$ e $y \in Y$.

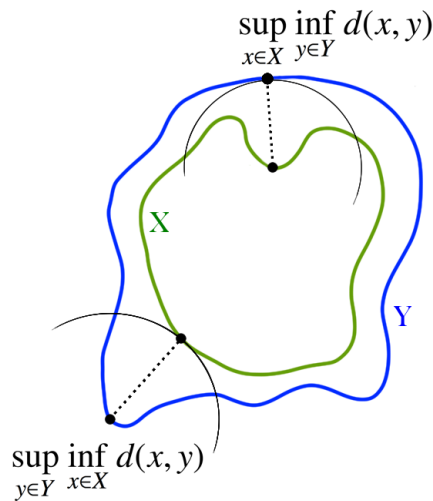


Figura 29 – A distância de *Hausdorff* entre dois subconjuntos X e Y : $d_H(X, Y)$ irá resultar na maior das duas distâncias.

A distância de *Hausdorff* $d_H(X, Y)$ é um valor que representa a distância entre dois subconjuntos. Já que estamos interessados na distância mínima entre cada ponto amostrado na malha resultante, a distância de *Hausdorff* modificada (MHD) para um ponto amostrado x na malha resultante X e a malha *ground-truth* G , será definido por:

$$MHD(x, G) = \inf_{g \in G} d(x, g), \quad (4.3)$$

onde g é o ponto na superfície da malha G que produz a menor distância para x . Portanto $MHD(x, G)$ será o resultado da menor distância de um ponto x para a malha G .

Estendendo este conceito para todos os pontos amostrados: seja n_s o número de pontos amostrados na superfície da malha X , x_i um ponto amostrado na superfície de X e g o

ponto na superfície da malha G que produz a menor distância para x_i . Será definida então a distância de *Hausdorff* modificada média (MMHD):

$$MMHD(X, G) = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} MHD(x_i, G), \quad (4.4)$$

que conterà a média entre todos os MHD dos pontos amostrados, representando assim a média da distância que a malha resultante está da malha ideal (*ground-truth*).

Apesar da *MMHD* ser uma métrica mais precisa, irá se usar também a razão entre os volumes da malha resultante e da *ground-truth* para informações mais concisas e completas sobre a validade da técnica proposta. Ao todo serão usadas quatro métricas:

- **MHD mínimo:** O menor valor de MHD entre todos os pontos amostrados. Esse valor representa o deslocamento mínimo de um ponto na malha resultante causado pela técnica. Valores próximos ou iguais a 0 são preferíveis.
- **MHD máximo:** O maior valor de MHD entre todos os pontos amostrados. Esse valor representa o deslocamento máximo de um ponto na malha resultante causado pela técnica. Valores próximos ou iguais a 0 são preferíveis.
- **MMHD:** O valor médio de todos os valores de MHD dos pontos amostrados como definido em 4.4. Valores próximos ou iguais a 0 são preferíveis. Esta é a métrica mais importante.
- **Proporção de Volume:** A razão de proporção entre o volume do modelo resultante e o volume do modelo *ground-truth*. Quanto mais próximo esse valor for de 1, melhor.

4.3 Resultados

Na sequência, será comparado a técnica proposta com (ZHANG *et al.*, 2015), (SUN *et al.*, 2007) e (ZHENG *et al.*, 2011), aplicando as quatro técnicas nos modelos de ruído sintético mostrados na Figura 27, e utilizando as quatro medidas de qualidade descritas na seção 4.2 para comparação. Todos os modelos foram amostrados com 6 milhões de pontos na sua superfície para o cálculo do MMHD. As Figuras 30, 31, 32 e 33 mostram os resultados finais das técnicas citadas aplicadas aos quatro modelos propostos, mostrando assim a comparação da técnica proposta nesse trabalho com as demais. As Figuras 34, 35, 36 e 37 ilustram a visualização das distâncias de *Hausdorff* dos 6 milhões de pontos amostrados, assim como um histograma de distribuição desses pontos. O modelo *angel*, que possui ruído real, não possui uma malha *ground-truth* de comparação, portanto usou-se a técnica proposta para mostrar que visualmente ele possui uma melhor qualidade, como é notado nas Figuras 38 e 39.

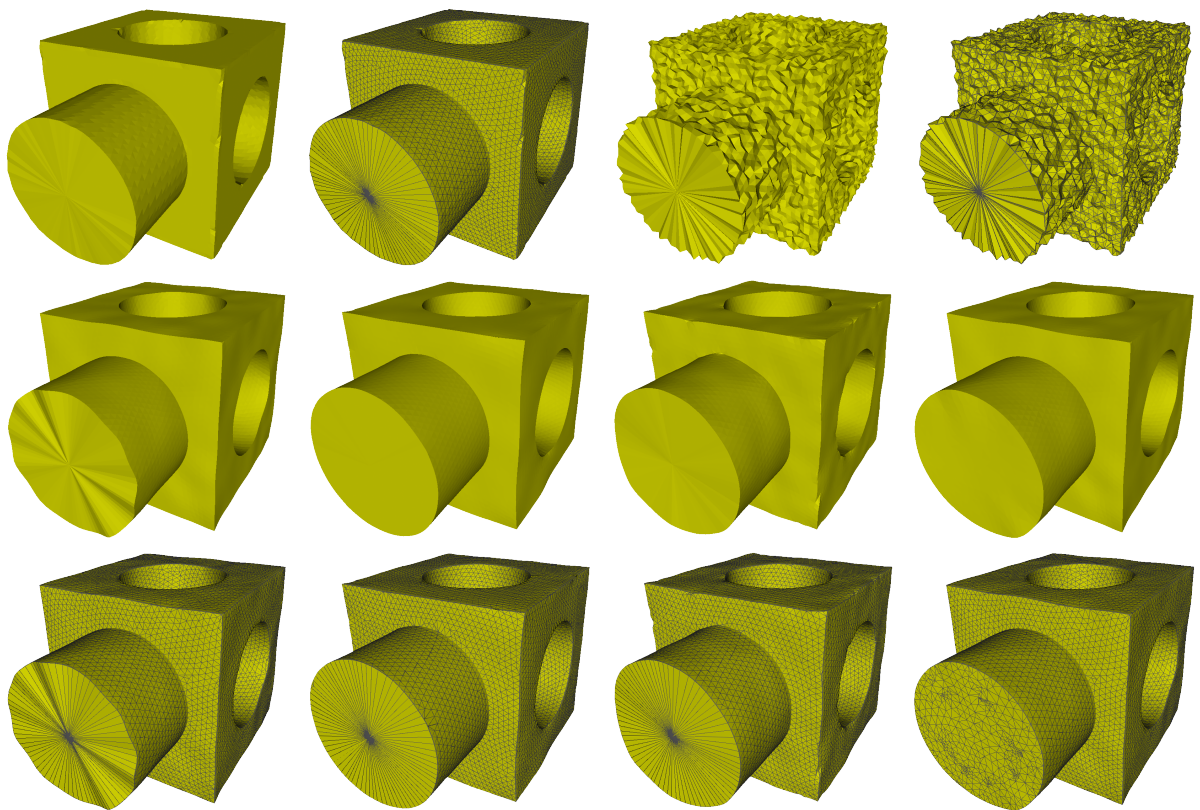


Figura 30 – Comparação da técnica proposta com as técnicas de (ZHANG *et al.*, 2015), (SUN *et al.*, 2007) e (ZHENG *et al.*, 2011) para o modelo *block*. Primeira linha: *ground-truth*, *ground-truth* com malha, modelo com ruído sintético, modelo com ruído sintético e malha. Segunda linha: técnicas de (ZHANG *et al.*, 2015), (SUN *et al.*, 2007), (ZHENG *et al.*, 2011) e a técnica proposta, respectivamente. Terceira linha: as mesmas técnicas da linha anterior mostrando as malhas dos modelos.

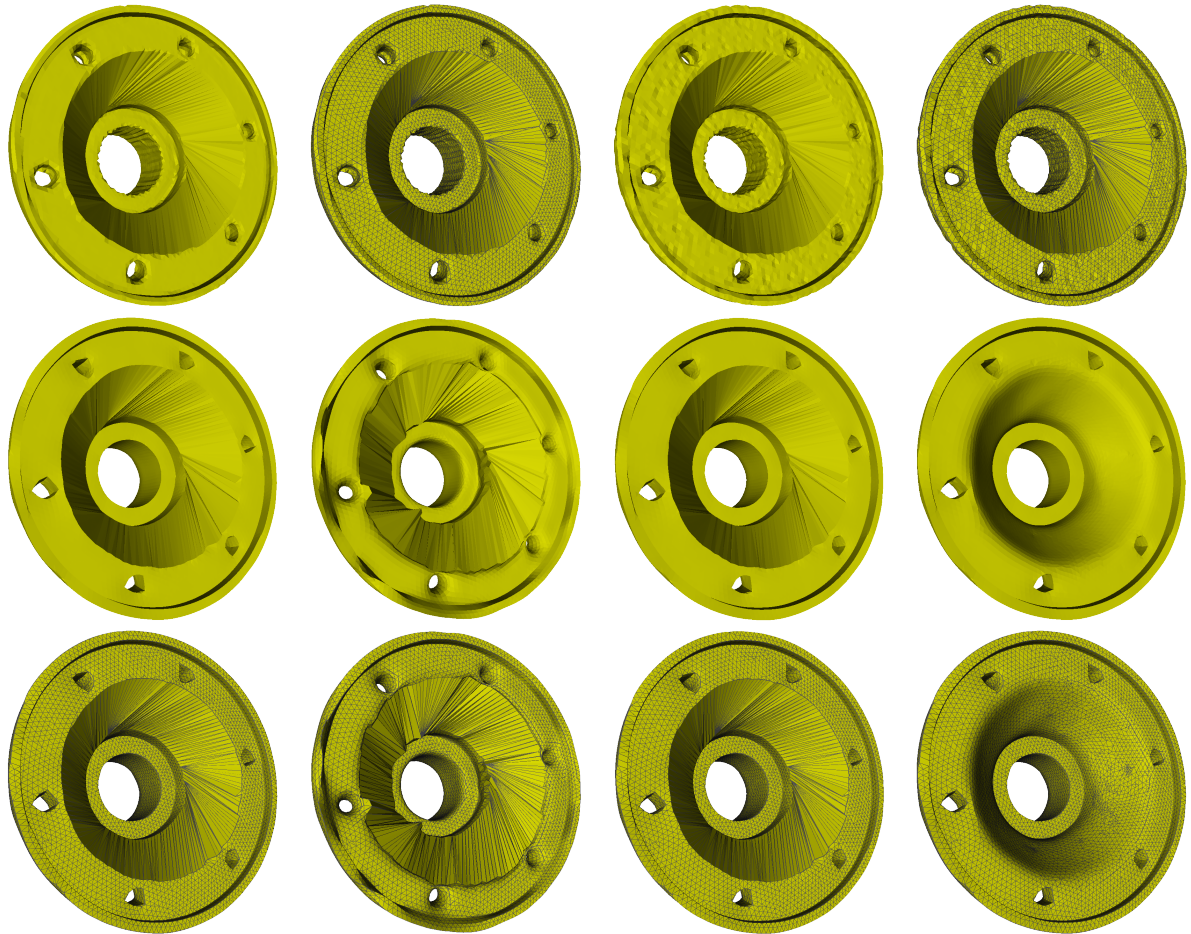


Figura 31 – Comparação da técnica proposta com as técnicas de (ZHANG *et al.*, 2015), (SUN *et al.*, 2007) e (ZHENG *et al.*, 2011) para o modelo *carter*. Primeira linha: *ground-truth*, *ground-truth* com malha, modelo com ruído sintético, modelo com ruído sintético e malha. Segunda linha: técnicas de (ZHANG *et al.*, 2015), (SUN *et al.*, 2007), (ZHENG *et al.*, 2011) e a técnica proposta, respectivamente. Terceira linha: as mesmas técnicas da linha anterior mostrando as malhas dos modelos.

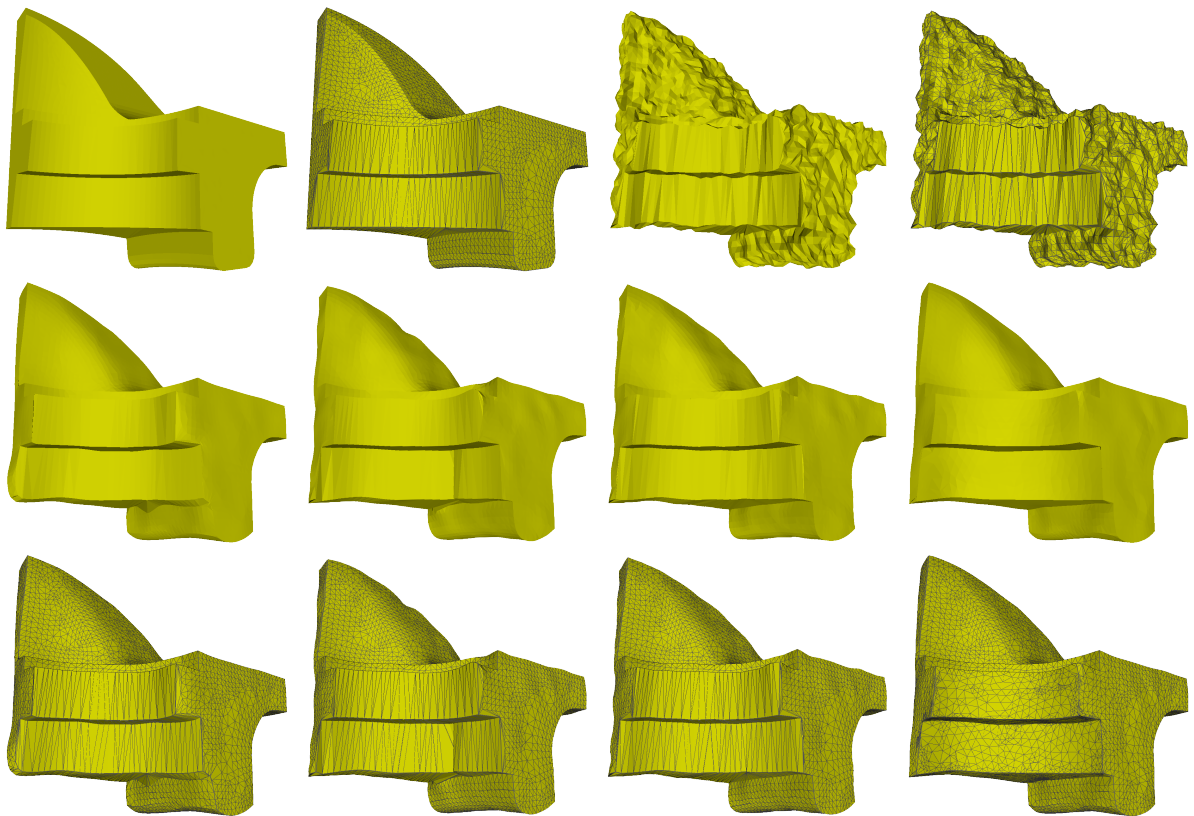


Figura 32 – Comparação da técnica proposta com as técnicas de (ZHANG *et al.*, 2015), (SUN *et al.*, 2007) e (ZHENG *et al.*, 2011) para o modelo *mechanic*. Primeira linha: *ground-truth*, *ground-truth* com malha, modelo com ruído sintético, modelo com ruído sintético e malha. Segunda linha: técnicas de (ZHANG *et al.*, 2015), (SUN *et al.*, 2007), (ZHENG *et al.*, 2011) e a técnica proposta, respectivamente. Terceira linha: as mesmas técnicas da linha anterior mostrando as malhas dos modelos.

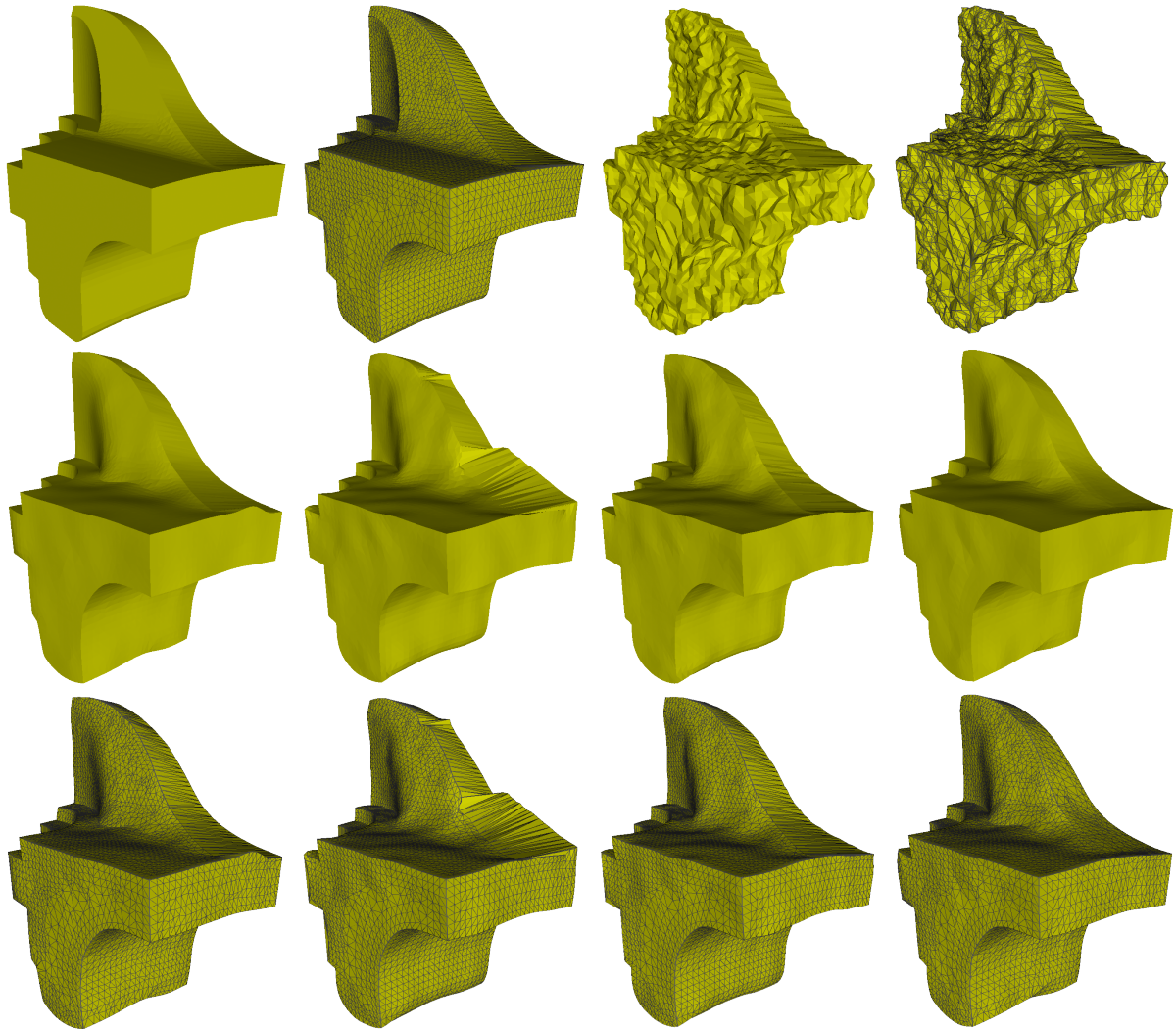


Figura 33 – Comparação da técnica proposta com as técnicas de (ZHANG *et al.*, 2015), (SUN *et al.*, 2007) e (ZHENG *et al.*, 2011) para o modelo *mechanic*. Primeira linha: *ground-truth*, *ground-truth* com malha, modelo com ruído sintético, modelo com ruído sintético e malha. Segunda linha: técnicas de (ZHANG *et al.*, 2015), (SUN *et al.*, 2007), (ZHENG *et al.*, 2011) e a técnica proposta, respectivamente. Terceira linha: as mesmas técnicas da linha anterior mostrando as malhas dos modelos.

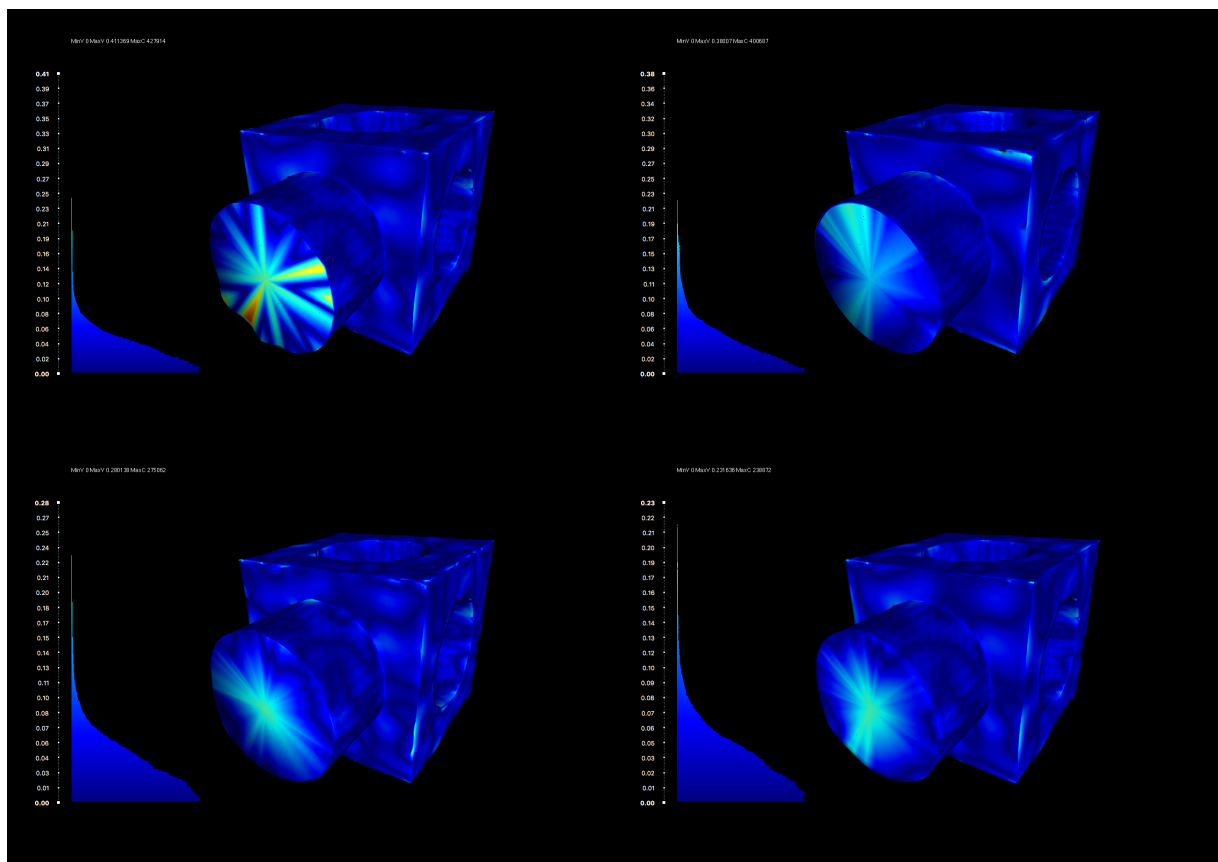


Figura 34 – Visualização do modelo *block* e um histograma dos 6 milhões de pontos de amostragem e seus respectivos valores de distância de *Hausdorff*. Primeira linha: técnicas de (ZHANG *et al.*, 2015) e (SUN *et al.*, 2007). Segunda linha: técnica (ZHENG *et al.*, 2011) e a técnica proposta.

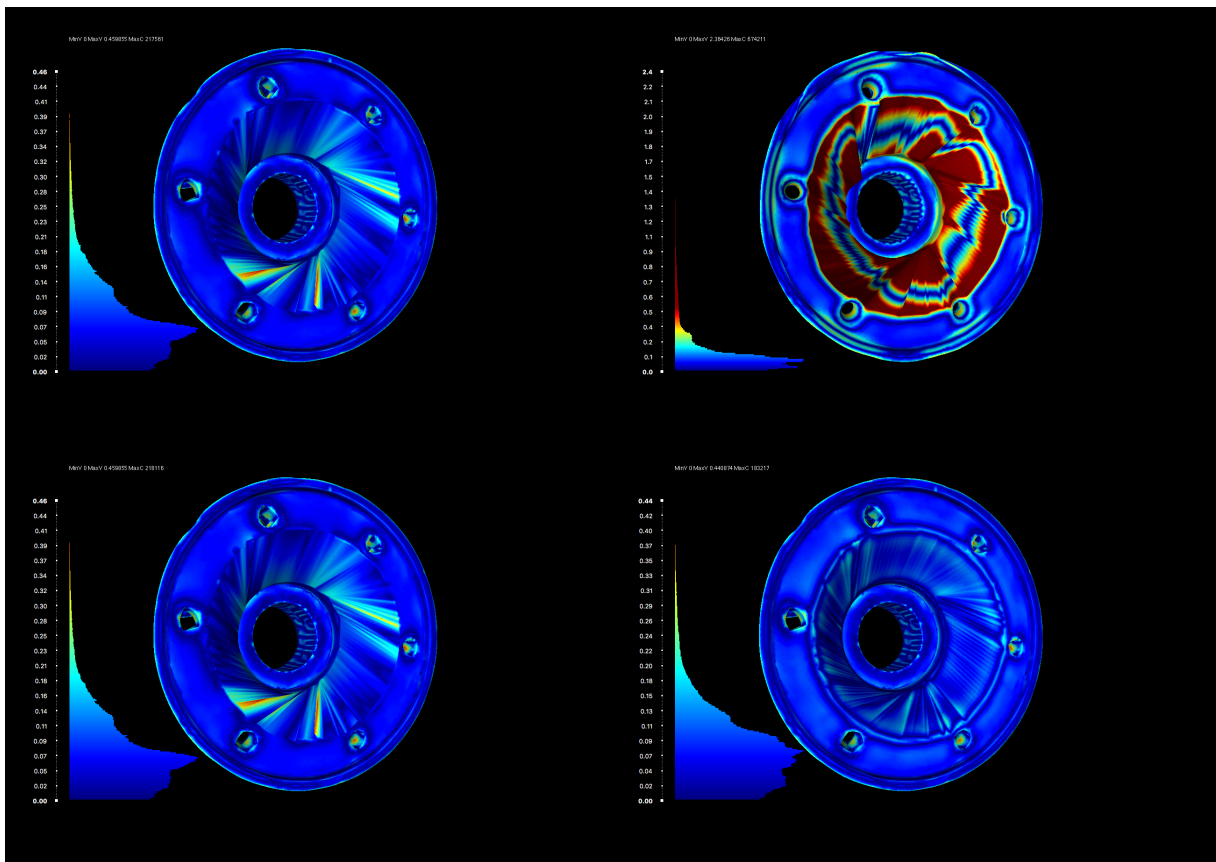


Figura 35 – Visualização do modelo *carter* e um histograma dos 6 milhões de pontos de amostragem e seus respectivos valores de distância de *Hausdorff*. Primeira linha: técnicas de (ZHANG *et al.*, 2015) e (SUN *et al.*, 2007). Segunda linha: técnica (ZHENG *et al.*, 2011) e a técnica proposta.

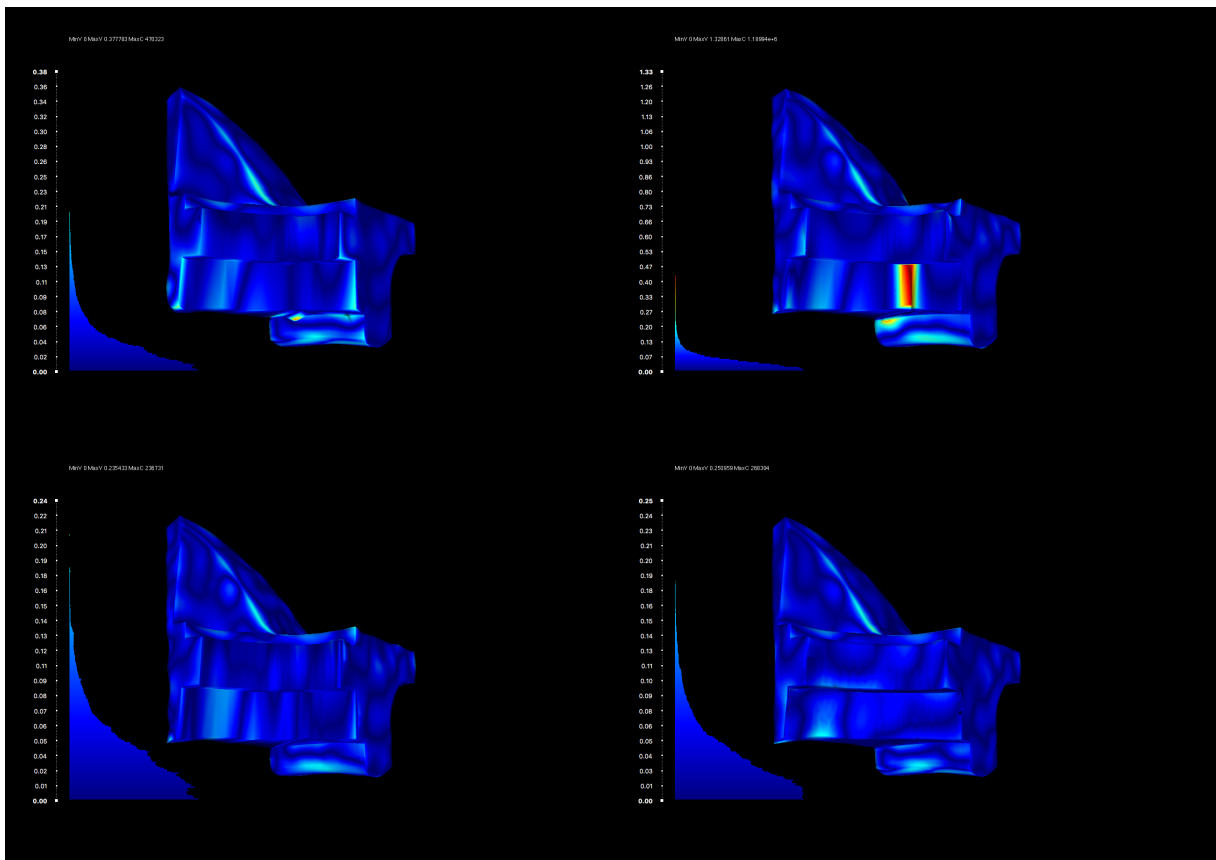


Figura 36 – Visualização do modelo *mechanic* e um histograma dos 6 milhões de pontos de amostragem e seus respectivos valores de distância de *Hausdorff*. Primeira linha: técnicas de (ZHANG *et al.*, 2015) e (SUN *et al.*, 2007). Segunda linha: técnica (ZHENG *et al.*, 2011) e a técnica proposta.

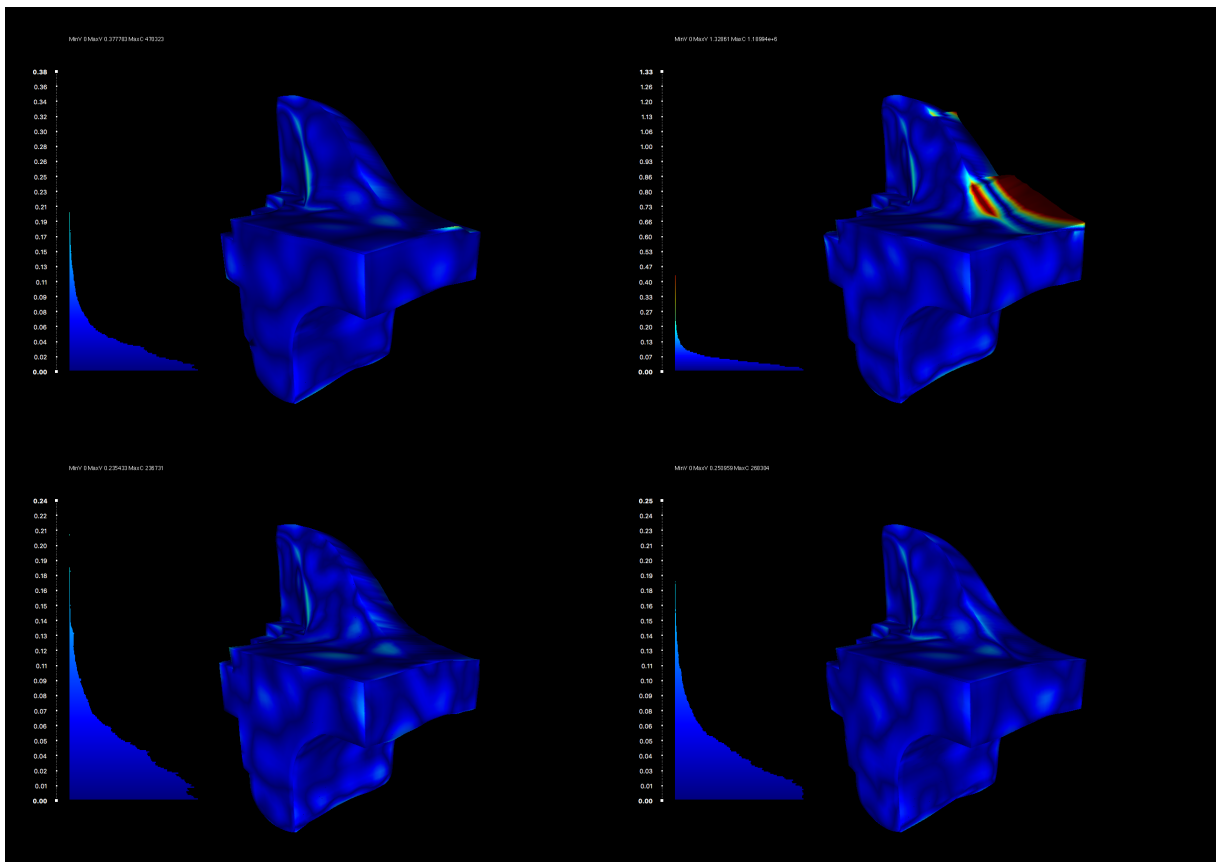


Figura 37 – Visualização do modelo *mechanic* e um histograma dos 6 milhões de pontos de amostragem e seus respectivos valores de distância de *Hausdorff*. Primeira linha: técnicas de (ZHANG *et al.*, 2015) e (SUN *et al.*, 2007). Segunda linha: técnica (ZHENG *et al.*, 2011) e a técnica proposta.

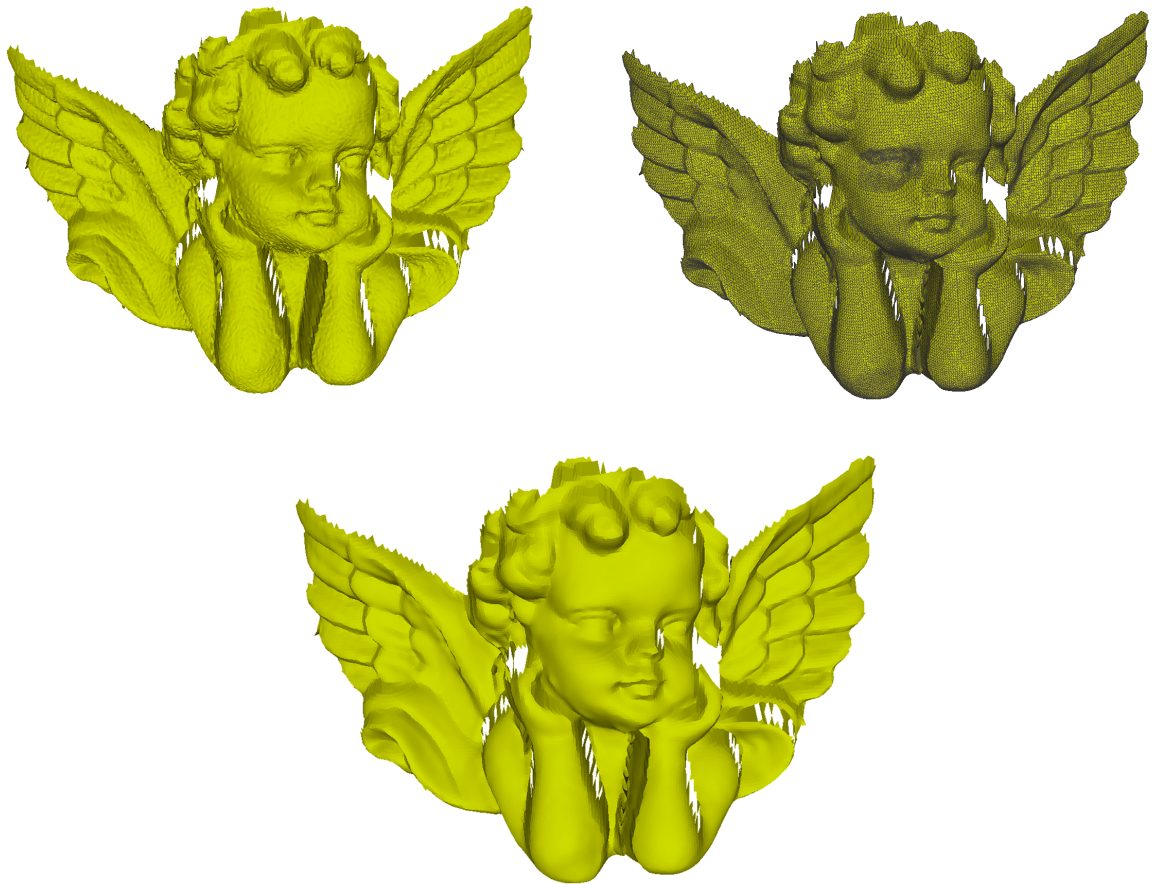


Figura 38 – Técnica proposta utilizada no modelo *angel*. Acima: modelo *angel* com ruído e ao lado com ruído e malha. Abaixo: o resultado da técnica proposta aplicada ao modelo *angel*.

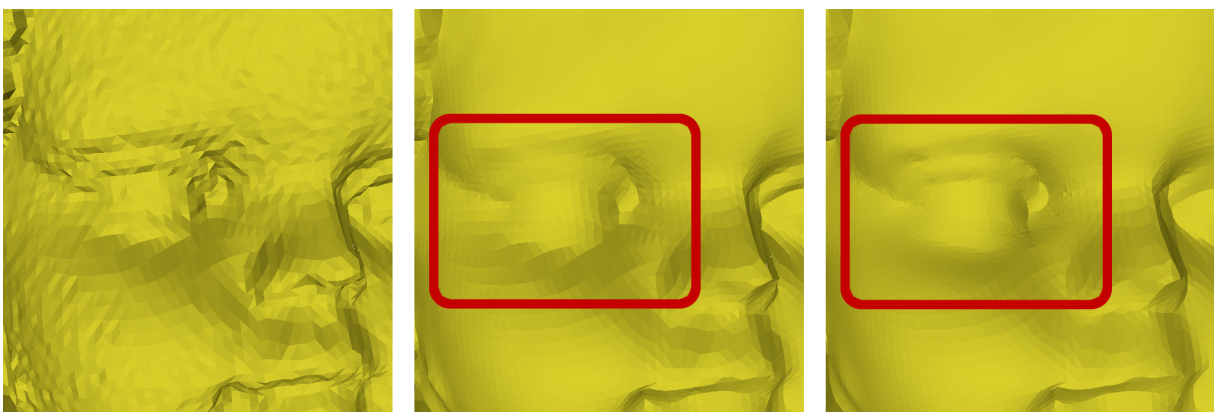


Figura 39 – Detalhe da região do olho do modelo *angel*. Da esquerda para a direita: modelo *angel* original com ruído, resultado da técnica proposta sem o passo de pré-processamento, resultado da técnica proposta com passo de pré-processamento.

Pode-se notar, pelas figuras, que a técnica proposta obtém os melhores resultados para todos os modelos. Por fim, uma comparação dos valores das métricas para as quatro técnicas

Tabela 1 – Comparação da técnica proposta com (ZHANG *et al.*, 2015), (SUN *et al.*, 2007) e (ZHENG *et al.*, 2011).

Modelo	Métrica de Erro	(ZHANG <i>et al.</i> , 2015)	(SUN <i>et al.</i> , 2007)	(ZHENG <i>et al.</i> , 2011)	Técnica Proposta
<i>Block</i>	Sample Points	6.000.000	6.000.000	6.000.000	6.000.000
	MHD Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0
	MHD Máximo	0,411390	0,380070	0,280138	0,231636
	MMHD	0,032300	0,35615	0,033508	0,031509
	Proporção de Volume	0,997919	0,997511	0,998231	0,9980328
<i>Carter</i>	Sample Points	6.000.000	6.000.000	6.000.000	6.000.000
	MHD Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0
	MHD Máximo	0,459855	2,364260	0,459855	0,440874
	MMHD	0,075780	0,164315	0,075759	0,075653
	Proporção de Volume	1,06965	1,06304	1,06965	1,06701
<i>Mechanic</i>	Sample Points	6.000.000	6.000.000	6.000.000	6.000.000
	MHD Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0
	MHD Máximo	0,377783	1,328610	0,235433	0,250672
	MMHD	0,032143	0,052403	0,033874	0,031893
	Proporção de Volume	0,995846	1,00102	0,998717	0,997236

é mostrado na Tabela 1. A técnica proposta obtém melhores resultados para todos os modelos nas métricas mais importantes, obtendo o menor MMHD para todos os modelos apresentados. Em negrito são mostrados os melhores valores encontrados para cada modelo.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Principais Contribuições

Esse trabalho apresentou uma técnica de otimização de malhas para remoção de ruídos de filtragem bilateral com pré-processamento. A técnica proposta apresenta bons resultados para qualquer tipo de modelo com ruído e ela possui um passo de pré-processamento que tem o objetivo de contribuir na otimização de, principalmente, modelos com ruídos que possuem qualidade de elementos excessivamente ruim.

Ao final deste trabalho foram apresentados, com ajuda de figuras, histogramas e tabelas, os resultados obtidos pela técnica proposta. Foi também mostrada a importância de melhorar a qualidade dos elementos de uma malha anteriormente à otimização propriamente dita. Conjuntamente, comparações foram apresentadas para mostrar o melhor desempenho da técnica proposta com o estado da arte em algoritmos de otimização de malhas para remoção de ruídos, em especial as técnicas descritas em (ZHANG *et al.*, 2015; SUN *et al.*, 2007; ZHENG *et al.*, 2011).

O trabalho proposto pode ser dividido basicamente em três etapas. A primeira consiste na análise e seleção de *patches* de elementos. A segunda constitui-se do *remalhamento* dos *patches* selecionados, convertendo essas regiões em áreas com uma melhor qualidade de elementos. A terceira e última etapa consiste na filtragem das normais da malha seguido da atualização de seus vértices. Essa última etapa é reproduzida iterativamente até um resultado satisfatório (cerca de 10 a 15 iterações dependendo do modelo).

As principais contribuições deste trabalho são a apresentação de uma nova técnica de otimização de malhas para remoção de ruídos, que também melhora a qualidade de seus elementos, e a confirmação da importância que a melhoria local da qualidade dos elementos da malha produz no resultado de uma técnica de otimização de malhas com intuito de remoção de ruídos.

5.2 Trabalhos Futuros

A técnica aqui apresentada possui três etapas principais. Na primeira etapa foi utilizado um julgamento visual por parte do usuário, onde ele escolhe as regiões a serem *remalhadas*. Uma investigação mais aprofundada deverá ser realizada no intuito da automatização

desse processo, onde métricas de qualidade de triângulos poderão ser usadas para saber quais regiões da malha entrarão no processo de *remalhamento*.

Na segunda etapa, o algoritmo de (MIRANDA *et al.*, 2009) foi utilizado. Algumas outras opções como (ATTENE *et al.*, 2013; ZHAO *et al.*, 2007) também poderão ser testadas, pois talvez possam produzir resultados ainda melhores para reconstrução de malhas. No entanto, no trabalho proposto há a existência de uma malha suporte, fazendo com que o *remalhamento* siga exatamente essa malha suporte, sendo portanto muito improvável que os resultados utilizando as técnicas de (ATTENE *et al.*, 2013; ZHAO *et al.*, 2007), que predizem por onde a reconstrução deve seguir, superem os resultados já apresentados no Capítulo 4. Um estudo mais detalhado, com comparações e implementações, deve ser realizado para este passo.

Na última etapa, um algoritmo de filtragem das normais e atualização de vértices é proposto baseado em (ZHANG *et al.*, 2015). Mais algumas comparações podem ser realizadas utilizando outras técnicas de otimização de malha neste passo, estendendo, dessa forma, a técnica proposta a uma técnica geral de pré-processamento para otimização de malhas, onde qualquer algoritmo de otimização pode ser configurado. Essa extensão não é algo trivial, necessitando de estudos mais aprofundados.

REFERÊNCIAS

- ATTENE, M.; CAMPEN, M.; KOBELT, L. Polygon mesh repairing: An application perspective. **ACM Computing Surveys (CSUR)**, ACM, v. 45, n. 2, p. 15, 2013.
- CHEN, C.-Y.; CHENG, K.-Y. A sharpness dependent filter for mesh smoothing. **Computer Aided Geometric Design**, Elsevier, v. 22, n. 5, p. 376–391, 2005.
- CIGNONI, P.; ROCCHINI, C.; SCOPIGNO, R. Metro: Measuring error on simplified surfaces. *In*: WILEY ONLINE LIBRARY. **Computer Graphics Forum**. [S. l.], 1998. v. 17, n. 2, p. 167–174.
- EISEMANN, E.; DURAND, F. Flash photography enhancement via intrinsic relighting. **ACM transactions on graphics (TOG)**, ACM, v. 23, n. 3, p. 673–678, 2004.
- FLEISHMAN, S.; DRORI, I.; COHEN-OR, D. Bilateral mesh denoising. *In*: ACM. **ACM transactions on graphics (TOG)**. [S. l.], 2003. v. 22, n. 3, p. 950–953.
- JONES, T. R.; DURAND, F.; DESBRUN, M. Non-iterative, feature-preserving mesh smoothing. *In*: ACM. **ACM Transactions on Graphics (TOG)**. [S. l.], 2003. v. 22, n. 3, p. 943–949.
- LIU, L.; TAI, C.-L.; JI, Z.; WANG, G. Non-iterative approach for global mesh optimization. **Computer-Aided Design**, Elsevier, v. 39, n. 9, p. 772–782, 2007.
- MIRANDA, A. C.; MARTHA, L. F.; WAWRZYNEK, P. A.; INGRAFFEA, A. R. Surface mesh regeneration considering curvatures. **Engineering with Computers**, Springer, v. 25, n. 2, p. 207, 2009.
- PETSCHNIGG, G.; SZELISKI, R.; AGRAWALA, M.; COHEN, M.; HOPPE, H.; TOYAMA, K. Digital photography with flash and no-flash image pairs. **ACM transactions on graphics (TOG)**, ACM, v. 23, n. 3, p. 664–672, 2004.
- SOLOMON, J.; CRANE, K.; BUTSCHER, A.; WOJTAN, C. A general framework for bilateral and mean shift filtering. **arXiv preprint arXiv:1405.4734**, 2014.
- SUN, X.; ROSIN, P.; MARTIN, R.; LANGBEIN, F. Fast and effective feature-preserving mesh denoising. **IEEE transactions on visualization and computer graphics**, IEEE, v. 13, n. 5, 2007.
- SUN, X.; ROSIN, P. L.; MARTIN, R. R.; LANGBEIN, F. C. Random walks for feature-preserving mesh denoising. **Computer Aided Geometric Design**, Elsevier, v. 25, n. 7, p. 437–456, 2008.
- TOMASI, C.; MANDUCHI, R. Bilateral filtering for gray and color images. *In*: IEEE. **Computer Vision, 1998. Sixth International Conference on**. [S. l.], 1998. p. 839–846.
- VOLLMER, J.; MENCL, R.; MUELLER, H. Improved laplacian smoothing of noisy surface meshes. *In*: WILEY ONLINE LIBRARY. **Computer graphics forum**. [S. l.], 1999. v. 18, n. 3, p. 131–138.
- WEI, M.; SHEN, W.; QIN, J.; WU, J.; WONG, T.-T.; HENG, P.-A. Feature-preserving optimization for noisy mesh using joint bilateral filter and constrained laplacian smoothing. **Optics and Lasers in Engineering**, Elsevier, v. 51, n. 11, p. 1223–1234, 2013.

YAGOU, H.; OHTAKE, Y.; BELYAEV, A. Mesh smoothing via mean and median filtering applied to face normals. *In: IEEE. Geometric Modeling and Processing, 2002. Proceedings.* [S. l.], 2002. p. 124–131.

ZHANG, W.; DENG, B.; ZHANG, J.; BOUAZIZ, S.; LIU, L. Guided mesh normal filtering. *In: WILEY ONLINE LIBRARY. Computer Graphics Forum.* [S. l.], 2015. v. 34, n. 7, p. 23–34.

ZHAO, W.; GAO, S.; LIN, H. A robust hole-filling algorithm for triangular mesh. **The Visual Computer**, Springer, v. 23, n. 12, p. 987–997, 2007.

ZHENG, Y.; FU, H.; AU, O. K.-C.; TAI, C.-L. Bilateral normal filtering for mesh denoising. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, IEEE, v. 17, n. 10, p. 1521–1530, 2011.