

Artur Pereira Sampaio

*Uso de Refinamento Adaptativo em Escultura
Virtual Para Criação Livre de Detalhes em
Malhas Triangulares*

Fortaleza

2011

Artur Pereira Sampaio

*Uso de Refinamento Adaptativo em Escultura
Virtual Para Criação Livre de Detalhes em
Malhas Triangulares*

Orientador:
Creto Augusto Vidal

Co-orientador:
Joaquim Bento Cavalcante Neto

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO
MESTRADO E DOUTORADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CRAB - COMPUTAÇÃO GRÁFICA, REALIDADE VIRTUAL E ANIMAÇÃO

Fortaleza

2011

Resumo

Modelar objetos e personagens virtuais pode ser uma tarefa tediosa e difícil em várias situações. Um sistema de modelagem ideal deve ser capaz de representar qualquer mudança ou característica desejada pelo usuário da forma mais rápida e transparente possível, abstraindo toda a complexidade topológica e matemática, permitindo ao modelador concentrar-se exclusivamente no ato de criar, em oposição a ter de especificar a posição de cada elemento de forma manual. Tal sistema, se por um lado pode oferecer menor controle na determinação da posição de cada vértice, além de poder ser mais caro computacionalmente em algumas situações, por outro simplifica enormemente o trabalho do artista, tornando a modelagem acessível a qualquer usuário. O presente trabalho abordou o problema das técnicas de *sculpting* tradicionais de adicionar detalhes em malhas triangulares, com resolução adaptativa e de forma interativa, em regiões com baixa densidade de vértices. O algoritmo proposto busca subdividir faces e arestas na região de interesse do artista de modo a garantir uma quantidade de vértices suficiente para representar o detalhe pretendido, sem necessidade de qualquer informação adicional por parte do usuário. O sistema resultante é capaz de encurtar a distância entre a modelagem tradicional e a virtual, superando alguns dos principais métodos propostos no meio acadêmico no que tange à localidade das subdivisões e a manutenção de uma malha de boa topologia e de boa qualidade geométrica, com poucos vértices de alta valência, ainda que o modelo original seja fracamente refinado, tornando possível a incorporação de novos detalhes.

Palavras-chave: Refinamento Adaptativo; Escultura Virtual; Interfaces de Modelagem.

Abstract

Modeling of virtual objects and characters can be tedious and difficult in many situations. A modeling system should be capable of representing any change or feature desired by the user as quickly and transparently as possible, allowing the modeler to focus on the act of creating, as opposed to having to specify the position of each vertex manually. Such a system, if on the one hand offers less control in determining the position of each vertex, being computationally more expensive in some situations, on the other hand greatly simplifies the work of the artist, allowing character modeling to be accessible to any user. This work addressed the problem of traditional sculpting techniques to add details on triangular meshes with adaptive resolution, in regions with low vertex density. The proposed algorithm splits faces and edges in the region of interest of the artist to ensure the existence of a sufficient number of vertices to represent the desired detail, without any additional input requested. The resulting system is capable of bridging the gap between traditional and virtual modeling, improving some of the main methods proposed in the literature regarding the location of the subdivisions. Moreover, it also helps to maintain a good mesh topology and geometric quality, with few vertices of high valence, even if the original mesh is poorly refined, allowing the incorporation of new details.

Keywords: Adaptive Refinement; Virtual Sculpting; Modeling Interfaces.

Conteúdo

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Organização do Trabalho	4
2 Trabalhos Relacionados	5
2.1 Escultura Digital Com Modelos Volumétricos	5
2.2 Escultura Digital com Modelos de Fronteira	9
3 Algoritmo Proposto	21
3.1 Introdução	21
3.2 Visão Geral da Técnica Proposta	22
3.2.1 Seleção e Avaliação	23
3.2.2 Subdivisão	26
Esquema de Subdivisão Loop	29
Esquema de Subdivisão RGB	30
3.2.3 <i>Sculpting</i>	32
3.2.4 Relaxamento	34
Operador Laplaciano	35
Esquema de Relaxamento Ohtake	35

4	Resultados	39
4.1	Introdução	39
4.2	Modelos	39
4.3	Descrição dos Testes	41
4.3.1	Seleção de uma Região da Malha	42
4.3.2	Subdivisão das Faces	44
4.3.3	<i>Sculpting</i>	47
5	Conclusões	51
	Referências	53

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de <i>sculpting</i>	2
1.2	Modelos reais e modelos digitais.	3
1.3	Analogia do pincel.	3
2.4	Exemplo 2D de ferramenta de modelagem baseada em voxels.	6
2.5	Manipulação direta de modelo volumétrico com pontos de controle e área de atuação definidos.	9
2.6	Modelos <i>manifold</i> e <i>non-manifold</i>	11
2.7	Adição de detalhes em sistemas de topologia fixa.	12
2.8	Definição da forma inicial por função implícita.	13
2.9	Exemplo 2D de FFD.	14
2.10	Exemplo 2D de DMFFD.	15
2.11	Operações <i>edge collapse</i> e <i>edge split</i>	17
2.12	União de vértices em uma malha <i>quasi-uniform</i>	18
2.13	Operadores de <i>Unlimited Clay</i>	19
2.14	Vértices de alta valência gerados em <i>Unlimited Clay</i>	20
3.1	Esquema de funcionamento da técnica proposta.	23
3.2	Círculos inscritos em duas faces triangulares.	25
3.3	Demonstração de uma etapa do algoritmo avanço_de_frenteira_geodésica.	27
3.4	<i>tradeoff</i> entre localização e qualidade.	28
3.5	Pesos utilizado no cálculo do posicionamento de novos vértices.	29
3.6	Pesos utilizado no cálculo do posicionamento dos vértices preexistentes na região a ser subdividida.	30

3.7	Refinamento de região de malha triangular.	31
3.8	Operadores RGB utilizados.	33
3.9	Replicação do esquema de subdivisão proposto por (LOOP, 1987) utilizando operadores RGB	33
3.10	Decaimento do módulo do deslocamento com aumento da distância geodésica em relação ao raio do pincel.	34
3.11	<i>Oversmoothing</i> causado por repetidas aplicações do operador guarda-chuva.	35
3.12	α_i e β_i no cálculo da curvatura média.	36
3.13	Descrição geométrica de $F(v)$	38
4.1	O cubo.	40
4.2	O octaedro.	41
4.3	A cabeça.	42
4.4	Seleção de vértices, arestas e faces.	43
4.5	Determinação do centro do pincel em malha altamente refinada.	44
4.6	Determinação do centro do pincel em malha fracamente refinada.	45
4.7	A esfera.	45
4.8	Resultado da etapa de subdivisão.	46
4.9	Efeito da ação de puxar sob diversos valores de f_{pincel}	48
4.10	Adição de detalhes em um cubo.	48
4.11	Determinação da distância geodésica dos vértices dentro da região de interesse.	49
4.12	Modelo de uma cabeça com a inserção de chifres.	50

Lista de Tabelas

4.1	O cubo.	40
4.2	O octaedro.	41
4.3	A cabeça.	41
4.4	A esfera.	44
4.5	Efeito da etapa de subdivisão ilustrada na Figura 4.8 nos vértices.	46
4.6	Efeito da etapa de subdivisão ilustrada na Figura 4.8 nas arestas.	47
4.7	Efeito da etapa de subdivisão ilustrada na Figura 4.8 nas faces.	47
4.8	Vértices da Figura 4.12.	49
4.9	Arestas da Figura 4.12.	50
4.10	Faces da Figura 4.12.	50

1 *Introdução*

Este Capítulo está dividido em duas seções. Na Seção 1.1 são introduzidos conceitos sobre escultura virtual, assim como sua aplicabilidade e a importância de seu uso em diversas áreas (animação, jogos, finalidades artísticas). Em seguida, na Seção 1.2, é apresentada a organização do trabalho.

1.1 *Motivação*

A modelagem de sólidos ou simplesmente modelagem é a subárea de Computação Gráfica, por sua vez um subconjunto da Ciência da Computação, encarregada da descrição de objetos reais ou fictícios no computador. Amplamente utilizada em CAD (*Computer Assisted Design*, ou projeto auxiliado pelo computador), em simulações e na indústria do entretenimento, a modelagem busca conciliar facilidade de descrição do objeto representado, por parte do usuário, com maleabilidade, velocidade e validade das informações contidas no modelo. Em geral, modelos são representados graficamente usando-se técnicas de apresentação ou *render*, facilitando a compreensão de sua forma pelo usuário.

Escultura virtual (também chamada de escultura digital, *digital sculpting*, *virtual sculpting* e *solid sculpting*) é um conjunto de técnicas de modelagem que consiste em replicar, em um ambiente digital, a experiência de um escultor no seu trabalho com argila ou outro material maleável de forma realista e intuitiva, abstraindo do usuário informações e controle exatos da posição de cada elemento que constitui o modelo.

Por simular o trabalho de um escultor, a técnica permite a geração de modelos orgânicos com grande facilidade, sendo empregada na criação de personagens e ambientes para jogos, animações e apresentações. Seu nível de abstração e relativa dificuldade para descrição de superfícies perfeitamente planas ou bordas com altas curvaturas, no entanto, limita seu uso em aplicações de engenharia ou de arquitetura, embora seja também possível o uso dessa técnica nessas áreas.

Por outro lado, por ser de fácil aprendizado e utilização, em conjunto com uma grande velocidade na geração dos modelos e a crescente disponibilidade de dispositivos de entrada hápticos, ou seja, com resposta tátil, a técnica tem sido cada vez mais utilizada por artistas e estúdios. A Figura 1.1 ilustra um exemplo de utilização de *sculpting* na modelagem da cabeça de um personagem, onde se pode observar que em nenhum momento foi exposta ao usuário a representação interna utilizada.

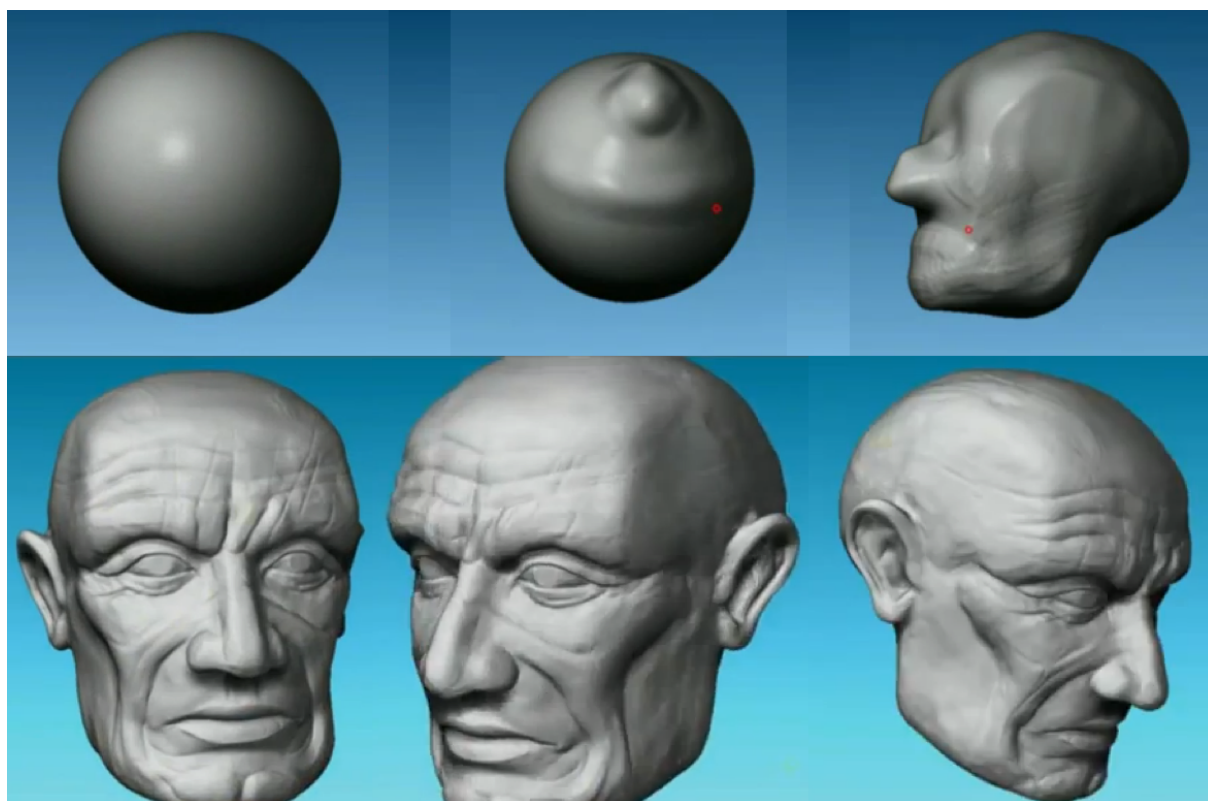


Figura 1.1: Exemplo de modelo gerado utilizando-se técnicas de *sculpting*. Acima, da esquerda para a direita: modelo esférico original, primeiros detalhes adicionados e versão intermediária do modelo. Abaixo: três vistas do modelo final, gerado em cerca de 1,5 hora.

Os modeladores que empregam técnicas de escultura virtual mais modernos são capazes de gerar modelos quase tão realistas quanto aqueles feitos com argila real, como se pode observar na Figura 1.2.

Em geral, ferramentas e *softwares* de *sculpting* buscam simular forças agindo sobre a superfície de um objeto inicial, gerado utilizando-se de técnicas de blocagem, que se deforma em resposta ao estímulo. A sequência, localização, duração e intensidade dos estímulos são controlados pelo usuário por meio de um pincel circular posicionado no espaço 3D. Essa ferramenta constitui uma analogia tridimensional do cursor amplamente utilizado em aplicativos de edição de imagens 2D, ilustrando o centro e o raio da região



Figura 1.2: Modelos reais e modelos digitais.

de interesse, além de sua orientação espacial, que indicará a direção em que os vértices da malha na região de interesse serão deslocados caso o usuário decida aplicar uma ferramenta. A Figura 1.3 ilustra essa comparação.

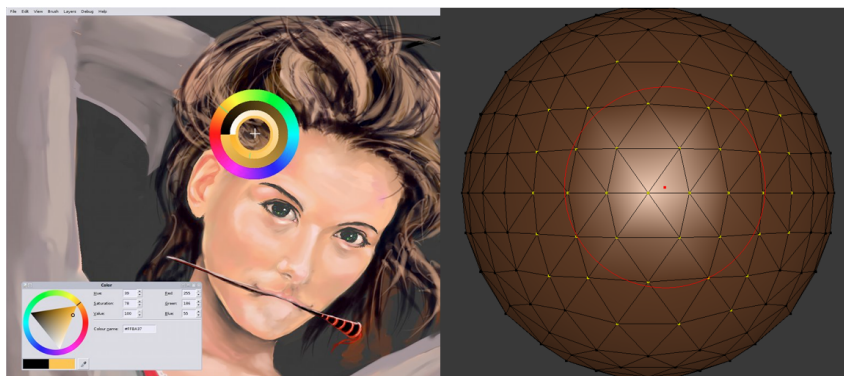


Figura 1.3: Analogia do pincel. A esquerda: pincel utilizado em programa de processamento de imagens (2D). Direita: pincel utilizado em aplicativo de *sculpting* (3D) desenvolvido com a técnica proposta.

A geração de algoritmos e a escolha da melhor forma de representação dos modelos, portanto, configuram-se nos maiores desafios no desenvolvimento de ferramentas de *sculpting*. Representações volumétricas, por exemplo, apresentam grande facilidade na realização de operações booleanas, possibilitando a criação e remoção de buracos e pontas no sólido de forma trivial, mas em geral possuem apenas informações implícitas de su-

perfície e alto custo de armazenamento, estando ainda sujeitas a efeitos de serrilhamento (*aliasing*) em regiões da superfície não alinhadas aos eixos coordenados. Já as representações de fronteira (*Boundary Representations*, ou B-reps), em geral de processamento e renderização mais rápidos e armazenamento mais compacto, dispõem de informações explícitas de superfície e conectividade, mas possuem uma estrutura mais rígida, com maior dificuldade para representar operações booleanas e adição/retirada de material.

A inexistência de uma representação perfeita, simultaneamente flexível, simples, compacta e rápida no processamento e na realização de operações booleanas, o surgimento e desenvolvimento de novas tecnologias hápticas, e o crescente número de artistas que se utilizam da técnica ilustram o tamanho do desafio e a relevância do trabalho daqueles que buscam desenvolver novas ferramentas de *sculpting*.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 2 aborda os trabalhos relacionados com *sculpting*. O Capítulo 3 é dedicado a descrever o algoritmo proposto no presente trabalho e a ilustrar resultados preliminares. Por sua vez, os resultados dos testes realizados são apresentados no Capítulo 4. Finalmente, o Capítulo 5 faz uma breve conclusão sobre o conteúdo abordado.

2 *Trabalhos Relacionados*

Este capítulo está dividido em duas seções. Na Seção 2.1 são descritos alguns trabalhos relacionados com escultura digital (*sculpting*) que se utilizam de modelos volumétricos. Em seguida, na Seção 2.2, são apresentados os trabalhos relacionados a *sculpting* que foram desenvolvidos com modelos de fronteira.

2.1 Escultura Digital Com Modelos Volumétricos

Dewaele e Cani (2004) afirmam que modelos volumétricos são mais próximos de argila real que modelos de fronteira, sendo a escolha natural em sistemas de argila virtual. Segundo os autores, as implementações de *sculpting* baseadas em modelos volumétricos utilizam campos escalares para representar os sólidos, sendo suas fronteiras implicitamente definidas como isosuperfícies.

O trabalho descrito em (GALYEAN; HUGHES, 1991) ilustra de forma adequada o funcionamento desse tipo de sistema. Esse trabalho propõe a representação de sólidos por meio de *voxels*, que podem ser entendidos como vetores de informações relativas a cada região do espaço 3D. O sólido é definido por sua função característica, que pode ser avaliada como valendo 1,0 em qualquer ponto do espaço em que exista argila e 0,0 nos outros locais (esses valores usados como limite podem variar entre implementações). A ideia dos autores reduz o trabalho de modelar o sólido à modificação dessa função.

Os autores fazem uma analogia ao exercício de alterar o sólido com o trabalho de pintar uma tela 2D utilizando um pincel digital, que altera o valor dos *pixels* da tela. Alguns desses valores indicarão a presença de tinta e outros, sua ausência. Na técnica proposta, os autores utilizam uma ferramenta 3D movida pelo espaço, em analogia exata ao pincel. A Figura 2.4 ajuda a ilustrar esta analogia.

Esse tipo de representação torna bastante simples a implementação de operações volumétricas, como cavar o sólido ou adicionar material, na medida em que a ferramenta

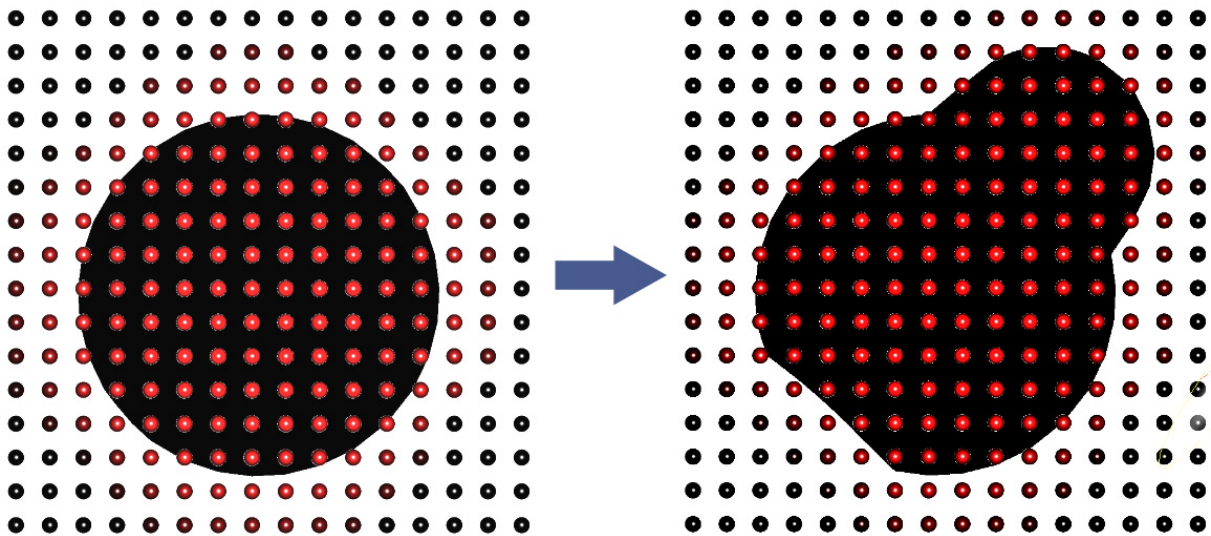


Figura 2.4: Exemplo 2D de ferramenta de modelagem baseada em voxels. Pontos em vermelho e em preto indicam, respectivamente, alta e baixa densidade de material. A figura em pano de fundo representa todo o espaço com densidade maior ou igual a um valor mínimo. Esquerda: espaço não alterado. Direita: *voxels* alterados provocam modificação na figura subjacente. (PILGWAY, 2011)

produz modificações locais nos valores do campo escalar. Operadores topológicos, como a criação e fechamento de cortes e buracos e a união e separação de partes do sólido, também podem ser implementados de forma trivial e sem a necessidade de criação de nenhum mecanismo especial. A técnica garante ainda a formação de sólidos fechados, *manifold*, sem autointerseção.

Embora implementações subsequentes tenham estendido o leque de opções de ferramentas, os autores definiram inicialmente a função de adição, que simula o depósito de argila sobre o objeto; arma de calor, que aparenta derreter parte do material, efetivamente removendo argila; e a função de nivelamento, que procura erodir pontas e preencher vales para dar um aspecto mais suave (*smooth*) à superfície.

A necessidade de armazenar grandes quantidades de dados (da ordem do cubo do espaço disponível para modelagem) e de calcular a isosuperfície para renderização ilustram duas das maiores desvantagens da utilização de modelos volumétricos.

A extração da superfície, embora não seja uma etapa obrigatória, facilita sobremaneira a renderização dos sólidos, sendo empregada em todos os sistemas que se utilizam de modelos volumétricos levantados. Essa extração é comumente feita utilizando-se do algoritmo *marching-cubes* (LORENSEN; CLINE, 1987), de complexidade $O(n^3)$ para uma grade de *voxels* de tamanho $n \times n \times n$ no sistema. Para evitar que a alta complexidade do algoritmo prejudique a interatividade do processo, os autores utilizam métodos

de avaliação para determinar quais regiões da isosuperfície foram afetadas, limitando o *marching-cubes* a essas regiões.

A adição de detalhes neste tipo de representação depende exclusivamente do tamanho e da densidade do campo escalar, bem como de sua capacidade de alterar estes parâmetros, ampliando os limites disponíveis para o artista. Caso esta expansão não seja feita de forma adaptativa, no entanto, o crescente uso de memória por parte do sistema pode rapidamente tornar seu uso proibitivo. Galyean e Hughes (1991) afirmam que, embora essa abordagem dê ao usuário controle de geometria e topologia de forma fácil e intuitiva, sendo capaz de gerar topologias complexas, é possível que o sólido representado sofra com a falta de detalhamento.

Ferley et al. (FERLEY; CANI; GASCUEL, 2001) superam esta limitação ao descreverem um sistema de *sculpting* capaz de representar grades de *voxels* com resolução adaptativa. Os autores iniciam sua grade com quantidade de elementos e densidade fixos, mas agrupam conjuntos de 8 *voxels* adjacentes, posicionados nas extremidades de um cubo, em células que podem ser recursivamente subdivididas, aumentando a densidade da grade, conforme o necessário, até que determinado parâmetro seja satisfeito. Cada célula guarda referências para a célula parental e para todas as suas células filhas, podendo sofrer operações de subdivisão (caso ainda não tenha sofrido) ou de colapso até que determinado parâmetro de resolução seja atingido. A estrutura resultante se assemelha a uma *octree*, mas cada célula pode se dividir em subcélulas de tamanho $n \times n \times n$ ($n \geq 2$) de modo a controlar a velocidade com que a densidade de *voxels* aumenta a cada nível.

Há algum tempo, o mercado vem percebendo as potencialidades das tecnologias baseadas em *voxels*, incorporando-as em seus sistemas de modelagem. O 3DCoat (PILGWAY, 2011) é um desses sistemas. O aplicativo dá suporte à adição de detalhes com resoluções adaptativas de forma intuitiva, além de possibilitar a geração e a importação de malhas, retopologia, tratamento de texturas e renderização, apresentando-se como uma solução de *pipeline* de modelagem completa. O aplicativo é vendido como um software de *sculpting* rápido, com suporte a programação paralela em GPU com CUDA (NVIDIA, 2011). Embora utilize prioritariamente uma representação de *voxels*, o aplicativo mantém informações de conectividade e topologia, permitindo operações de escala e rotação em parte ou na totalidade de seus modelos. Em função da inexistência de documentos técnicos descrevendo o funcionamento da ferramenta, no entanto, a comparação das vantagens e limitações deste *software* em relação a outras implementações torna-se inviável.

Eyyiyurekli e Breen (2010) também desenvolveram um sistema de argila virtual com

base em representações volumétricas. Os autores afirmam tratar o espaço de modelagem como campo escalar, ao mesmo tempo em que procuram manter informações de superfície. No que tange às vantagens de seu sistema, os autores ressaltam a facilidade de mudança de *genus*, a generalidade das operações que podem ser implementadas e a possibilidade da adição de *features* de forma simples e intuitiva. Em geral, *softwares* de escultura digital baseados em malhas possuem grande dificuldade para lidar com a criação de novas características (pontas, chifres, etc) em função da restrição da qualidade e da quantidade dos polígonos disponíveis. Ao se tentar esticar uma malha para geração de um chifre, por exemplo, o espaçamento dos vértices pode tornar o modelo bastante grosseiro naquela região, além de dificultar a criação de novas *features* dentro daquelas recém-criadas.

O trabalho cita ainda como uma das vantagens de se trabalhar com modelos volumétricos a grande quantidade de *input* que esses já possuem. Segundo os autores, embora seja tradicional o uso de modelos de fronteira para se representar a forma final de um sólido, tecnologias de escaneamento e de reconstituição de superfícies muitas vezes geram representações volumétricas de superfícies implícitas antes de converterem o objeto para modelos de superfícies explícitas. No que tange aos efeitos visuais avançados para filmes, os autores vão além, afirmando que representações de líquidos, enchentes e tempestades, em geral, exigem uma especificação volumétrica inicial, produzindo *datasets* dinâmicos de volume como saída.

O modelo proposto no artigo combina representações volumétricas de baixo nível com a matemática de superfícies implícitas modeláveis. Essa combinação torna possível o uso de equações diferenciais parciais (PDEs) para avaliação e cálculo da evolução da superfície do sólido de forma que o sólido seja sempre simples (no sentido de que ele nunca se autointercepta) e com superfícies fechadas.

A utilização de PDEs e do cálculo de isosuperfícies oferece ao sistema ainda a possibilidade de uma nova forma de edição: a manipulação direta de pontos de controle. Definida a fronteira do sólido (que pode ser atualizada iterativamente com base na região afetada por cada operação), o sistema pode exibir para o usuário pontos de controle que podem ser movidos diretamente, aproximando o sistema também de técnicas tradicionais de modelagem direta, sem perder a flexibilidade adquirida com a utilização de representações volumétricas. O usuário é ainda capaz de definir áreas de atuação de cada ferramenta desenhando uma região na superfície do sólido, incorporando também aspectos de *sketching* ao seu sistema. Caso essa área não seja especificada, um valor padrão é utilizado. A Figura 2.5 ilustra esse método de modelagem.

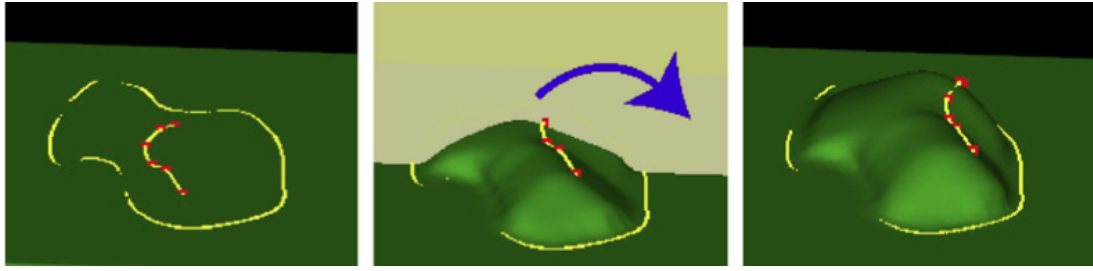


Figura 2.5: Manipulação direta de modelo volumétrico com pontos de controle e área de atuação definidos. Esquerda: pontos de controle e área de atuação são estabelecidos sobre a superfície do modelo. Centro: Pontos de controle deslocados em um arco. Direita: Superfície se adequa à restrição definida pelo usuário. (EYIYUREKLI; BREEN, 2010)

A principal restrição do sistema mais uma vez ilustra as características de modelos volumétricos. O uso de representações de superfícies implícitas tende a gerar modelos muito grandes, já que o campo escalar no qual está representado o sólido contém não somente informações relativas à superfície do objeto, como também relativas ao seu interior e ao ambiente externo. Além disso, a implicitude das superfícies dificulta a identificação de blocos lógicos no modelo. Como exemplo desta restrição, basta se perceber que o sólido não é tratado como um conjunto de partes (como cabeça, tronco e membros em um modelo humano) e sim como um volume. Essa restrição limita a implementação de operações como rotação e classificação de partes do modelo, sendo primeiro recomendada sua conversão em modelos de fronteira para se gerar o efeito desejado.

2.2 Escultura Digital com Modelos de Fronteira

Modelos de fronteira procuram representar sólidos como conjuntos finitos de elementos ao longo de sua borda, sendo esses elementos, em geral, chamados de faces ou *patches*. Dessa forma, a superfície é definida explicitamente, em oposição à utilização de superfícies implícitas, como em modelos volumétricos. Sobre a popularidade desses sistemas, Eyiurekli e Breen (2010) afirmam que modelos de fronteira têm sido a forma de representação mais difundida em computação gráfica, ainda que ressaltam o crescimento da utilização de modelos volumétricos em diversas áreas, como processamento de modelos, imagens médicas, biologia e efeitos especiais para filmes. A principal consequência da utilização de modelos de fronteira está no aumento da velocidade das operações geométricas e de renderização, em função da existência de informações de conectividade e de fronteira.

Modelos de fronteira são formados por conjuntos de pontos de controle agrupados em fragmentos ou “pedaços” de superfície, chamados de *patches*. No caso específico de

malhas poligonais, tais pontos de controle recebem o nome de vértices enquanto os *patches* são chamados de faces. Como a geometria de cada fragmento é definida exclusivamente pela quantidade e posição dos pontos de controle, estes representam a escolha natural de estrutura para manipulação da forma do objeto. As ferramentas de *sculpting* precisam apenas afetar a posição desses pontos para provocar alterações na geometria do modelo.

Em consonância com a afirmação (EYIYUREKLI; BREEN, 2010), a maioria das aplicações comerciais de *sculpting* que se utiliza de modelos de fronteira trabalha apenas com malhas poligonais e não permite alterações na topologia do objeto, como mudanças na conectividade e na quantidade de seus vértices, arestas e faces, permitindo apenas modificações na posição dos elementos constituintes. Tal restrição é comentada por Dewaele e Cani (2004) ao defenderem que, embora esses sistemas ofereçam interação em tempo real e várias outras características interessantes, a maioria deles está restrita a mudanças na geometria dos pontos da superfície, não permitindo modificações topológicas ou se utilizando de mecanismos complexos para a realização dos mesmos, além de muitas vezes não simularem algumas características físicas de argila real, como preservação de volume.

A complexidade das operações topológicas em modelos de fronteira e a preferência por não suportá-las nos principais sistemas de *sculpting* podem ser melhor entendidas quando se estuda o conceito de *manifoldness*. Um modelo de fronteira pode ser considerado 2-*manifold* se, em uma escala pequena o bastante, ele puder ser mapeado para um espaço euclidiano bidimensional, ou seja, se para cada ponto do modelo, sua vizinhança for homeomorfa a um disco (espaço $\mathbb{R}^2$).

De forma simples, uma malha *manifold* pode ser entendida como aquela que, por meio de movimentos na posição de seus vértices, possa resultar em uma esfera ou um toróide (com qualquer quantidade de furos) sem a presença de arestas soltas (vinculadas a apenas uma ou a nenhuma face), vértices desvinculados de arestas ou de faces ou arestas degeneradas (arestas que só possuem um ou nenhum vértice ou faces que possuem dois ou menos vértices) ou “coladas” (indicando que a intercessão de duas faces é mais que um conjunto de arestas ou que a intercessão de duas arestas é de mais de um vértice). A Figura 2.6 ilustra exemplos de malhas *manifold* e *non-manifold*.

Como promove uma diminuição do tráfego de informação com a placa gráfica, manter uma topologia fixa resulta em aumento na velocidade dos sistemas que se utilizam de topologia fixa (HERNANDEZ, 2011). Entretanto, como detalhes e outras características devem ser extraídos da topologia original, a diminuição da densidade dos vértices resultante de sucessivas operações geométricas pode inviabilizar a adição de detalhes e outras

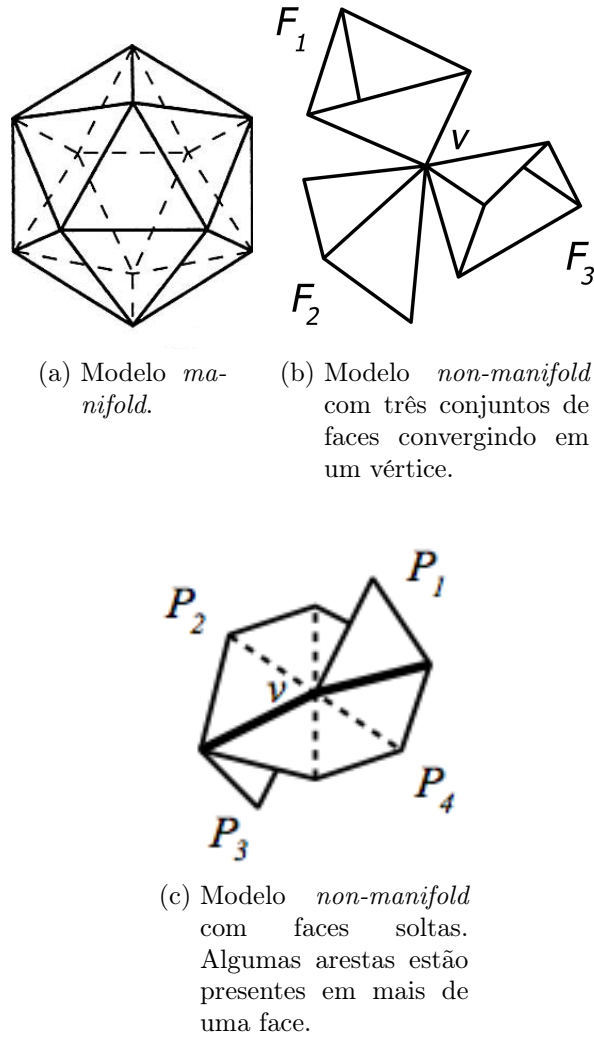
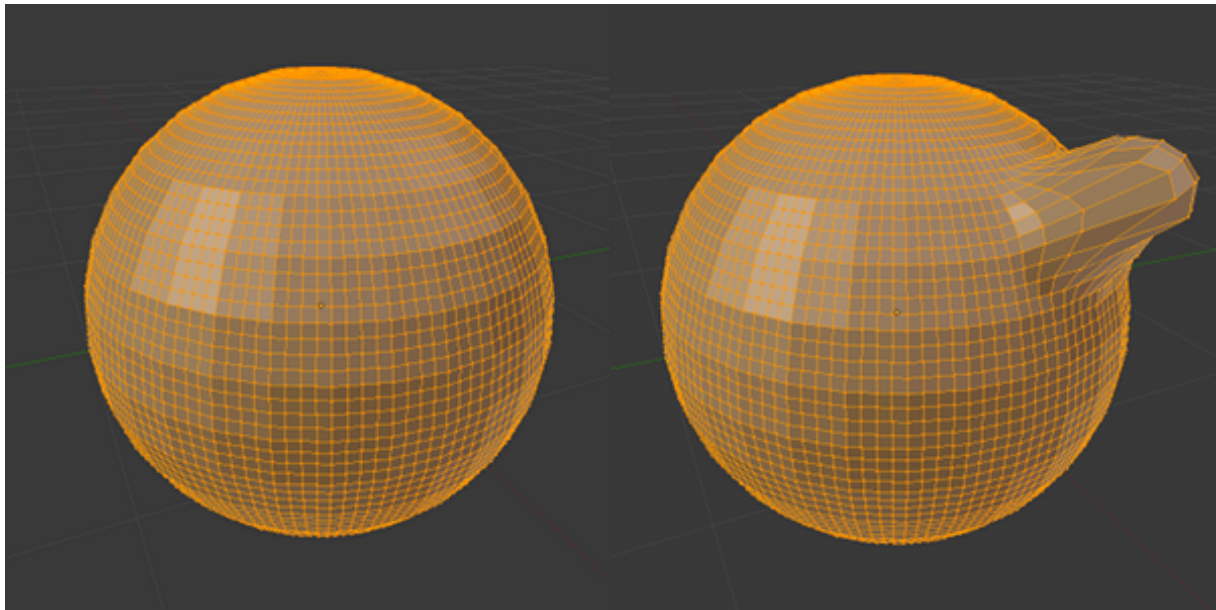


Figura 2.6: Modelos *manifold* e *non-manifold*.

características ao objeto. A Figura 2.7 ilustra melhor a questão.

Na busca de minimizar a limitação, a maioria dos sistemas comerciais modernos, como Blender (BLENDER FOUNDATION, 2011) e ZBrush (PIXOLOGIC, 2011b), permite que o usuário execute operações de subdivisão uniforme de faces, gerando malhas de múltiplas resoluções. A técnica permite que o usuário obtenha os elementos necessários para adição de detalhes, além de dar suporte a edição da malha em baixos níveis de resolução com preservação dos detalhes de alta frequência, gerados nos níveis mais elevados. No entanto, por se tratar de uma mudança global, a técnica tende a gerar regiões excessivamente densas, aumentando desnecessariamente o tamanho do modelo final, que cresce a taxas exponenciais em relação a quantidade de níveis de resolução.

Uma possível solução consiste em se gerar uma malha inicial que lembre, ainda que de forma grosseira, o objeto final. Essa técnica, conhecida como blocagem, permite que o



(a) Modelo inicial.

(b) Modelo após operação de inflar. Região afetada apresenta baixa densidade de vértices, dificultando a adição posterior de detalhes.

Figura 2.7: Adição de detalhes em sistemas de topologia fixa.

usuário reduza a quantidade de níveis necessários para a correta representação da figura final, mas é ineficaz quando se faz necessário adicionar ao modelo uma nova característica, não prevista no projeto original.

Na busca de superar esta limitação, Levinski e Sourin (2007) implementaram um modelo de argila virtual com representação por modelos de fronteira. Sua técnica consiste em obter inicialmente uma forma grosseira do objeto final em etapa de blocagem, definida por uma função matemática estabelecida pelo usuário. Esse bloco inicial pode ser mudado a qualquer momento por meio da alteração da função inicial, efetivamente adicionando ou removendo características e detalhes ao modelo. O bloco é, então, triangularizado. A densidade da malha resultante é configurável, permitindo ao usuário aumentar ou reduzir a frequência de vértices conforme sua necessidade de detalhamento a qualquer momento.

A malha inicial passa a sofrer o efeito de modificadores locais, aplicados por meio de ferramentas de *sculpting*, até que o objeto atinja sua forma final. Os modificadores são armazenados em uma fila com informações de tipo de efeito aplicado, posição e intensidade. Embora a malha tenha topologia fixa, alterações na função inicial ou na densidade da malha fazem com que o sistema reinicie o objeto e reaplique todos os modificadores, armazenados em fila, fazendo com que a malha se acomode à nova característica.

O sistema se utiliza de um mecanismo de *cluster* (agrupamento) de regiões para

rápida determinação da área de atuação de cada ferramenta ou operador. Tal mecanismo, segundo os autores, confere um ganho de performance significativo ao sistema.

Em consonância com o observado em (DEWAELE; CANI, 2004), o trabalho dos autores permite, em sua maior parte, uma modelagem simples e intuitiva, exceto no que diz respeito a mudanças topológicas intensas, como acréscimo de características na forma inicial do objeto (blocagem), que exige que o artista reescreva ou complemente a função inicial do objeto, um trabalho tedioso e complexo, exceto para os sólidos mais simples. Tais mudanças também podem resultar em tempos de processamento não interativos, já que todas ferramentas da fila criadas durante a modelagem devem ser reaplicadas na nova malha. A Figura 2.8 exemplifica o uso de uma função inicial.

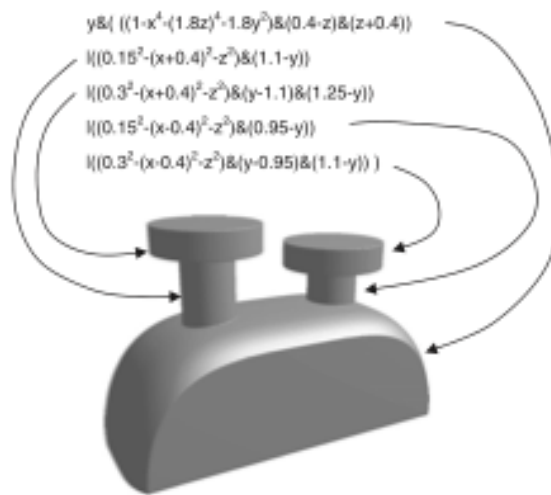
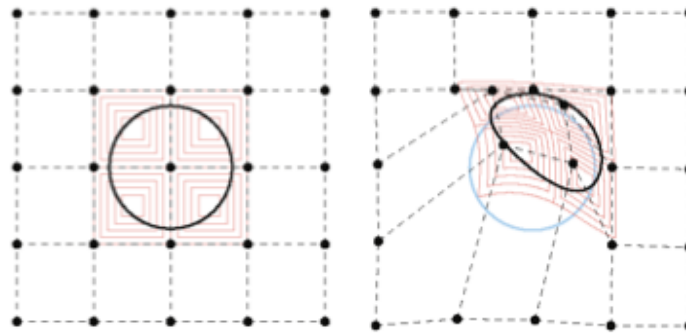


Figura 2.8: Definição da forma inicial por função implícita.

O sistema desenvolvido por (HSU; HUGHES; KAUFMAN, 1992) utiliza a técnica de *Direct Manipulation Of Free-Form Deformation* (DMFFD, deformação livre com manipulação direta, em uma tradução livre) para desenvolver um sistema de *sculpting*. A técnica é uma extensão de FFD (*Free-Form Deformation*), descrita por Sederberg e Parry (1986) que consiste em envolver o espaço do modelo em uma grade tridimensional (de agora em diante chamada de grade FFD) paralelepipedica e, por meio de alterações nos pontos de controles desta grade, provocar alterações no objeto contido.

Os elementos constituintes do objeto, como vértices, são parametrizados em relação aos pontos da grade FFD, ficando sua posição inicial definida como uma média ponderada das posições desses pontos de controle. Assim, a edição de um objeto é feita de forma indireta por meio de manipulações na grade FFD. Ressalta-se que a parametrização somente precisa ser feita uma única vez, quando da criação da grade. A Figura 2.9 ilustra um exemplo 2D da técnica.



- (a) Grade FFD 2D. Os pontos de controle estão distribuídos uniformemente. Quatro células e um círculo estão posicionados dentro da área de influência da grade.
- (b) Após a deformação dos pontos de controle pelo usuário, as células e o círculo ficam deformados

Figura 2.9: Exemplo 2D de FFD.

A extensão, DMFFD, consiste em se permitir que o usuário edite o sólido diretamente. Para Gain e Dodgson (2001), controlar uma deformação com a manipulação de pontos na grade FFD pode ser uma tarefa complicada e pouco intuitiva, além de exigir algum conhecimento da representação interna utilizada. Alguns pontos da grade podem até mesmo estar ocultos pela malha, dificultando seu acesso.

A técnica consiste em mapear, para a grade FFD, as alterações solicitadas pelo usuário, que trabalha movendo diretamente pontos da malha para uma posição alvo, gerando um vetor deslocamento intitulado de restrição. A ideia por trás da técnica é que o sistema identifique as alterações necessárias na grade FFD para que o ponto selecionado se desloque segundo a restrição, provocando, como consequência, a movimentação de toda a região em sua volta.

A técnica utilizada para determinar essas alterações na grade FFD é a dos mínimos quadrados, que busca mover cada ponto de controle o mínimo possível, ponderando esse deslocamento com a proximidade do ponto utilizado na determinação da restrição. A Figura 2.10 ilustra a modelagem por DMFFD em um exemplo 2D.

Em (GAIN; DODGSON, 2001), os autores estendem essa técnica ao incluírem prevenção contra auto-intercessão no modelo. Esta operação é feita dividindo-se o movimento necessário dos pontos da grade FFD para que a restrição seja satisfeita em etapas menores, em que se tem garantia de não haver auto-intercessão. Essa garantia é obtida com base nas propriedades do próprio DMFFD que, com base em alterações progressivas, impede

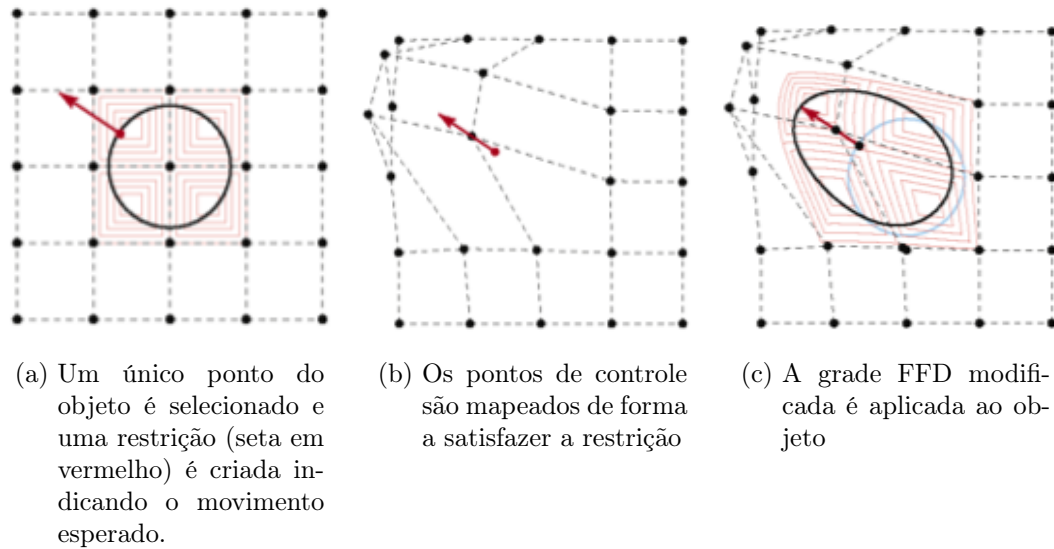


Figura 2.10: Exemplo 2D de DMFFD.

que um nó da grade de controle ultrapasse os planos que lhe cercam nessa grade, condição necessária para o surgimento de auto-intercessão.

Embora atestem as vantagens de DMFFD, Gain e Bechmann (2008) entendem que o método possui limitações, sendo a maior delas a falta de controle da região de influência de um movimento. Na Figura 2.10c, por exemplo, verifica-se que a área de influência do movimento independe da vontade do usuário, potencialmente afetando o objeto inteiro.

Os autores também reconhecem que a forma do objeto representado está intrinsecamente associada à forma e à densidade da grade FFD. Dessa forma, embora seja possível esticar o sólido em uma direção mantendo a riqueza dos detalhes, eventualmente a grade FFD ficará de tal forma esticada que será impossível ou impraticável a adição de mais detalhes. Os autores concluem afirmando que, embora seja possível a realização de refinamento adaptativo da grade FFD, a manutenção dessa nova estrutura iria retirar muito da generalidade e da velocidade da técnica.

Além disso, como é necessário que o usuário atue selecionando e movendo os pontos da malha, o sistema, ainda que conte com refinamento adaptativo, é incapaz de adicionar detalhes em regiões de frequência zero, ou seja, sem a presença de vértices.

Gain e Marais (2005) se utilizam da técnica de prevenção de auto-intercessão descrita em (GAIN; DODGSON, 2001) no sistema de modelagem denominado *Warp Sculpting*, mostrando serem capazes de gerar sólidos que não se interceptam, com subdivisão adaptativa e interface que em muito lembra o trabalho de um artista com argila. A técnica é definida pelos autores como um sistema que permite que uma variedade de ferramentas interaja

com um objeto de forma análoga ao trabalho com argila real.

O usuário controla a posição, tamanho e orientação das ferramentas, que carregam consigo um campo de deformação, que afeta diretamente os vértices da malha do objeto. Esse campo de deformação provoca rotação e deslocamento nos vértices e faces com base em funções de decaimento, de forma que os vértices mais próximos da ferramenta sejam mais afetados que aqueles mais distantes.

A técnica permite a criação dos mais diferentes tipos de ferramenta que, embora estáticas em sua forma, podem ser combinadas, utilizadas de forma simultânea, rotacionadas e escalonadas para customizar sua influência sobre o objeto.

Para manutenção de detalhes, os autores utilizam como critério de refinamento o algoritmo proposto em (GAIN; DODGSON, 1999), que leva em consideração o comprimento das arestas e o ângulo entre as normais dos vértices que lhe são incidentes, buscando garantir a qualidade dos triângulos com densidade adaptativa. A técnica permite, com sucesso, adicionar e remover detalhes e características de forma intuitiva e eficiente, já que mesmo pequenos detalhes podem ser capturados sem forçar o resto da malha a ter o mesmo nível de detalhamento de uma região afetada.

A principal limitação da técnica está na criação e manipulação das ferramentas. Na visão dos autores, sem a difusão de ferramentas hápticas, manipular uma ferramenta em um espaço 3D com a ajuda de apenas um *mouse* ou tela sensível ao toque pode ser tarefa pouco intuitiva, trabalhosa e tediosa.

Além disso, mais uma vez o efeito de uma determinada ferramenta é limitado aos vértices já existentes da malha. Se não alcançada uma frequência mínima de vértices, uma ferramenta pequena o bastante pode resultar em nenhum deslocamento, não provocando qualquer alteração na geometria do objeto e, portanto, também não alterando nenhuma propriedade avaliada para fins de subdivisão ou decimação, efetivamente não provocando alterações no objeto, o que pode frustrar o usuário.

Em (STANCULESCU; CHAINE; CANI, 2011), é descrito um sistema de *sculpting* baseado em malhas triangulares que procura manter uma densidade uniforme de seus triângulos, ao mesmo tempo em que permite mudanças na conectividade dos mesmos (adição/remoção de triângulos e *flip* de arestas) com a possibilidade adicional de realização de mudanças topológicas. O trabalho é baseado na manutenção de uma malha de boa qualidade, denominada *quasi-uniform mesh*, na qual todos os triângulos possuem as arestas dentro de um intervalo máximo e mínimo.

Ao selecionar uma região para ser movida, inflada ou aplainada, o tamanho das arestas, mantidas em uma fila, é monitorado. Arestas que ultrapassem o tamanho máximo, d_{detail} , são divididas em duas outras arestas (*edge split*) através da adição de um vértice em seu centro. A operação resulta na divisão dos dois triângulos que são adjacentes a aresta inicial em quatro. Ao forçar que todas as arestas da malha sejam menores que d_{detail} , o sistema permite garantir que uma densidade mínima, estabelecida pelo usuário, seja mantida por toda a malha, garantindo que regiões excessivamente esticadas como a ilustrada na Figura 2.7b não ocorram.

O trabalho também define um limite inferior, d , para o tamanho das arestas. Arestas de tamanho inferior a esse limite são colapsadas (*edge collapse*), exceto se esta mudança não resultar em uma malha *non-manifold*, efetivamente eliminando os dois triângulos e um dos vértices que lhe são adjacentes. Ressalta-se que d deve ser menor que a metade de d_{detail} , para que arestas colapsadas nunca resultem em arestas de tamanho superior a d_{detail} . A Figura 2.11 ilustra as operações de *edge split/collapse*.

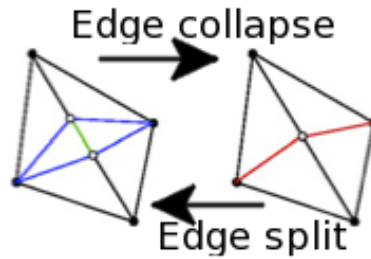


Figura 2.11: Operações *edge collapse* e *edge split*.

A limitação do tamanho mínimo permite não somente limpar regiões excessivamente densas, como também dá suporte para mudanças de genus. A malha, após ser feita conforme com os parâmetros d_{detail} e d , é intitulada de *quasi-uniform mesh*. Movimentos nos vértices são limitados a uma fração de d , de modo que a aproximação de dois vértices não adjacentes pode ser detectada antes que a malha sofra auto-intercessão. Quando a distância mínima entre dois vértices não adjacentes é menor que um valor limite, denominado $d_{thickness}$, é realizada a junção dos anéis de vértices adjacentes a ambos. A estratégia, ilustrada na Figura 2.12, permite aos autores substituir custosos testes de intercessão de polígonos por testes mais simples de colisão de esferas entre os vértices da região selecionada.

Embora seja capaz de adicionar detalhes e características de forma simples e intuitiva e de manter uma malha com elementos de boa qualidade, o trabalho peca ao representar apenas um nível de detalhamento. A adição de detalhes e características de tamanho inferior a d é impossível, sendo necessária a alteração do valor de d_{detail} , d e $d_{thickness}$.

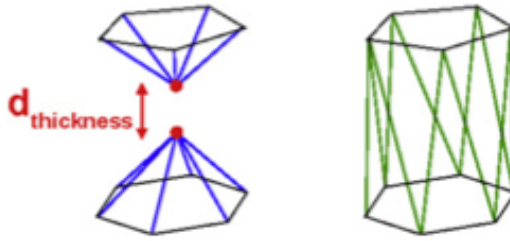


Figura 2.12: União de vértices em uma malha *quasi-uniform*.

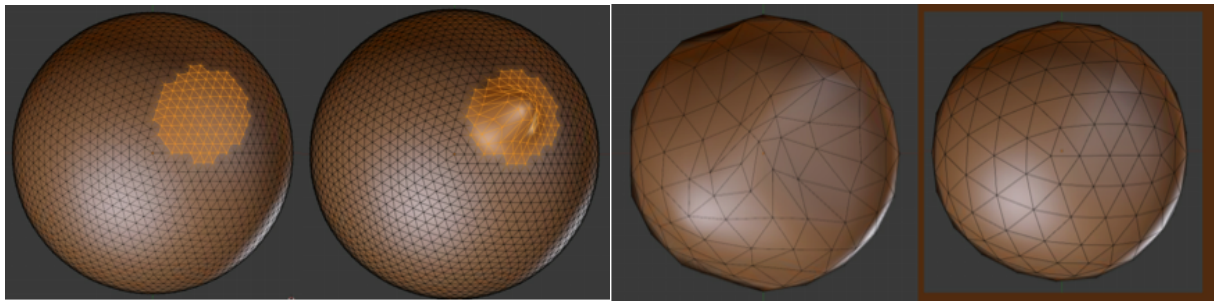
para representação dos mesmos, resultando em uma malha que pode ser excessivamente densa, apenas apresentando frequência de vértices adequada na região a ser detalhada. Os autores também colocam como limitação a incapacidade de representar regiões de alta curvatura em função dos operadores de *split* e *collapse* aplicados nas regiões deformadas.

Hernandez (2011) estendeu o software livre Blender (BLENDER FOUNDATION, 2011), incorporando resolução adaptativa em seu pipeline de *sculpting*, ao mesmo tempo em que procura formular um embasamento teórico para a construção de modelos de resolução adaptativa, buscando descrever o funcionamento de *softwares* comerciais, como o Sculptris (PIXOLOGIC, 2011a), que já disponibilizam para o mercado essa funcionalidade, mas sem documentos técnicos que descrevam sua mecânica interna.

A solução resultante, intitulada de *Unlimited Clay*, permite que o usuário adicione detalhes e características em sua malha em qualquer nível de detalhamento, mantendo uma densidade adequada por toda a malha. O autor define os operadores de subdivisão, colapso e relaxamento, a serem incorporados aos tradicionais operadores de *sculpting*, denominados de seleção de domínio e *sculpting*. A Figura 2.13 ilustra cada um desses operadores.

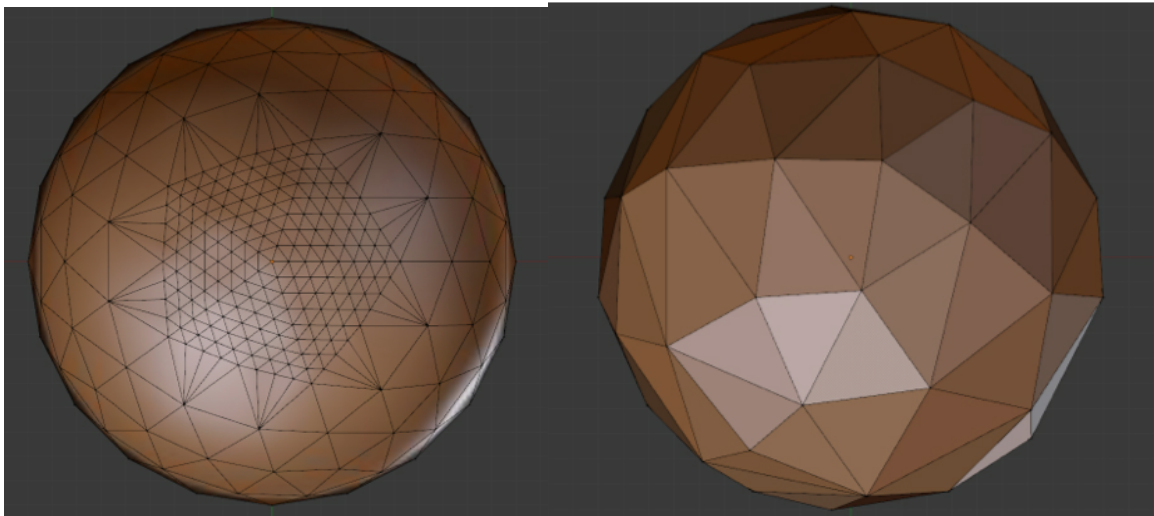
O autor defende que o operador de seleção deve selecionar não somente vértices, mas também arestas e faces ainda que parcialmente dentro de área de influência do pincel. A escolha visa a marcar para subdivisão faces grandes demais em relação ao raio do pincel de modo que as facetas resultantes possam ser esculpidas.

Após aplicado o operador de seleção, o efeito do pincel é aplicado através do operador de *sculpting*, provocando alterações na posição dos vértices da malha. A região alterada passa então por uma etapa de avaliação e o operador de subdivisão é aplicado. O operador de colapso é tratado apenas de forma teórica pelo autor, não sendo incorporado ao sistema. Embora destaque que inúmeros operadores de subdivisão e muitos critérios de qualidade possam ser utilizados, o autor opta pelo uso do esquema de subdivisão de



(a) Operadores de seleção de domínio e *sculpting*.

(b) Operador de relaxamento.



(c) Operador de subdivisão.

(d) Operador de colapso.

Figura 2.13: Operadores de *Unlimited Clay*.

Loop, identificando as faces triangulares que precisam ser subdivididas com base no raio do círculo inscrito a cada face e em um tamanho máximo especificado pelo usuário.

O operador de relaxamento utilizado é uma versão modificada do algoritmo de relaxamento Laplaciano, que procura minimizar o deslocamento da direção da normal de cada vértice para evitar deformações na forma do objeto com pinceladas sucessivas. Tal algoritmo move cada vértice em direção ao centróide médio de seus vértices adjacentes.

O sistema permite a adição de quaisquer características dentro do nível de detalhamento especificado pelo usuário, que pode ser controlado por meio da alteração do valor de uma variável, com manutenção de uma malha de boa qualidade. Se o nível de detalhamento especificado for alto o suficiente, os detalhes podem ser adicionados até mesmo em regiões de baixa ou nenhuma frequência de vértices.

O autor alerta, no entanto, que o algoritmo proposto tende a gerar vértices extraordinários com alta valência, ou seja, com grande quantidade de vértices adjacentes, que

podem destruir a fluidez da topologia. A Figura 2.14 mostra alguns desses vértices gerados pela técnica.

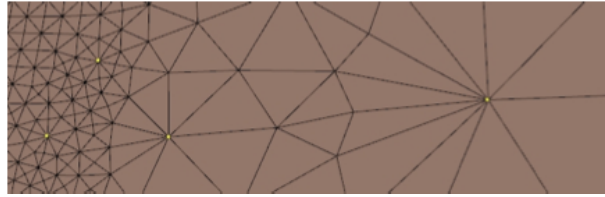


Figura 2.14: Vértices de alta valência gerados em *Unlimited Clay*.

Outra restrição do sistema está na necessidade de o próprio usuário determinar o nível de detalhamento desejado, o que expõe parte da mecânica interna do sistema. Idealmente, o autor coloca que alguma métrica associada ao tamanho do pincel seria mais eficiente em reproduzir o trabalho de esculpir argila real. Outra adição sugerida seria a implementação de um operador de colapso, que reduziria densidade de vértices em regiões de baixa curvatura ou que necessitassem de pouco refinamento.

3 *Algoritmo Proposto*

3.1 Introdução

Um sistema de *sculpting* perfeito deve ser capaz de capturar e representar as alterações pretendidas pelo usuário de forma rápida e intuitiva, mantendo uma representação interna compacta e de alta qualidade que não limite o usuário ou que se deixe transparecer. O modelo deve ainda manter informações de conectividade, facilitar operações de *render*, rotação de partes do objeto e adição de detalhes de alta frequência, além da manutenção de atributos, como cor e textura. É o desafio de atender simultaneamente a todos esses requisitos a principal dificuldade da criação de sistemas de *sculpting* e a razão da profusão de abordagens para o problema, cada qual focada em atender uma parte desses objetivos sem que, até o momento, tenha emergido uma abordagem unificada.

O objetivo deste capítulo é ilustrar um método de edição de malhas triangulares que oferece uma interface intuitiva para o usuário, ao mesmo tempo em que permita a inserção de *features* e detalhes no modelo com manutenção de uma malha de boa qualidade, a despeito da densidade inicial de vértices. O modelo é capaz de acrescentar detalhes ainda que, inicialmente, inexista vértice na região de interesse. Como visto, esta restrição iria comprometer a usabilidade da maioria dos sistemas estudados.

A densidade e a conectividade dos vértices, dentro da área de efeito do pincel, são alteradas localmente e de forma automática, e o efeito destas modificações tende a ficar restrito à região e a sua vizinhança. Uma maior discussão sobre o *tradeoff* entre qualidade e localidade das operações é feita na Seção 3.2.2.

O método melhora aspectos importantes de trabalhos que se utilizam de DMFFD, a exemplo de (HSU; HUGHES; KAUFMAN, 1992), na medida em que oferece maior controle sobre a área de influência das ferramentas e permite manipulações mais gerais, desvinculadas da capacidade de representação de uma grade de densidade fixa. Também resulta em melhorias sobre trabalhos que permitem a criação de *features*, mas que procuram man-

ter uma densidade constante na malha, como o apresentado em (STANCULESCU; CHAINE; CANI, 2011), na medida em que se utiliza de uma solução adaptativa e, portanto, mais adequada para a representação de detalhes.

A interface com o usuário também é mais simples que a do método proposto por Gain e Marais (2005), resultando em ganhos de tempo para o artista. O usuário atua sobre o objeto movendo um pincel circular por sua superfície, determinando assim uma região de influência. Ao realizar um clique com o mouse, a superfície dentro do raio de ação da ferramenta sofre deformação, resultando na adição de novas características ao modelo.

3.2 Visão Geral da Técnica Proposta

O método proposto se constitui em uma mistura de diversas técnicas. A estratégia resultante monitora continuamente a qualidade e a densidade da malha na região de influência, provocando alterações locais na topologia e no posicionamento dos vértices para garantir que existam elementos suficientes para efetuar a transformação desejada sem que, para isso, o usuário precise tomar qualquer conhecimento da topologia ou da mecânica do método empregado, assim como a técnica exposta por Hernandez (2011), mas sem a necessidade de uma variável especial controlada pelo usuário.

Com base no raio, posição e orientação do pincel utilizado, o método identifica a região de interesse do usuário e procura garantir que existam elementos suficientes para edição antes de realizar a operação de *sculpting* indicada. O tamanho máximo de cada elemento, até então estabelecido pelo usuário, é determinado como uma fração do raio do pincel, simplificando ainda mais o processo de modelagem.

Em paralelo, procura-se eliminar ou afastar vértices de alta valência da região de interesse. Uma etapa posterior de relaxamento é aplicada para garantir não só uma boa qualidade da malha, como também para facilitar futuras operações realizadas nos mesmos elementos.

A técnica está dividida em quatro etapas, a saber:

- Seleção e Avaliação, discutida na seção 3.2.1;
- Subdivisão, descrita na seção 3.2.2;
- *Sculpting*, detalhada na seção 3.2.3;
- Relaxamento, ilustrada na seção 3.2.4.

A cada etapa de uma pincelada, um processo cíclico de seleção e avaliação identifica faces a serem subdivididas e calcula a distância geodésica de cada vértice dentro da região de influência do pincel até que se atinja um nível de detalhamento adequado. Em seguida, os vértices são movidos e novo ciclo de avaliação e subdivisão é executado. Por fim, a região de influência passa por etapa de relaxamento. A Figura 3.1 ilustra esse processo.

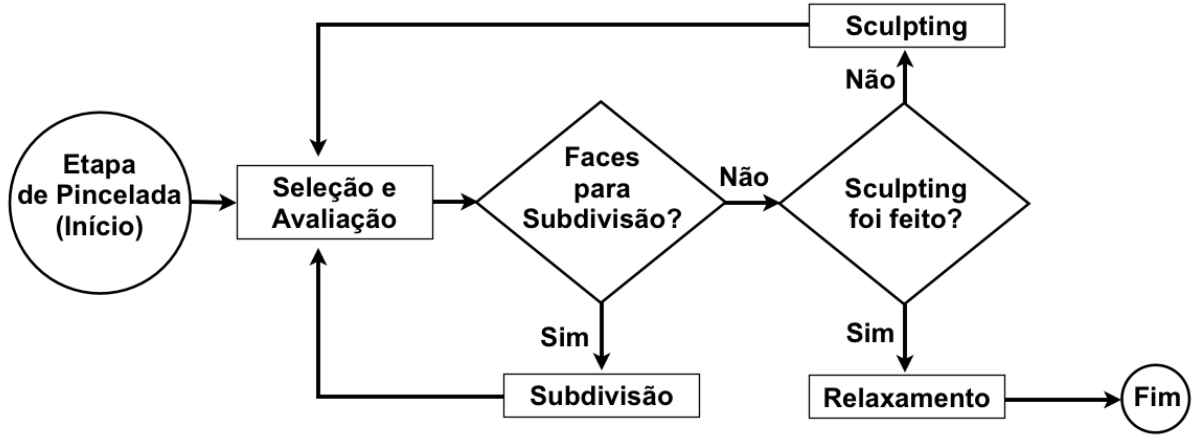


Figura 3.1: Esquema de funcionamento da técnica proposta.

3.2.1 Seleção e Avaliação

A etapa de seleção e avaliação em muito se assemelha à etapa de seleção de outros sistemas de *sculpting* baseados em malha, com algumas importantes diferenças. x A identificação da face selecionada, onde é posicionado o centro do pincel, é feita utilizando-se a técnica de *raycasting*. A técnica, de força bruta, pode ser acelerada utilizando-se de técnicas de *bounding box* ou *bounding sphere*, de partição de domínio e de remoção de faces ocultas. Identificada a face $f_{central}$ selecionada e o centro da ferramenta c_{pincel} , a normal da seleção n_{pincel} pode ser facilmente calculada como a interpolação das normais dos vértices constituintes de $f_{central}$.

Uma fila l de elementos selecionados é criada contendo $f_{central}$, seus vértices e arestas. A fila é percorrida e cada um de seus elementos, se próximos o bastante de c_{pincel} , adiciona ao fim de l seus componentes vizinhos que ainda não estejam na mesma.

A distância máxima d_{max} de c_{pincel} que permite a inclusão de elementos vizinhos é definida com base no raio do pincel r_{pincel} como $d_{max} = r_{pincel} * A$, onde $A \in \mathbb{R} \geq 1$. A opção de se incluir elementos mais distantes de c_{pincel} que r_{pincel} visa a garantir que a região de influência fique o mais uniforme possível após a etapa de subdivisão, transferindo para uma região de transição vértices de alta valência que venham a ser criados nessa etapa.

Com base em testes e observações, optou-se pelo uso de $A = 1.1$.

As funções de processamento de cada elemento podem ser vistas nos Algoritmos 3.1, 3.2 e 3.3, aplicadas durante a varredura de l .

Função processa_vértice($v(x, y, z)$):

Se $\sqrt[3]{(x - c_{pínel}.x)^2 + (y - c_{pínel}.y)^2 + (z - c_{pínel}.z)^2} \leq d_{max}$ **então**
 Adiciona a l os vértices e faces vizinhos a v que não estejam em l

Algoritmo 3.1: Função de processamento dos vértices de l

Função processa_aresta($e(v_1(x_1, y_1, z_1)$ a $v_2(x_2, y_2, z_2)$):

$a \leftarrow (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$
 $b \leftarrow 2[(x_2 - x_1)(x_1 - c_{pínel}.x) + (y_2 - y_1)(y_1 - c_{pínel}.y) + (z_2 - z_1)(z_1 - c_{pínel}.z)]$
 $c \leftarrow c_{pínel}.x^2 + c_{pínel}.y^2 + c_{pínel}.z^2 + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2$
 $\quad - 2(c_{pínel}.xx_1 + c_{pínel}.yy_1 + c_{pínel}.zz_1) - d_{max}^2$
 $\Delta \leftarrow au^2 + bu + c$
Se $\Delta \geq 0$ **então**
 $u_1 \leftarrow \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2a}, u_2 \leftarrow \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a}$
Se $0 \leq u_1 \leq 1$ ou $0 \leq u_2 \leq 1$ **então**
 Adiciona a l os vértices e faces vizinhos a e que não estejam em l

Algoritmo 3.2: Função de processamento das arestas de l

Função processa_face(f):

Adiciona a l os vértices e arestas de f que não estejam em l
 $f.raio_do_círculo_inscrito \leftarrow 2area(f) / (\sum_{e \in arestas(f)} comprimento(e))$
Se $f.raio_do_círculo_inscrito \geq \sqrt[3]{r_{pínel}}$ **então**
Se f ainda não estiver na fila *subdivisão* **então**
 Adiciona f ao fim de *subdivisão*

Algoritmo 3.3: Função de processamento das faces de l

A estratégia visa a incluir em l faces ainda que estejam parcialmente dentro da esfera definida pelo píncl, de modo que mesmo faces significativamente maiores que $r_{pínel}$ sejam corretamente subdivididas e esculpidas (HERNANDEZ, 2011).

Faces cujo valor calculado de raio do círculo inscrito seja maior que um valor limite, empiricamente estabelecido como $\sqrt[3]{r_{pínel}}$, são colocadas em uma nova fila *subdivisão*.

A escolha da utilização de r_{pinel} como base do parâmetro que determina a subdivisão busca atender à demanda implícita de detalhamento por parte do usuário, manifestada no tamanho da ferramenta.

A utilização do raio do círculo inscrito como variável de comparação visa a compatibilizar a análise da área das faces com seu aspecto, marcando faces grandes e aproximadamente equiláteras para subdivisão, evitando que faces longas e delgadas sejam geradas ou subdivididas ulteriormente, resultando em um maior número de faces degeneradas. A Figura 3.2 ilustra o método.

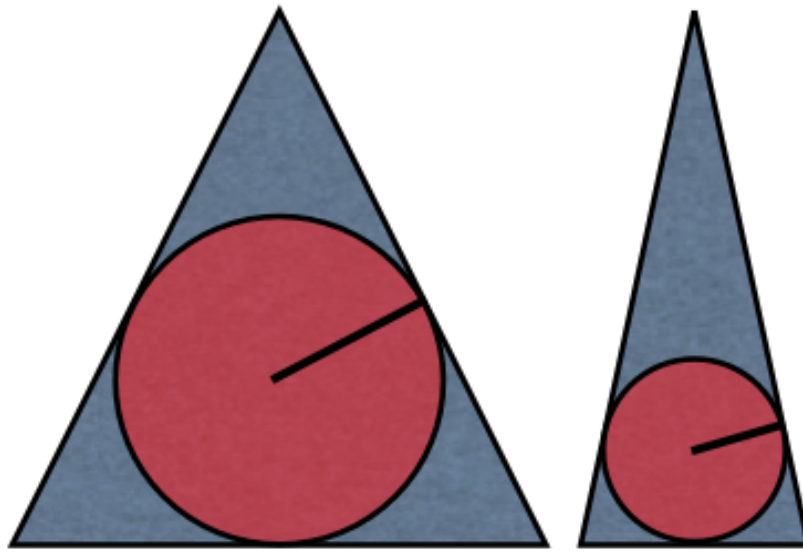


Figura 3.2: Círculos inscritos em duas faces triangulares. A face da esquerda pode ser subdividida com um r_{pinel} maior que o necessário para determinar a subdivisão da face da direita. (HERNANDEZ, 2011)

A última etapa do algoritmo de seleção é a determinação da distância geodésica aproximada dos vértices de l , que irá servir de peso na interpolação da força aplicada sobre cada vértice em uma dada etapa do movimento do pincel. Os vértices de l são colocados em um conjunto, **não_processados**, além de serem inicializados dois outros conjuntos de vértices vazios, **tentativa** e **fixos**.

O algoritmo busca, inicialmente, estabelecer uma fronteira de vértices para os quais a distância geodésica é conhecida, composta pelos três vértices de $f_{central}$. A fronteira avança em todas as direções, atualizando a distância geodésica dos vértices de l e incorporando novos elementos até que um valor aproximado da distância geodésica de todos os vértices encontrados nas etapas anteriores seja determinada.

O Algoritmo 3.4 ilustra a forma de cálculo da distância geodésica baseada em (NOVOTNI; KLEIN; LI, 2002). Seu funcionamento pode ser melhor ilustrado na Figura 3.3.

Função avanço_de_frenteira_geodésica:

Para cada vértice $v(x, y, z)$ de $f_{central}$ faça

Remove v de **não_processados**

$v.distância_geodésica \leftarrow \sqrt{(x - c_{pínel}.x)^2 + (y - c_{pínel}.y)^2 + (z - c_{pínel}.z)^2}$

Insere v em **fixos**

Enquanto $tentativa \cup não_processados$ não estiver vazio **faça**

Para cada vértice $v(x_v, y_v, z_v) \in (tentativa \cup não_processados)$ que esteja em uma mesma face que $o(x_o, y_o, z_o)$ e $p(x_p, y_p, z_p) \in$ **fixos** **faça**

Se $v \in não_processados$ **então**

Remove v de **não_processados**

Insere v em **tentativa**

$v.distância_geodésica \leftarrow$ indefinido

$dist1 \leftarrow o.distância_geodésica + \sqrt{(x_v - x_o)^2 + (y_v - y_o)^2 + (z_v - z_o)^2}$

$dist2 \leftarrow p.distância_geodésica + \sqrt{(x_v - x_p)^2 + (y_v - y_p)^2 + (z_v - z_p)^2}$

$distância \leftarrow \min(dist1, dist2)$

Se $v.distância_geodésica =$ indefinido **ou**

$v.distância_geodésica > distância$ **então**

$v.distância_geodésica \leftarrow distância$

Remove vértice $t \in$ **tentativa** de menor distância_geodésica

Insere t em **fixos**

Algoritmo 3.4: Cálculo da distância geodésica dos vértices de l

Na prática, mantém-se um conjunto de arestas identificando a fronteira do conjunto **fixos**. A opção visa acelerar as buscas por elementos adjacentes de **tentativa** $\cup$ **não_processados** por meio de operações de adjacência.

3.2.2 Subdivisão

A etapa de subdivisão sucede à de seleção e avaliação sempre que o conjunto *subdivisão* não estiver vazio. Nesta etapa, busca-se, por meio da subdivisão de faces, garantir que tanto o tamanho das mesmas quanto a quantidade de vértices dentro da região de ação do píncl sejam suficientes para representar a característica desejada pelo usuário.

Como se sabe, modelos polinomiais são apenas representações de objetos reais. O grau de proximidade do modelo polinomial (discreto) com um objeto contínuo é, em grande parte, medido pela quantidade de elementos. Malhas fracamente refinadas podem resultar em modelos mais compactos e de rápido processamento, mas de aspecto visual empobrecido. Nesse sentido, a subdivisão resulta em um maior refinamento do modelo, fazendo com que este, na região subdividida, em tese se torne mais “próximo” do objeto

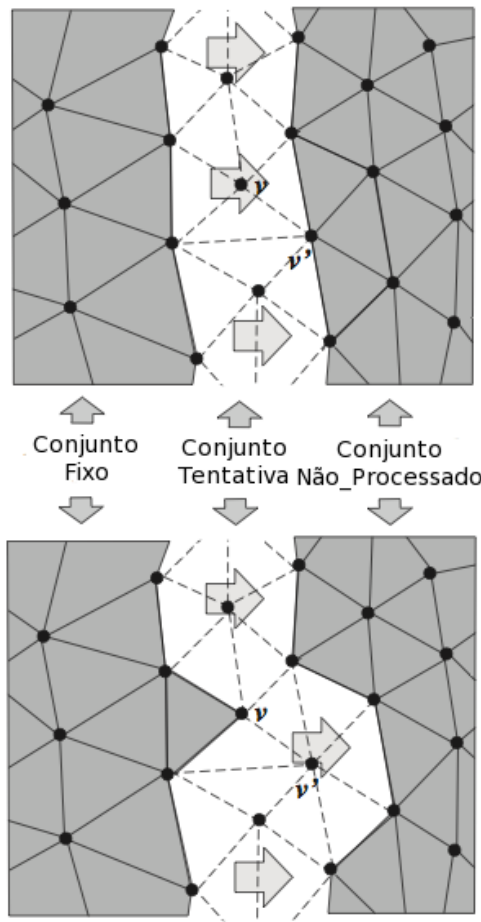


Figura 3.3: Demonstração de uma etapa do algoritmo avanço_de_frenteira_geodésica. Na imagem, a fronteira avança da esquerda para a direita. As áreas cinzentas a esquerda e a direita indicam os grupos **fixos** e **não_processados**, respectivamente. Os vértices da região em branco estão no grupo **tentativa**. Na etapa retratada v , que possui o menor valor de distância_geodésica dentre os vértices de **tentativa**, é adicionado ao grupo **fixos** e o vértice v' , adjacente a uma aresta de fixos, é adicionado ao grupo **tentativa**. (NOVOTNI; KLEIN; LI, 2002)

representado, sendo capaz de retratar detalhes mais realistas. De fato, após sucessivas subdivisões, o modelo pode se tornar visualmente equivalente ao objeto idealizado.

A subdivisão descontrolada, no entanto, também pode gerar problemas. Cuidado deve ser tomado com o crescimento exponencial da quantidade de elementos a cada etapa de subdivisão, o que se traduz em modelos computacionalmente mais complexos, de renderização e processamento mais lentos e de armazenamento mais custoso, ainda que talvez de melhor qualidade.

Idealmente, deve-se buscar um modelo compacto que permita, em cada parte da malha, somente a quantidade necessária de elementos para representar de forma satisfatória a seção correspondente do objeto. Esta restrição traz consigo não só o problema de identi-

ficar o nível de refinamento necessário em cada parte da malha, como também o problema de criar uma técnica capaz de acomodar diferentes níveis e realizar a transição entre eles.

Uma transição brusca é capaz de restringir os efeitos da modelagem à região de interesse e a sua vizinhança mais próxima, mas tende a gerar grande quantidade de elementos degenerados ou de qualidade inferior em sua fronteira, enquanto que transições suaves tendem a melhor preservar a qualidade da malha, mas possuem o potencial de estender seus efeitos de forma global, aumentando a densidade de elementos em regiões em que isto seria dispensável. As diferenças entre as duas estratégias podem ser melhor vistas na Figura 3.4.

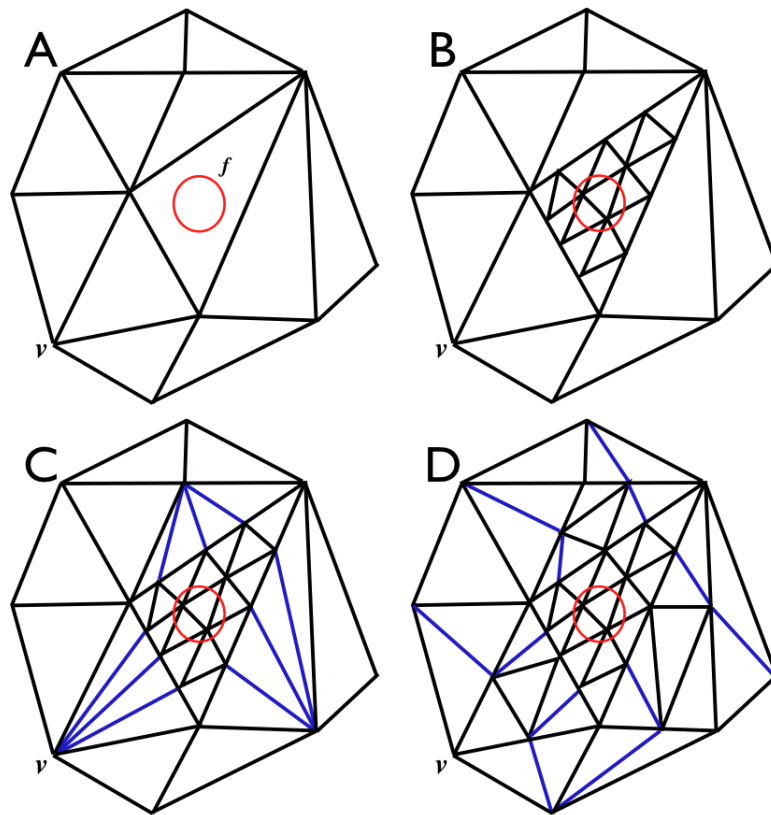


Figura 3.4: *tradeoff* entre localização e qualidade. Em A, a face central f é selecionada com o pincel. Em B, o esquema de subdivisão descrito em (LOOP, 1987) é aplicado em f e em cada um dos triângulos resultantes, fazendo com que suas faces adjacentes tenham, cada uma, 6 vértices. Em C, faces adjacentes a f são re-triangularizadas pelo traçado de arestas de limpeza de seus novos vértices a um dos vértices originais, gerando vértices de alta valência (v passa a ter valência 8), mas restringindo o efeito da subdivisão à vizinhança imediata da face selecionada. Em D, a subdivisão feita em B é compatibilizada com nova aplicação do esquema previsto em (LOOP, 1987) nas faces quadrangulares resultantes, aumentando a propagação do efeito mas gerando vértices de menor valência.

No presente trabalho, o método empregado para determinação do nível de refinamento é aquele descrito na abaixo, que se baseia no raio do pincel utilizado.

Esquema de Subdivisão Loop

No que tange a subdivisão, utilizou-se o método descrito por (PUPPO; PANOZZO, 2009) por sua facilidade de implementação, baixo custo computacional e por convergir em uma continuidade C^2 na região subdividida se aplicado recursivamente.

O algoritmo é uma extensão do algoritmo descrito por (LOOP, 1987), que busca subdividir todas as arestas incidentes a pelo menos uma face marcada para subdivisão por meio da adição de um vértice em seu centro. A posição geométrica desse novo vértice é calculada em função da posição dos quatro vértices preexistentes das faces que lhe são incidentes. Também os vértices originais são deslocados na direção do centróide de sua vizinhança, favorecendo a suavidade da superfície e novas arestas são traçadas, conectando os novos vértices dentro de cada face.

A medida resulta na criação de quatro novos triângulos em substituição a cada face original. A Figura 3.5 ilustra a determinação dos pesos no cálculo da posição dos novos vértices e a Figura 3.6 retrata a determinação dos pesos utilizada para se computar a nova localização dos vértices originais. A Figura 3.7, por sua vez, mostra o funcionamento geral do esquema.

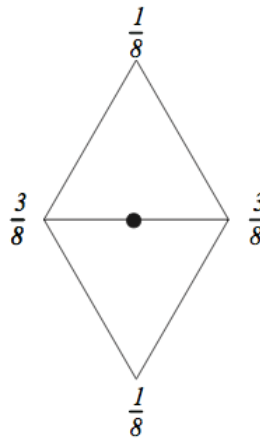


Figura 3.5: Pesos utilizado no cálculo do posicionamento de novos vértices.

A técnica possui a vantagem adicional de gerar novos vértices com valência 6, considerada ideal para malhas triangulares conforme o exposto por Zorin et al. (ZORIN et al., 2000) e de não interferir na valência dos demais vértices das faces em que é aplicada.

Entretanto, a utilização da técnica em regiões menores que a totalidade da malha acaba por gerar faces com mais de três vértices na fronteira da região subdividida. Em função dessa incompatibilidade, optou-se, no presente trabalho, pelo uso do esquema de subdivisão RGB, descrito por Puppo e Panozzo (PUPPO; PANOZZO, 2009) e detalhado a

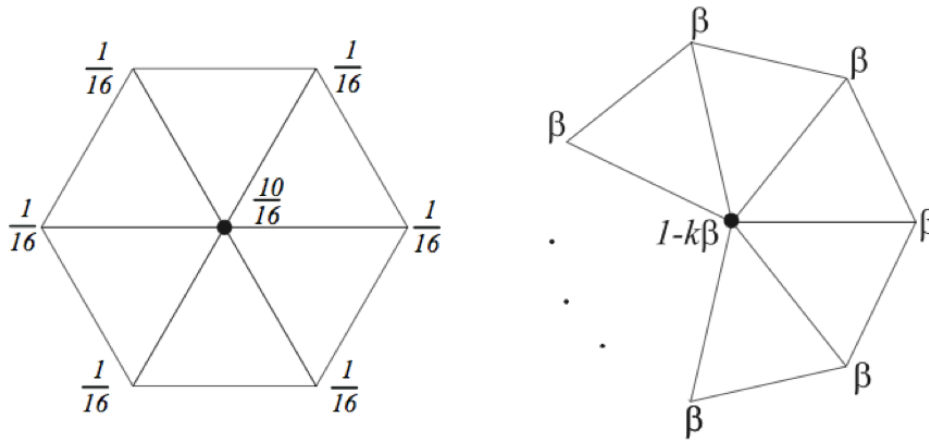


Figura 3.6: Pesos utilizado no cálculo do posicionamento dos vértices preexistentes na região a ser subdividida. Vértices deslocados na direção do centróide de seus vizinhos. A esquerda: atribuição de pesos para vértices regulares (valência 6). A direita: Atribuição de pesos para vértices de valência k . (LOOP, 1987) sugere o uso de $\beta = \frac{1}{k}(5/8 - (\frac{3}{8} + \frac{1}{4}\cos\frac{2\pi}{k})^2)$

seguir, que busca compatibilizar o esquema descrito por (LOOP, 1987) com o isolamento da região afetada e a manutenção estrita de faces triangulares.

Esquema de Subdivisão RGB

O esquema de subdivisão RGB busca solucionar a questão da não conformidade das faces criadas no esquema anterior, bem como o controle da região de transição de refinamento, ao condensar todas as modificações topológicas necessárias à subdivisão de uma malha triangular em um conjunto de operações que, se aplicadas de forma individual, tem a capacidade de adicionar ou remover apenas um vértice.

O esquema de subdivisão proposto em (LOOP, 1987), portanto, pode ser replicado com a combinação de operadores RGB, que possuem a vantagem de propagar o efeito de uma subdivisão para uma vizinhança próxima de forma reversível e de sempre garantir a conformidade da malha triangular. Esta característica permite que a adição de arestas de limpeza não interfira em futuras subdivisões executadas na região de transição, já que estas podem ser removidas de forma natural e automática pela técnica.

Conforme o descrito por Puppo e Panozzo (PUPPO; PANOZZO, 2009), o esquema exige a classificação de todas as arestas e faces da malha em um dos três grupos, identificados pelas cores vermelho, verde, e azul (do inglês **R**ed, **G**reen, **B**lue, de onde o esquema extrai o seu nome), sendo os elementos verdes os mais estáveis e os azuis mais instáveis, com a peculiaridade adicional de que arestas serão sempre verdes ou vermelhas.

Inicialmente, arestas e faces de uma malha recebem a cor verde e uma variável adici-

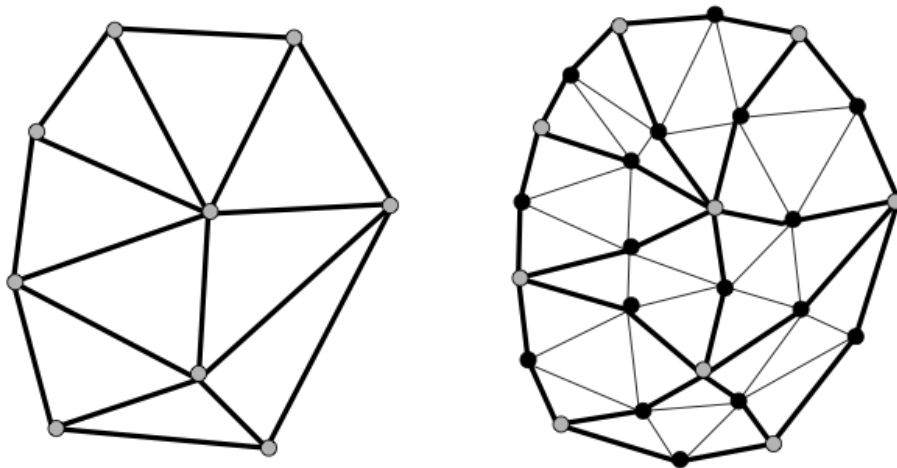


Figura 3.7: Refinamento de região de malha triangular. Esquerda: malha original. Direita: malha após uma etapa de subdivisão utilizando o método proposto. Novos vértices são mostrados como pontos pretos. Cada aresta da malha original é dividida em duas, e novos vértices são reconectados depois de passarem por etapa de relaxamento. Cada face original é substituída por quatro triângulos. (LOOP, 1987).

onal de nível com valor 0 é atribuída a todos os elementos, indicando que estão estáveis e que compõem a base da malha.

Os autores colocam como regra geral que o nível de um triângulo é definido como nível mais baixo dentre suas arestas e que a sua classificação de cor será verde se todas as arestas estiverem no mesmo nível, vermelho se duas arestas estiverem em um nível l e a terceira estiver no nível $l + 1$, e azul se uma aresta estiver no nível l e duas estiverem no nível $l + 1$. Nenhuma outra configuração é possível.

Uma aresta e na malha de nível l poderá ser dividida sempre que for verde e seus triângulos adjacentes t_0 e t_1 estiverem no nível l por meio da adição de um novo vértice em seu centro de nível $l + 1$. As duas arestas que substituem a aresta e também serão verdes e estarão no nível $l + 1$. Arestas vermelhas podem apenas ser rotacionadas, nunca subdivididas.

Para garantir a conformidade, uma nova aresta é gerada ligando o vértice recém-gerado ao vértice oposto a e em t_0 e em t_1 . Se um triângulo subdividido desta maneira for verde, a aresta que o subdivide será vermelha no nível l , enquanto que se o triângulo for vermelho, a aresta será verde no nível $l + 1$.

A técnica proposta no presente trabalho emprega todos os operadores de refinamento, além do operador de rotação BB, de suporte aos operadores de refinamento, definidos em (PUPPO; PANOZZO, 2009) e listados abaixo. Os operadores e seus respectivos efeitos estão retratados na Figura 3.8 e a lista de etapas para reproduzir a subdivisão descrita

em (LOOP, 1987) pode ser vista na Figura 3.9.

- Subdivisão GG: t_0 e t_1 são ambos verdes. As arestas que dividem esses triângulos e que passam por e geram, cada uma, dois triângulos vermelhos de nível l . Cada triângulo vai ter uma aresta verde de nível l (uma das arestas originais de t_0 ou t_1 que não foram afetadas pela subdivisão), uma aresta verde de nível $l + 1$ (uma das metades de e) e uma aresta vermelha de nível l (aresta criada para subdividir t).
- Subdivisão RG: t_0 é verde e t_1 é vermelho. O triângulo t_0 recebe uma aresta bissetora e e é dividida como na Subdivisão GG. A bissetão de t_1 gera um triângulo azul de nível l e um triângulo verde de nível $l + 1$, incidente a aresta verde de nível $l + 1$ de t_1 e suas outras duas arestas estão no nível $l + 1$. O triângulo azul é incidente a uma das arestas vermelhas de t_1 e a duas arestas verdes de nível $l + 1$.
- Subdivisão RR: Ambos os triângulos t_0 e t_1 são vermelhos. Ambos os triângulos recebem arestas de bissetão como na Subdivisão RG, ficando ambos com a mesma configuração formada por um triângulo azul de nível l e um triângulo verde de nível $l + 1$. Este caso possui duas variantes, a depender da sequência de cores das arestas não compartilhadas por t_0 e t_1 . Ambos os casos, Subdivisão RR1 e RR2, podem ser vistos na Figura 3.8.
- Rotação BB: t_0 e t_1 são ambos azuis adjacentes a uma mesma aresta vermelha, todos de nível l . A aresta que divide os triângulos é removida e uma nova aresta ligando a outra diagonal do quadrilátero resultante é inserida. A nova aresta e ambos os triângulos gerados pela bissetão serão de nível $l + 1$.

O esquema resultante é capaz de gerar subdivisões realmente adaptativas, sendo possível a alteração do nível de refinamento de uma determinada região em até dois níveis para cada anel de triângulos circundando a mesma, gerados especificamente pelo método para garantir a conformidade da malha e uma transição fluida entre regiões de densidades divergentes.

3.2.3 *Sculpting*

A função de *sculpting* segue a etapa de seleção e avaliação quando não houver faces marcadas para subdivisão e apenas uma vez por etapa de uma pincelada, sendo substituída pela fase de relaxamento quando já houver sido executada. O objetivo desta etapa é

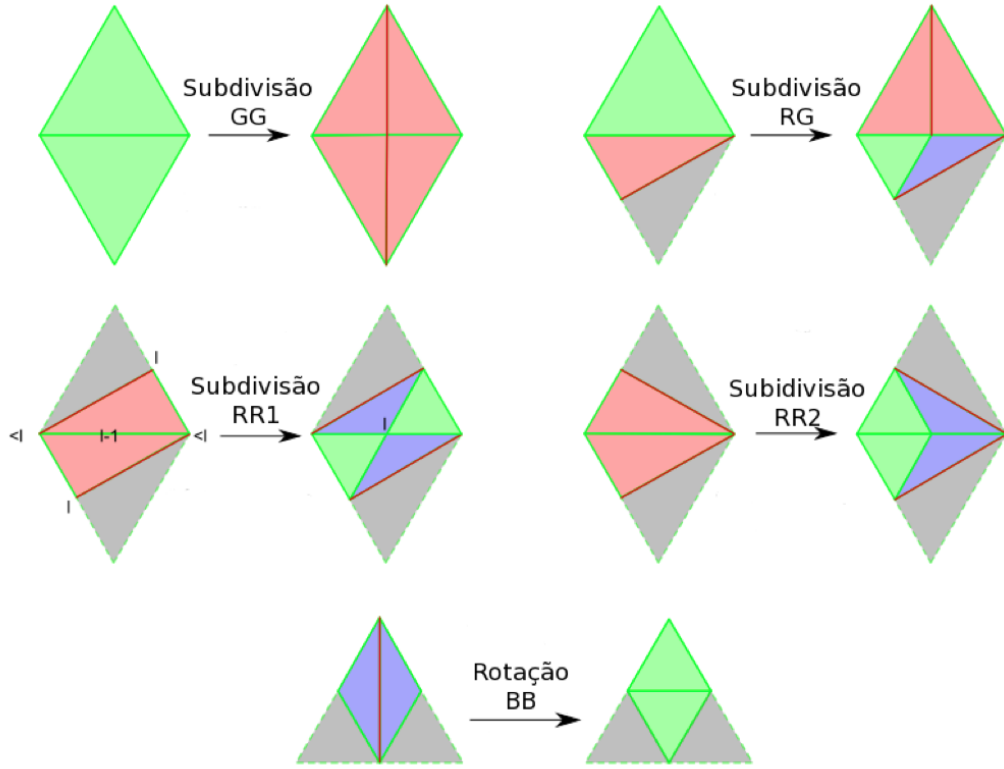


Figura 3.8: Operadores RGB utilizados. (PUPPO; PANOZZO, 2009).

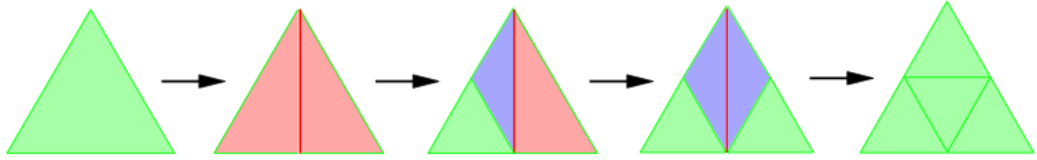


Figura 3.9: Replicação do esquema de subdivisão proposto por (LOOP, 1987) utilizando operadores RGB. A subdivisão é feita por meio de três operações de subdivisão de arestas e uma operação de rotação. (PUPPO; PANOZZO, 2009)

adequar a malha à forma idealizada pelo usuário de maneira análoga ao trabalho de adicionar, puxar ou empurrar argila real.

O algoritmo percorre o conjunto **fixos**, preenchido na etapa de avaliação. A cada vértice v identificado, aplica-se um vetor deslocamento na direção da normal da seleção, n_{pincl} , por uma distância calculada em uma função de decaimento.

Embora diferentes equações de decaimento sejam possíveis, optou-se pelo uso da equação para o módulo do vetor deslocamento $y = f_{pincl}(((\beta - 1.0)x^\beta - \beta x^{\beta-1}) + 1.0)^{\beta-2}$, onde:

- f_{pincl} representa uma variável controlada pelo usuário associada com a força da ferramenta. Maiores valores de f_{pincl} irão implicar em um maior deslocamento dos vértices da malha na região de influência;

- x corresponde $\min(\frac{v.distância_geodésica}{r_{pínel}}, 1.0)$;
- β corresponde ao fator de decaimento, empiricamente fixado em 4.

A Figura 3.10 ilustra o comportamento desta função para $f_{pínel} = 1$. Observa-se que a função produz um efeito de suavização tanto próximo do valor de $x = 0.0$ quanto do valor de $x = 1.0$ (*ease in ease out*).

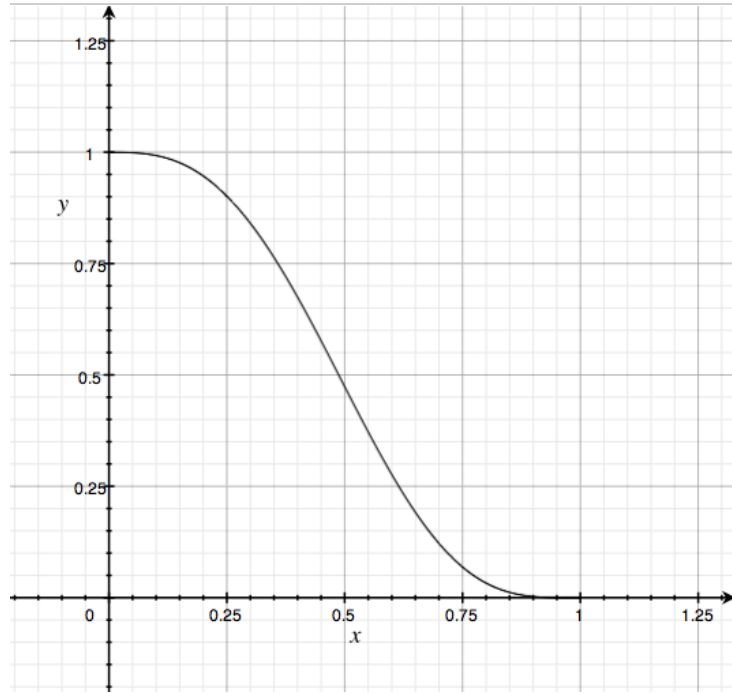


Figura 3.10: Decaimento do módulo do deslocamento com aumento da distância geodésica em relação ao raio do píncl.

Após esta operação, um novo ciclo de seleção, avaliação e subdivisão é executado, buscando identificar e tornar conformes faces que, depois de terem seus vértices modificados, tornem-se grandes demais para o nível de refinamento estabelecido pelo píncl.

3.2.4 Relaxamento

A fase de relaxamento completa a técnica proposta, provocando redução de ruídos de alta frequência nos vértices dentro da região de interesse, ao mesmo tempo em que favorece uma maior regularidade na distribuição dos vértices. O método empregado neste trabalho, descrito originalmente por Ohtake e Belyaev (OHTAKE; BELYAEV; BOGAEVSKI, 2000), também é capaz de preservar detalhes e características adicionados ao modelo e de conferir às superfícies afetadas um aspecto mais suave.

De forma geral, o algoritmo pode ser visto como um variante da popular técnica de relaxamento laplaciano, que procura mover cada vértice na região de interesse na direção, com uma velocidade relacionada com a curvatura média da superfície no vértice.

Operador Laplaciano

O operador Laplaciano, também conhecido como operador guarda-chuva, identifica o centróide da vizinhança de cada vértice v , deslocando v na direção da posição encontrada.

O cálculo do centróide da vizinhança de v pode ser calculado como $U(v) = \frac{1}{\sum_i w_i} \sum_i w_i Q_i - P_{anterior}(v)$, onde a soma é feita em todos os vértices adjacentes a v e w_i são valores de peso positivos: a nova posição P_{nova} de cada vértice v , originalmente na posição $P_{anterior}(v)$, a cada aplicação do operador, pode ser encontrada com base na fórmula $P_{nova} = P_{anterior}(v) + \lambda U(v)$, onde $\lambda \in \mathbb{R} \leq 1$.

O operador possui a vantagem de ser bastante rápido e de efetivamente reduzir os ruídos de alta frequência. Cuidado deve ser tido, no entanto, quando de sua aplicação com altos valores de λ ou em uma quantidade muito elevada de iterações, o que pode resultar em suavização exagerada (*oversmoothing*), ou remoção de detalhes da malha. A Figura 3.11 demonstra esse efeito. Por esses motivos, a solução empregada no presente trabalho é a descrita em em (OHTAKE; BELYAEV; BOGAEVSKI, 2000), vista a seguir.

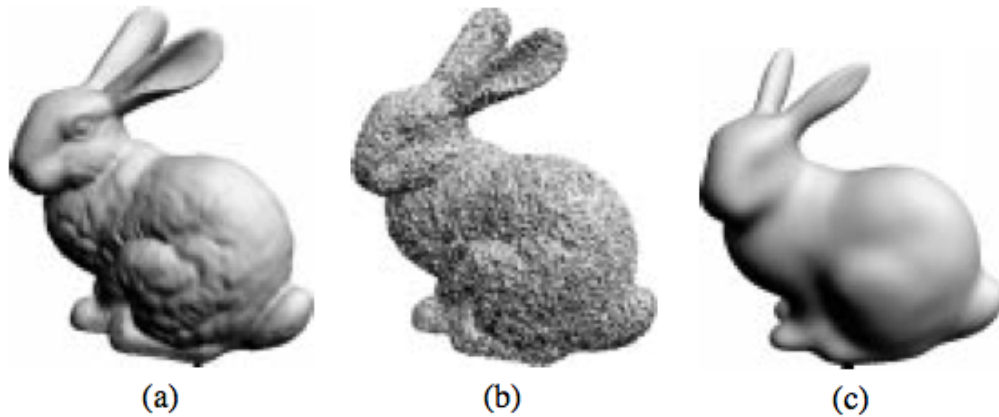


Figura 3.11: *Oversmoothing* causado por repetidas aplicações do operador guarda-chuva. (a) Stanford Bunny; (b) coelho com ruído uniforme adicionado; (c) Oversmoothing. Detalhes de frequências mais baixas começam a se perder. (OHTAKE; BELYAEV; BOGAEVSKI, 2000)

Esquema de Relaxamento Ohtake

A ideia central do algoritmo utilizado consiste em se empregar a curvatura média em cada vértice para a realização do relaxamento da superfície poligonal, ao mesmo tempo em que

se move cada vértice ao longo da tangente da superfície para se obter maior regularidade na sua distribuição.

A utilização da curvatura média em detrimento do centróide é defendida por Desbrun et al. (DESBRUN et al., 1999) como a alternativa que oferece melhores resultados no quesito relaxamento em comparação com o operador guarda-chuva. O operador modificado pode ser calculado como $P_{nova} = P_{anterior}(v) + \lambda H(v)n(v)$, onde $H(v)$ é uma versão discreta da curvatura média e $n(v)$ é a normal unitária, ambas calculadas sobre v em $P_{anterior}$.

Os autores ressaltam ainda que o produto $Hn(v)$ pode ser aproximado por $\frac{1}{4A} \sum_i (\cot \alpha_i + \cot \beta_i)(P_{anterior}(q_i) - P_{anterior}(v))$, onde $A = \sum A_i$ é a soma das áreas dos triângulos na vizinhança imediata de v e α e β são os dois ângulos opostos à aresta que liga q_i a v , ilustrados na Figura 3.12.

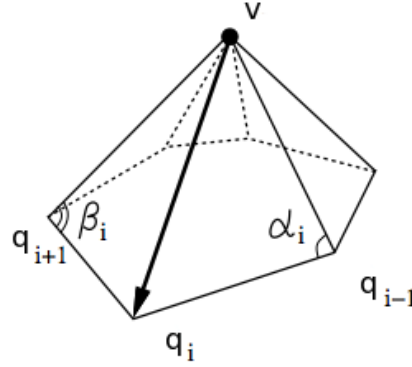


Figura 3.12: α_i e β_i no cálculo da curvatura média. (OHTAKE; BELYAEV; BOGAEVSKI, 2000)

Ohtake e Belyaev (OHTAKE; BELYAEV; BOGAEVSKI, 2000), enquanto reconhecem o bom relaxamento promovido pela técnica, ressaltam que o mesmo favorece uma fraca distribuição dos vértices, incorporando o operador de curvatura média $Hn(v)$ em sua solução final.

A solução trata o deslocamento do vértice como uma combinação de uma velocidade normal, associada com o relaxamento geométrico, com uma velocidade tangencial, que busca regularizar a distribuição dos vértices. Com base nessa afirmação, os autores definem a função de relaxamento $P_{nova} = P_{anterior}(v) + \lambda F(v)$. A função $F(v)$, definida pelo Algoritmo 3.5, pode ser entendida como aquela que busca mover v na direção do centróide com uma velocidade normal igual à curvatura média. Uma descrição geométrica sucinta de $F(v)$ pode ser vista na Figura 3.13.

Por fim, os autores sugerem ainda o decaimento da velocidade de deslocamento de cada vértice v para evitar *oversmoothing*, substituindo o uso de $F(v)$ por $\tilde{F}(v)$, como

Função $F(v)$:

$$m \leftarrow \frac{U(v)}{\|U(v)\|}$$

Seja ϵ um pequeno parâmetro positivo e θ o ângulo entre o vetor de curvatura médio Hn e m

$$\cos\theta \leftarrow m \cdot Hn / |H|$$

Se $\cos\theta > \epsilon$ então

$$\text{retorna } \frac{|H|m}{\cos\theta}$$

Se $\cos\theta < -\epsilon$ então

$$\text{retorna } 2Hm - \frac{|H|m}{\cos\theta}$$

retorna 0

Algoritmo 3.5: Função de relaxamento $F(v)$.

definido no Algoritmo 3.6:

Função $\tilde{F}(v)$:

Se $\|F(v)\| > T(v)$ então

$$\text{retorna } (\|F(v)\| - T(v)) \frac{F(v)}{\|F(v)\|}$$

retorna 0

Algoritmo 3.6: Função de relaxamento $\tilde{F}(v)$.

Os autores ressaltam que a função $T(v)$ pode tanto ser definida diretamente e igual para todos os vértices ($T(v) = T$) como calculada como a média aritmética das curvaturas médias computadas nos dois primeiros anéis que circundam v . No presente trabalho, foi utilizada a segunda abordagem.

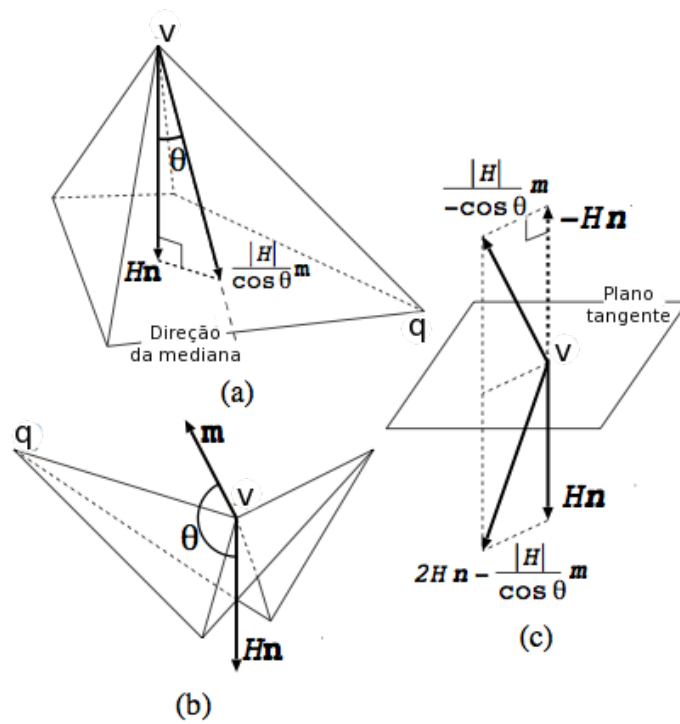


Figura 3.13: Descrição geométrica de $F(v)$. O caso onde a mediana m e o vetor normal estão do mesmo lado do plano tangente: v é movido na direção da mediana com componente normal da velocidade igual a curvatura média. (b) Caso em que a mediana e o vetor normal estão em lados opostos do plano tangente. (c) Cálculo do deslocamento do vértice em (b).

(OHTAKE; BELYAEV; BOGAEVSKI, 2000)

4 *Resultados*

4.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos testes de cada uma das etapas do método proposto. Os testes englobam todas as etapas do algoritmo (seleção, avaliação, subdivisão e relaxamento). Quando aplicável, também serão tabulados dados relativos a alterações na quantidade e na qualidade dos triângulos da malha, o que auxiliará na comparação com técnicas utilizadas como referência e dará subsídios para que trabalhos futuros comparem seus próprios resultados com aqueles apresentados na presente dissertação. Além disso, serão apresentados exemplos práticos de inserção de detalhes em modelos fracamente refinados por meio do uso da técnica proposta. Na Seção 4.2, são descritos os modelos utilizados nos testes apresentados na Seção 4.3.

4.2 Modelos

A escolha dos três modelos utilizados nos testes contidos no presente capítulo se deu em função de algumas características desejáveis para cada teste. Todos os modelos são apresentados em baixo nível de resolução, mas podem ter suas faces subdivididas uma ou mais vezes segundo o esquema de subdivisão Rgb, com ou sem a utilização do operador de relaxamento Laplaciano.

O modelo ilustrado na Figura 4.1 e na Tabela 4.1, por exemplo, foi utilizado nos testes de *sculpting*, onde era necessária a existência de superfícies planas para melhor avaliar o impacto da ferramenta no objeto. Por sua vez, o modelo representado na Figura 4.2 e na Tabela 4.2 é utilizado em testes de subdivisão de faces, tanto global quanto localmente, em função de sua regularidade e simplicidade, já que todos os vértices possuem a mesma valência.

Por fim, a Figura 4.3 e a Tabela 4.3 retratam aquele que potencialmente é o modelo

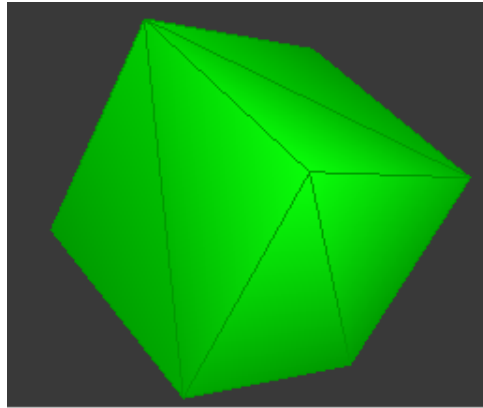


Figura 4.1: O cubo utilizado em testes de *sculpting*.

Métrica	Nível 0
Vértices	8
Valência = 4	4
Valência = 5	4
Outras Valências	0
Arestas	18
Faces	12

Tabela 4.1: O cubo.

mais representativo do uso da técnica proposta. Sua irregularidade, com regiões de alta e baixa densidade de vértices e a presença de *poles* o torna altamente interessante para a validação de uma técnica capaz de inserir detalhes em malhas de qualquer densidade, a despeito da regularidade da distribuição dos seus elementos ou da variação da curvatura de sua superfície.

A malha também é representativa do principal uso de aplicativos de modelagem por *sculpting*: a representação de modelos orgânicos, especialmente a figura humana. Seu principal uso será em testes de inserção de detalhes (chifres), nos quais a qualidade geométrica dos elementos, e não somente a topológica, será monitorada. Triângulos excessivamente achatados ou alongados destroem a suavidade da topologia na sua região e devem ser evitados (HERNANDEZ, 2011). Embora várias métricas de avaliação sejam possíveis, para a avaliação da qualidade dos triângulos da malha optou-se pelo uso local da métrica proposta por (BHATIA; LAWRENCE, 1990):

$$p = \frac{4A\sqrt{3}}{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2}, \quad (1)$$

onde A representa a área do triângulo e l_i o comprimento da aresta de índice i da face. A

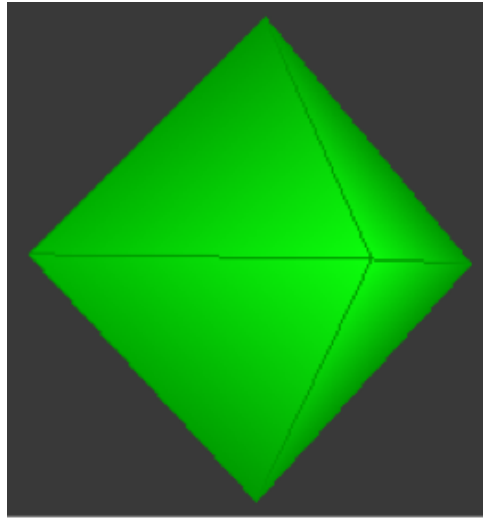


Figura 4.2: O octaedro.

Métrica	Nível 0
Vértices	6
Valência 4	6
Outras Valências	0
Arestas	12
Faces	8

Tabela 4.2: O octaedro.

métrica possui a vantagem de ser normalizada para o intervalo contínuo $[0, 1]$ e de poder ser tornada global por meio de sua média, p_m , de todos os p dos triângulos da malha. Valores de p e p_m acima de 0,6 são considerados aceitáveis.

Métrica	Valor	Métrica	Valor
Vértices	702	Faces	1400
Baixa Valência (<6)	178 (25,4%)	Boa Qualidade ($p_m \geq 0,6$)	1108 (79,1%)
Valência 6	373 (53,1%)	Má Qualidade ($p_m < 0,6$)	292 (20,9%)
Alta Valência (7 ou 8)	146 (20,8%)	p_m	0,75
<i>Poles</i> (Valência ≥ 9)	5 (0,7%)	Arestas	2100

Tabela 4.3: A cabeça. Presença de *poles* e de boa quantidade de vértices de alta valência.

4.3 Descrição dos Testes

Nesta seção serão apresentados os resultados dos testes realizados sobre os modelos apresentados na seção anterior. Os testes retratam as diversas etapas do processo de *sculpting*, tanto do ponto de vista do usuário quanto do ponto de vista algorítmico, e consistem em:

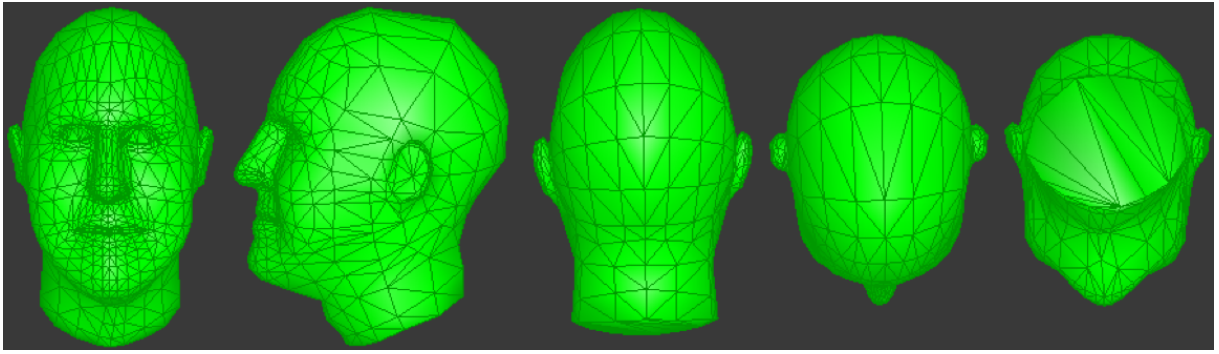


Figura 4.3: Cabeça humana utilizada em testes de inserção de detalhes. Da esquerda para a direita: vista frontal, lateral esquerda, traseira, superior e inferior. Observa-se uma alta irregularidade na distribuição dos vértices e péssimo aspecto de muitos triângulos da malha.

seleção de uma região da malha, subdivisão de faces, e *sculpting*. Embora alguns testes pareçam estar mais associados a alguma das etapas do algoritmo proposto (seleção e avaliação, subdivisão, *sculpting* e relaxamento), os testes foram planejados para ilustrar o funcionamento do algoritmo como um todo e não, necessariamente, para retratar os resultados de apenas uma etapa em específico.

4.3.1 Seleção de uma Região da Malha

Estabelecer uma região de interesse, restringindo a região da malha a ser afetada pelas ferramentas aplicadas pelo usuário, é fundamental para qualquer sistema de *sculpting*. O usuário precisa ver e ser capaz de indicar facilmente a região que pretende modificar, sem se preocupar com detalhes como a existência de vértices ou sua densidade. A falha em identificar corretamente a região de interesse do usuário pode ocasionar em regiões excessivamente refinadas, em função da aplicação desnecessária do operador de subdivisão, em uma quantidade insuficiente de elementos para representar satisfatoriamente a forma desejada, ou em alterações não pretendidas, o que pode resultar em frustração para o usuário. A Figura 4.4 ilustra como a técnica proposta realiza a seleção dos diversos tipos de elementos.

A seleção, no método proposto, diverge daquela empregada nos trabalhos utilizados como referência ao promover a identificação do centro do pincel na face selecionada por meio de interpolação. Técnicas clássicas, que assumem que a densidade de vértices é adequada em todo o modelo, a exemplo de (STANCULESCU; CHAINE; CANI, 2011), por vezes projetam o pincel para o vértice mais próximo encontrado, na esperança de que o desvio entre a posição do *mouse* e o centro projetado da operação de *sculpting* na tela seja

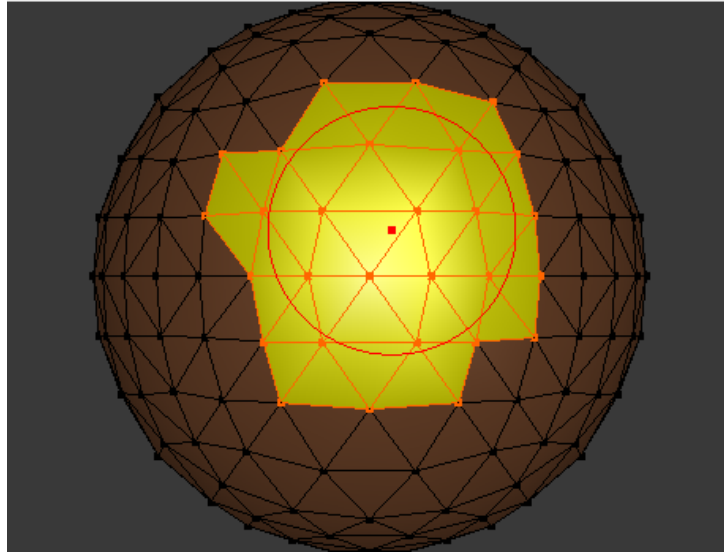


Figura 4.4: Seleção de vértices, arestas e faces. Vértices e arestas selecionados representados em laranja. Faces selecionadas ilustradas em amarelo.

imperceptível. Em função da utilização, no presente trabalho, da posição interpolada da ferramenta, o único desvio imposto ao pincel é aquele resultante da imprecisão inerente às operações aritméticas com ponto flutuante.

As Figuras 4.5 e 4.6 mostram a diferença entre a seleção na técnica proposta e a técnica proposta em (STANCULESCU; CHAINE; CANI, 2011). Ressalta-se, conforme pode ser visto na Figura 4.5, que os métodos clássicos tendem a apresentar resultados bons o suficiente em modelos de alta densidade, nos quais o tamanho de todas as arestas da malha é significativamente menor que o raio da ferramenta, bem como mecanismos que garantem a manutenção de densidade adequada de vértices na região a ser esculpida, pressupondo apenas que esta densidade esteja presente na malha inicial ou que seja estabelecida por meio de controles oferecidos ao usuário. Nesse sentido, da técnica proposta, no que tange à seleção, em muito se assemelha ao trabalho proposto por (HERNANDEZ, 2011), fazendo muito poucas suposições sobre a qualidade malha ou de seus elementos e não necessitando da interferência do usuário para realizar uma seleção mais precisa.

A etapa serve de *input* para as demais fases do algoritmo proposto, servindo como forma de determinação da região a ser afetada. Em função disso, a etapa é empregada em todos os testes subsequentes e em todos os modelos na forma observada na Figura 4.4.

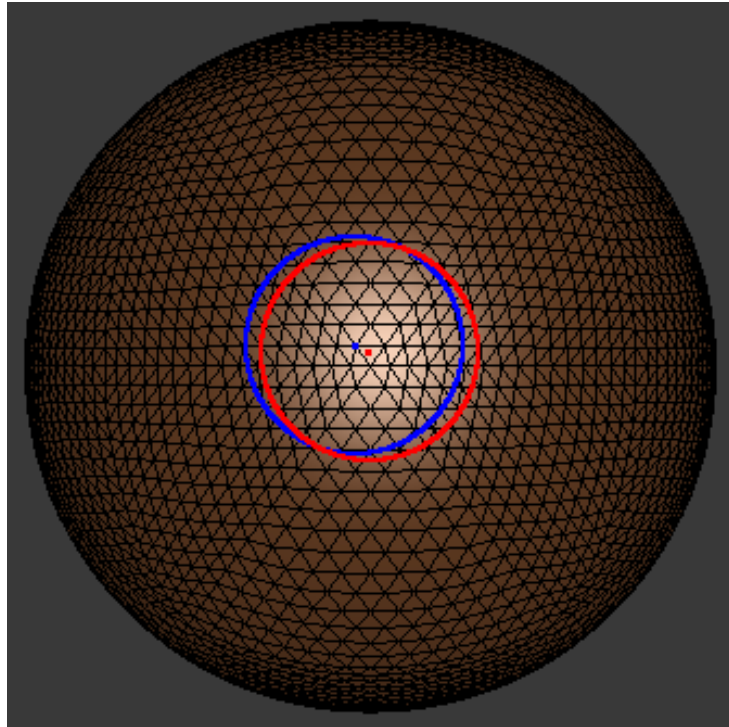


Figura 4.5: Determinação do centro do pincel em malha altamente refinada. A técnica proposta, mostrada em vermelho, e o método utilizado em (STANCULESCU; CHAINE; CANI, 2011), ilustrado em azul, apresentam resultados semelhantes. Com aumento da densidade da malha, o desvio seria progressivamente menor e mais passível de ser negligenciado.

4.3.2 Subdivisão das Faces

O método proposto, conforme explicado na Seção 3.2.2, procura compatibilizar o esquema de subdivisão vislumbrado por Loop (1987) com a necessidade de refinamento local. Se aplicado de forma global, conforme ilustrado na Figura 4.7 e tabulado na Tabela 4.4, ambos os métodos, Loop e Rgb, são indistinguíveis, gerando apenas vértices de valência 6 na medida em que cada triângulo é substituído por outros 4.

Métrica	Nível 0	Nível 1	Nível 3	Nível 5
Vértices	6	18	258	4098
Valência 4	6	6	6	6
Valência 6	0	12	252	4092
Outras Valências	0	0	0	0
Arestas	12	48	768	12288
Faces	8	32	512	8192

Tabela 4.4: A esfera nos diversos níveis de subdivisão ilustrados na Figura 4.7. A alta frequência de vértices de valência 6 nos níveis superiores atesta para a eficiência do esquema de subdivisão Rgb em replicar o método proposto por (LOOP, 1987).

Por outro lado, a utilização local da operação passa por uma etapa de avaliação para

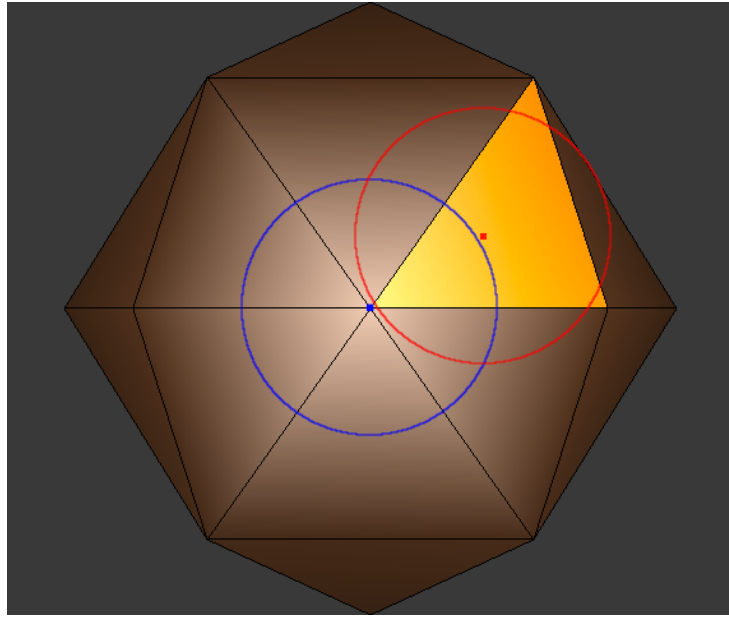


Figura 4.6: Determinação do centro do pincel em malha fracamente refinada. A técnica proposta, mostrada em vermelho, e o método utilizado em (STANCULESCU; CHAINE; CANI, 2011), ilustrado em azul, apresentam resultados altamente divergentes. A face em amarelo corresponde à face que contém o pincel.

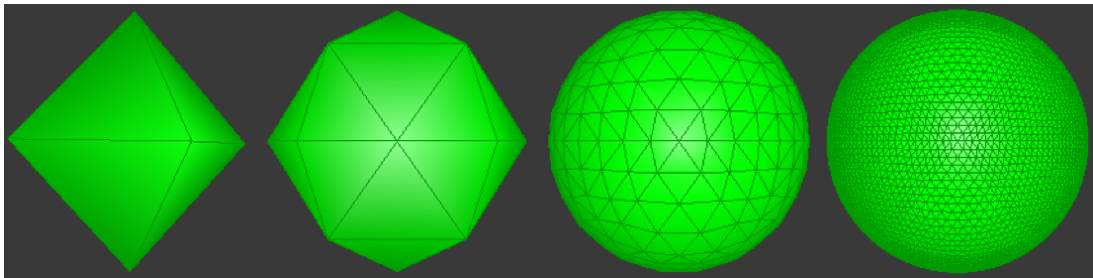


Figura 4.7: A esfera gerada por meio de subdivisão Rgb uniforme a partir do modelo do octaedro. Da esquerda para a direita: octaedro original (nível de subdivisão 0), modelos nos níveis de subdivisão 1, 3 e 5, respectivamente.

identificação das faces, dentro do conjunto de faces selecionadas, que necessitam sofrer subdivisão para que exista densidade adequada de vértices para modelagem do detalhe pretendido. Os novos vértices adicionados, por meio da função de decaimento, irão se deslocar em velocidades intermediárias em relação aos vértices dos triângulos originais, permitindo não só a correta representação do detalhe desejado, como também reduzindo a velocidade de deformação dos mesmos, gerando resultados melhores.

A Figura 4.8 mostra que a técnica proposta é capaz de tornar altamente refinada uma região de interesse, mantendo uma boa porcentagem de triângulos e arestas verdes, considerados preferíveis por (PUPPO; PANOZZO, 2009). Arestas vermelhas devem ser evitadas, quando possível, por se tratarem de arestas de limpeza, ou seja, não previstas

originalmente no esquema de subdivisão de Loop. Tais arestas são as únicas capazes de aumentar a valência de um vértice para um valor acima de 6, considerado ideal em malhas triangulares, e são eliminadas sempre que possível por meio de operações de rotação BB. Triângulos vermelhos e azuis são desinteressantes na medida em que possuem arestas vermelhas e em níveis de subdivisão distintos, mas toleráveis se possuírem boa geometria. Detalhes a respeito da Figura 4.8 podem ser vistos nas Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7.

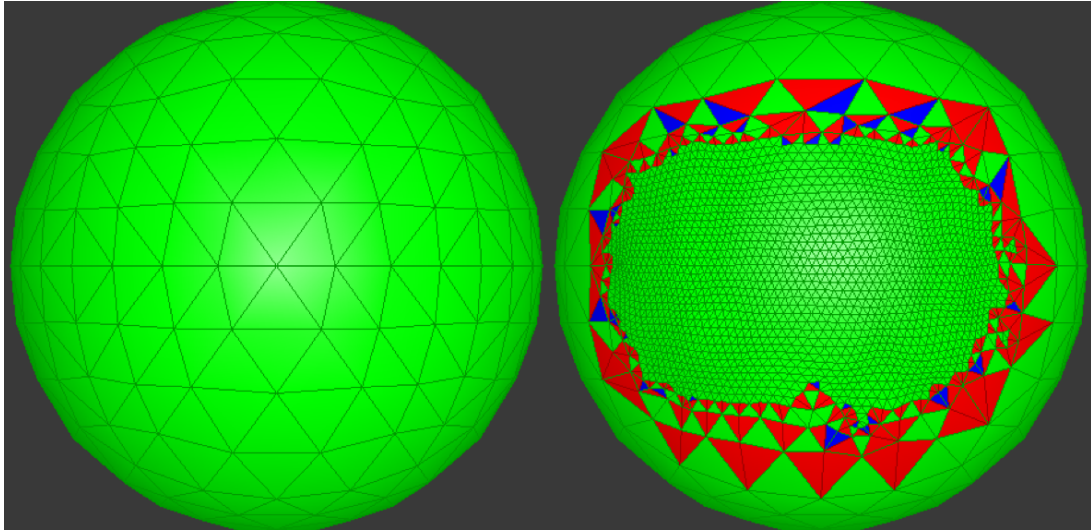


Figura 4.8: Resultado da etapa de subdivisão. Pincel com força zero é aplicado na esfera representada à esquerda. Esquerda (Antes): Todas as faces e arestas são verdes e no nível de subdivisão zero. Direita (Depois): Faces vermelhas e azuis fazem a transição entre a região subdividida ao centro e a região não afetada em volta.

Métrica	Antes	Depois
Vértices	258	2021
Baixa Valência (6 ou menos)	258 (100.00%)	1942 (96.09%)
Alta Valência (7 ou mais)	0 (0.00%)	79 (3.91%)
Valência 6	252 (97.67%)	1835 (90.80%)
Pole Vertices (Valência 9 ou mais)	0 (0.00%)	3 (0.15%)

Tabela 4.5: Efeito da etapa de subdivisão ilustrada na Figura 4.8 nos vértices.

Os resultados mostram que a etapa de subdivisão é capaz de manter não somente um alto percentual de arestas verdes (97,37%), como também uma alta taxa de vértices de valência considerada aceitável. Apenas 0,15% dos vértices seriam considerados *pole* na avaliação de (HERNANDEZ, 2011), enquanto que 90% dos vértices apresentam uma valência considerada ideal (valência 6) e 96% mantém uma valência considerada boa (6 ou menos). Observa-se ainda que um percentual grande de triângulos e arestas perma-

Métrica	Antes	Depois
Arestas	768	6057
Arestas Verdes	768 (100%)	5898 (97.37%)
Arestas Vermelhas	0 (0%)	159 (2.63%)
Arestas Originais	768 (100%)	644 (83.85%)

Tabela 4.6: Efeito da etapa de subdivisão ilustrada na Figura 4.8 nas arestas.

Métrica	Antes	Depois
Faces	512	4038
Faces Verdes	512 (100%)	3720 (92.12%)
Faces Vermelhas	0 (0%)	275 (6.81%)
Faces Azuis	0 (0%)	43 (1.06%)
Faces Originais	512 (100%)	417 (81.45%)

Tabela 4.7: Efeito da etapa de subdivisão ilustrada na Figura 4.8 nas faces.

neceram inalterados em sua topologia (respectivamente 81,45% e 83,85%), a despeito do pequeno tamanho das arestas dentro da região de interesse (16 vezes menores, em média), ilustrando a grande capacidade de localização da técnica.

Embora assemelhe-se em seu funcionamento à etapa de subdivisão proposta por Hernandez (2011), a técnica proposta possui a vantagem de ser capaz de reduzir a valência dos vértices por meio da remoção de arestas vermelhas. Esta propriedade ajuda a impedir não só a propagação de *poles*, como também a assegurar que a topologia na região de interesse mantenha-se adequada para a etapa de modelagem.

Dado que o algoritmo de *sculpting* se utiliza implicitamente da etapa de subdivisão, o emprego desta nos modelos da cabeça e do cubo será retratado na subseção seguinte.

4.3.3 *Sculpting*

Sculpting representa a etapa fundamental do algoritmo proposto, sendo a responsável pelos deslocamentos mais significativos na posição dos vértices e, por consequência, na definição da geometria da malha. A etapa de *sculpting*, conforme explicado na Subseção 3.2.3, utiliza as informações de distância geodésica levantadas nas etapas de seleção e avaliação e a força da ferramenta, determinada pelo usuário, para estabelecer a nova

posição de cada vértice na malha com base em uma função, sendo a mais popular destas a que desloca os vértices linearmente ao longo de um vetor, como a normal de seleção ou de cada vértice, por uma distância inversamente proporcional à distância geodésica de cada vértice. As Figuras 4.9 e 4.10 ilustram o efeito da força sobre a ação de puxar uma região da malha do cubo descrito na Seção 4.2, sob diversos valores de f_{pincel} , ao longo do vetor normal de seleção n_{pincel} .

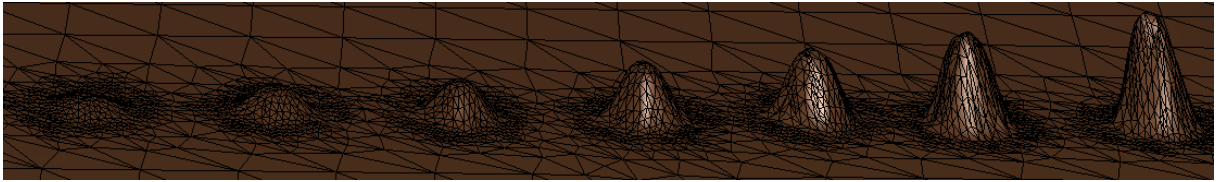


Figura 4.9: Efeito da ação de puxar sob diversos valores de f_{pincel} . Da esquerda para a direita: $f_{pincel} = 1,0, 2,0, 3,0, 5,0, 6,0, 8,0$ e $10,0$. Em todos os casos, $r_{pincel} = 5,0$.

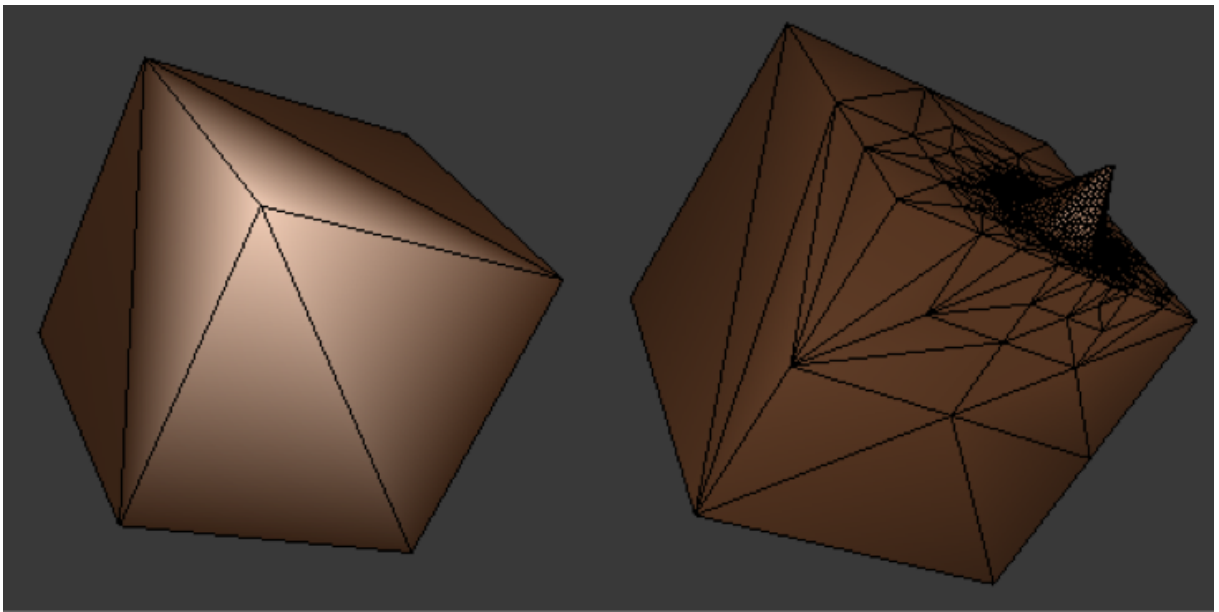


Figura 4.10: Adição de detalhes no cubo da Figura 4.1. Esquerda: malha original. Direita: malha após adição de detalhe.

Determinar a região e o grau de influência de uma ferramenta sobre cada parte de um modelo, no entanto, pode ser algo bastante complicado, especialmente quando as estruturas a serem manipuladas diretamente, como os vértices, não estão disponíveis em quantidade satisfatória dentro da região de influência. Os resultados dos processos que garantem a existência dessa quantidade mínima vértices são melhor discutidos na Subseção 4.3.2, mas os resultados finais da estratégia empregada para avaliação das distâncias geodésicas dos vértices, além da garantia de que existam em densidade satisfatória dentro do raio de ação do pincel, podem ser vistos na Figura 4.11.

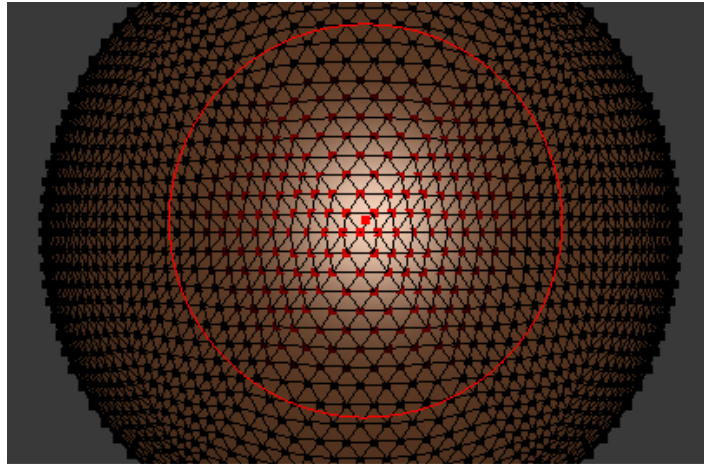


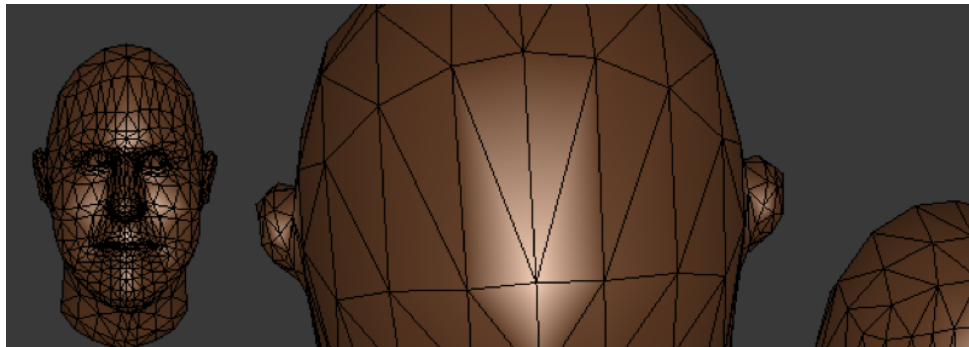
Figura 4.11: Determinação da distância geodésica dos vértices dentro da região de interesse. A cor dos vértices varia de vermelho, para aqueles cuja distância geodésica é zero, até preto, indicativo de distância geodésica superior ao raio do pincel.

A utilização da distância geodésica em detrimento da distância euclidiana é defendida por (EYIYUREKLI; BREEN, 2010) em função de garantir que apenas as porções selecionadas do modelo sejam modificadas. O argumento dos autores, que também se utilizam da distância geodésica em seu sistema baseado em *voxels*, gira em torno da possibilidade, quando se considera apenas a distância euclidiana, de regiões topologicamente muito distantes, que muito pouco tem a ver com o centro da região selecionada, serem afetadas em função da geometria de seus vértices, conforme observado em diversos trabalhos, como (STANCULESCU; CHAINE; CANI, 2011), (GAIN; MARAIS, 2005) e (HERNANDEZ, 2011).

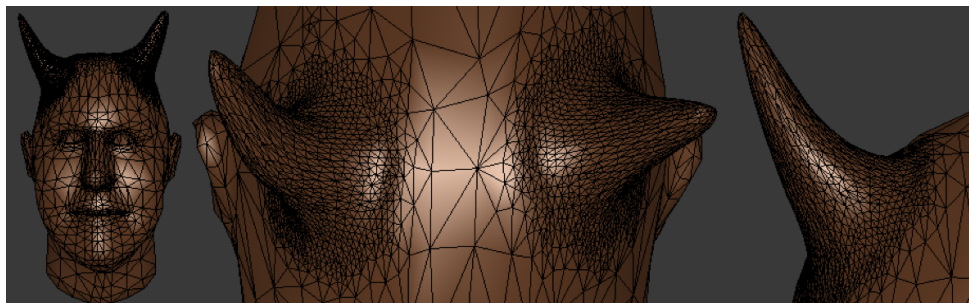
Conforme se pode observar nos dados das Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10, que representam os vértices, arestas e faces da Figura 4.12, a técnica é capaz de manter uma boa qualidade dos triângulos, além de uma transição suave, com baixa frequência de vértices de valência extrema (9 ou mais). Ressalta-se que 95,1% das faces e 96,0% das arestas da malha original não sofreram subdivisão, atestando para a alta localidade da técnica.

Tabela 4.8: Vértices da Figura 4.12.

Métrica	Valor
Quantidade	3012
Valência baixa (< 6)	914 (30,3%)
Valência 6	1273 (42,3%)
Valência alta (7 ou 8)	754 (25,0%)
<i>poles</i> (Valência ≥ 9)	71 (2,4%)



(a) Modelo original.



(b) Modelo da cabeça após a inserção de chifres.

Figura 4.12: Três vistas de modelo utilizado para a inserção de detalhes.

Tabela 4.9: Arestas da Figura 4.12.

Métrica	Valor
Quantidade	9030
Verdes	7901 (87,5%)
Vermelhas	1129 (12,5%)

Tabela 4.10: Faces da Figura 4.12.

Métrica	Valor
Quantidade	6020
Verdes	3762 (62,5%)
Vermelhas	1845 (30,6%)
Azuis	413 (6,9%)
Qualidade	
Boa Qualidade ($p \geq 0,6$)	4314 (71,7%)
Má Qualidade ($p < 0,6$)	1706 (28,3%)
p_m (Todas as Faces)	0,71
p_m (Novas Faces)	0,70

5 *Conclusões*

Um sistema de modelagem ideal deve ser capaz de representar qualquer mudança ou característica desejada pelo usuário da forma mais rápida e transparente possível, abstraindo toda a complexidade topológica e matemática, permitindo ao modelador concentrar-se exclusivamente no ato de criar, em oposição a ter de especificar a posição de cada elemento de forma manual. Tal sistema, se por um lado pode oferecer menor controle na determinação da posição de cada vértice, além de poder ser mais caro computacionalmente em algumas situações, por outro simplifica enormemente o trabalho do artista, tornando a modelagem acessível a qualquer usuário.

A tarefa de desenvolver um sistema de modelagem plenamente flexível, aliada com a necessidade de operações interativas, torna o trabalho de vislumbrar e desenvolver tal sistema uma tarefa extremamente complexa. Até o momento, nenhuma técnica ou representação se mostrou capaz de atender com perfeição à todas as demandas dos artistas. A escolha da técnica adotada depende em muito de variáveis como tempo disponível para modelagem, tipo de operações necessárias e complexidade do modelo final. Nesse contexto, técnicas de *sculpting* vem se tornando cada vez mais populares por artistas que desejam modelar objetos orgânicos, especialmente personagens virtuais, principalmente em função da velocidade e intuitividade da técnica.

O presente trabalho abordou o problema das técnicas de *sculpting* tradicionais de adicionar detalhes em malhas triangulares, com resolução adaptativa e de forma interativa, em regiões com baixa densidade de vértices. O algoritmo proposto busca subdividir faces e arestas na região de interesse do artista de modo a garantir uma quantidade de vértices suficiente para representar o detalhe pretendido, sem necessidade de qualquer informação adicional por parte do usuário, superando alguns dos principais métodos propostos no meio acadêmico no que tange à localidade das subdivisões e a manutenção de uma malha de boa topologia e de boa qualidade geométrica, com poucos vértices de alta valência, ainda que o modelo original seja fracamente refinado, tornando possível a incorporação de novos detalhes sem necessidade de refinamento integral da malha.

O modelo proposto foi avaliado por meio de testes, que buscaram retratar as diversas etapas da técnica proposta. Os testes realizados consistiam em realizar a identificação correta da região de interesse, subdivisão da malha e adição de chifres por meio de *sculpting*. Os resultados mostram que a técnica é bem sucedida nos exemplos testados.

Uma limitação da técnica proposta foi identificada na avaliação da qualidade de seus elementos nos testes de inserção de fios de cabelo, com quantidade significativa de elementos de baixa qualidade. Acredita-se que este resultado se deve em grande parte à forma busca com que a geometria foi extraída da superfície do modelo original por meio do uso de *splines*, sem o emprego de transição suave entre a curvatura da base do fio e da região em sua vizinhança.

Uma continuação natural deste trabalho consiste em adicionar simplificação e operadores topológicos à técnica proposta, o que possui o potencial de tornar os modelos de fronteira pelo menos tão flexíveis quanto suas contrapartes volumétricas. Outra evolução interessante consiste em se utilizar ferramentas hápticas ou telas sensíveis ao toque (presentes em *smartphones* e *tablets*) como dispositivos de entrada, o que pode aproximar ainda mais a experiência de modelar digitalmente daquela de esculpir argila real, sendo possível inclusive o estudo da edição em paralelo da mesma malha. A melhoria da qualidade dos triângulos gerados e a utilização de formas mais complexas de definição do detalhe a ser inserido, como *patches* e texturas, também resultariam em grandes avanços para o método proposto. Por fim, poder-se-ia investigar a questão da utilização de paralelismo em conjunto com a técnica proposta.

Referências

- AKLEMAN, E.; CHEN, J. Insight for practical subdivision modeling with discrete Gauss-Bonnet theorem. *Geometric Modeling And Processing*, 4077, p. 287–298, 2006.
- ALCIATORE, D. G.; WOBLERS, T. T. Importing and reshaping digitized data for use in rapid prototyping: a system for sculpting polygonal mesh surfaces. *Rapid Prototyping Journal*, 2, n. 1, p. 13–23, 1996.
- BANK, R. E.; SHERMAN, A. H.; WEISER, A. Refinement algorithms and data structures for regular local mesh refinement. *Scientific Computing*, 1983.
- BARTHE, L. et al. Two-dimensional potential fields for advanced implicit modeling operators. *Computer Graphics Forum*, 22, n. 1, p. 23–33, MAR 2003.
- BHATIA, R. P.; LAWRENCE, K. L. Two-dimensional finite element mesh generation based on stripwise automatic triangulation. computers and structures. *Computers and Structures*, 1990.
- BLENDER FOUNDATION. *Blender*. ago. 2011. Disponível em: <<http://www.blender.org>>.
- BOTSCH, M.; SORKINE, O. On linear variational surface deformation methods. *IEEE Transactions On Visualization And Computer Graphics*, 14, n. 1, p. 213–230, JAN-FEB 2008.
- CHANG, Y.-H. et al. Development scheme of haptic-based system for interactive deformable simulation. *Computer-Aided Design*, 42, n. 5, SI, p. 414–424, MAY 2010.
- CHEN, H.; SUN, H.; JIN, X. Haptic-constraint modeling based on interactive metaballs. *Computer Animation And Virtual Worlds*, 21, n. 5, p. 485–497, SEP-OCT 2010.
- CHEN, H.-L. J.; SAMAVATI, F. F.; SOUSA, M. C. GPU-based point radiation for interactive volume sculpting and segmentation. *Visual Computer*, 24, n. 7-9, p. 689–698, JUL 2008.
- CHEN, Y. H.; YANG, Z. Y. Haptic modeling as an integrating tool for product development. *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 33, n. 7-8, p. 635–642, JUL 2007.
- CHIOU, J. C. J. Virtual clay: An enhanced marching cubes algorithm for in-process geometry modeling. *Journal Of Manufacturing Science And Engineering-Transactions Of The ASME*, 129, n. 3, p. 566–574, JUN 2007.
- CUGINI, U.; BORDEGONI, M. Touch and design: novel haptic interfaces for the generation of high quality surfaces for industrial design. *Visual Computer*, 23, n. 4, p. 233–246, APR 2007.

- DACHILLE, F.; QIN, H.; KAUFMAN, A. A novel haptics-based interface and sculpting system for physics-based geometric design. *Computer-Aided Design*, 33, n. 5, p. 403–420, APR 17 2001.
- DESBRUN, M. et al. Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow. *SIGGRAPH*, p. 317–324, 1999.
- DEWAELE, G.; CANI, M. Interactive global and local deformations for virtual clay. *Graphical Models*, 66, n. 6, p. 352–369, NOV 2004.
- DORMAN, J.; ROCKWOOD, A. Surface design using hand motion with smoothing. *Computer-Aided Design*, 33, n. 5, p. 389–402, APR 17 2001.
- DU, H.; QIN, H. Free-form geometric modeling by integrating parametric and implicit PDEs. *IEEE Transactions On Visualization And Computer Graphics*, 13, n. 3, p. 549–561, MAY-JUN 2007.
- DYN, N.; LEVIN, D.; GREGORY, J. A butterfly subdivision scheme for surface interpolation with tension control. *ACM Transactions On Graphics*, 9, n. 2, p. 160–169, APR 1990.
- EHMANN, S.; GREGORY, A.; LIN, M. A touch-enabled system for multi-resolution modeling and 3D painting. *Journal Of Visualization And Computer Animation*, 12, n. 3, p. 145–157, JUL 2001.
- EYIYUREKLI, M.; BREEN, D. Interactive free-form level-set surface-editing operators. *Computers & Graphics-UK*, 34, n. 5, p. 621–638, OCT 2010.
- FERLEY, E.; CANI, M.; GASCUEL, J. Practical volumetric sculpting. *Visual Computer*, 16, n. 8, p. 469–480, 2000.
- FERLEY, E.; CANI, M.; GASCUEL, J. Resolution adaptive volume sculpting. *Graphical Models*, 63, n. 6, p. 459–478, NOV 2001.
- GAIN, J. *Enhancing Spatial Deformation For Virtual Sculpting*. Tese (Doutorado) — University of Cambridge, 2000.
- GAIN, J.; BECHMANN, D. A survey of spatial deformation from a user-centered perspective. *ACM Transactions On Graphics*, v. 27, p. 107:1–107:21, November 2008. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1409625.1409629>>.
- GAIN, J.; MARAIS, P. Warp sculpting. *IEEE Transactions On Visualization And Computer Graphics*, 11, n. 2, p. 217–227, MAR-APR 2005.
- GAIN, J. E.; DODGSON, N. A. Adaptive refinement and decimation under free-form deformation. *Eurographics UK*, v. 17, p. 13–15, 1999.
- GAIN, J. E.; DODGSON, N. A. Preventing self-intersection under free-form deformation. *IEEE Transactions On Visualization And Computer Graphics*, v. 7, p. 289–298, 2001.
- GALYEAN, T.; HUGHES, J. Sculpting - an interactive volumetric modeling technique. *SIGGRAPH*, v. 25, p. 267–274, 1991.

GAO, Z.; GIBSON, I. Haptic sculpting of multi-resolution B-spline surfaces with shaped tools. *Computer-Aided Design*, 38, n. 6, p. 661–676, JUN 2006.

HERNANDEZ, R. F. *Dynamic Subdivision Sculpting*. oct 2011. Disponível em: <<http://farsthary.files.wordpress.com/2011/10/dynamic-subdivision-sculpting-final.pdf>>.

HSU, W. M.; HUGHES, J. F.; KAUFMAN, H. Direct manipulation of free-form deformations. *SIGGRAPH*, New York, NY, USA, p. 177–184, 1992.

HUA, J.; QIN, H. Haptics-based dynamic implicit solid modeling. *IEEE Transactions On Visualization And Computer Graphics*, 10, n. 5, p. 574–586, SEP-OCT 2004.

HUANG, J. et al. Efficient mesh deformation using tetrahedron control mesh. *Computer Aided Geometric Design*, 26, n. 6, p. 617–626, AUG 2009.

HUANG, X.; LI, S.; WANG, G. Displacement modeling: Hardware-accelerated interactive feature modeling on subdivision surfaces. *Visual Computer*, 23, n. 9-11, SI, p. 861–872, SEP 2007.

HUI, K. C.; LAI, Y. H. Generating subdivision surfaces from profile curves. *Computer-Aided Design*, 39, n. 9, p. 783–793, SEP 2007.

JACOBSON, A. et al. Mixed Finite Elements for Variational Surface Modeling. *Computer Graphics Forum*, 29, n. 5, p. 1565–1574, JUL 2010.

JI, Z.; LIU, L.; WANG, Y. B-Mesh: A Modeling System for Base Meshes of 3D Articulated Shapes. *Computer Graphics Forum*, 29, n. 7, p. 2169–2177, 2010.

KAHLER, K.; HABER, J.; SEIDEL, H. Dynamically refining animated triangle meshes for rendering. *Visual Computer*, 19, n. 5, p. 310–318, AUG 2003.

KIM, L.; PARK, S. A haptic sculpting technique based on volumetric representation. *Articulated Motion And Deformable Objects*, 3179, p. 14–25, 2004.

KNOPF, G.; IGWE, P. Deformable mesh for virtual shape sculpting. *Robotics And Computer-Integrated Manufacturing*, 21, n. 4-5, p. 302–311, AUG-OCT 2005.

KOBBELT, L. root 3-subdivision. *SIGGRAPH*, p. 103–112, 2000.

KRAEMER, P.; CAZIER, D.; BECHMANN, D. Extension of half-edges for the representation of multiresolution subdivision surfaces. *Visual Computer*, 25, n. 2, p. 149–163, FEB 2009.

LEE, S. Interactive multiresolution editing of arbitrary meshes. *Computer Graphics Forum*, 18, n. 3, CI, p. 73, 1999.

LEVINSKI, K.; SOURIN, A. Interactive function-based shape modeling for cyberworlds. *International Conference On Cyberworlds*, p. 54–61, 2004.

LEVINSKI, K.; SOURIN, A. Interactive function-based shape modelling. *Computers & Graphics-UK*, 31, n. 1, p. 66–76, JAN 2007.

- LEWINER, T. et al. Topological mesh operators. *Computer Aided Geometric Design*, 2010.
- LI, Z.; MEEK, D. S.; WALTON, D. J. Polynomial blending in a mesh hole-filling application. *Computer-Aided Design*, 42, n. 4, p. 340–349, APR 2010.
- LIU, X. et al. Virtual DesignWorks - designing 3D CAD models via haptic interaction. *Computer-Aided Design*, 36, n. 12, p. 1129–1140, OCT 2004.
- LOOP, C. T. *Smooth subdivision surfaces based on triangles*. Dissertação (Mestrado) — University of Utah, 1987.
- LORENSEN, W. E.; CLINE, H. E. Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm. *SIGGRAPH*, v. 21, p. 163–169, August 1987. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/37402.37422>>.
- LUEBKE, P. et al. *Level Of Detail for 3D Graphics*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2002.
- MCDONNELL, K.; CHANG, Y.; QIN, H. DigitalSculpture: a subdivision-based approach to interactive implicit surface modeling. *Graphical Models*, 67, n. 4, p. 347–369, JUL 2005.
- MCDONNELL, K.; QIN, H. Dynamic sculpting and animation of free-form subdivision solids. *Visual Computer*, 18, n. 2, p. 81–96, APR 2002.
- NASRI, A.; SABIN, M.; YASSEEN, Z. Filling N-Sided Regions by Quad Meshes for Subdivision Surfaces. *Computer Graphics Forum*, 28, n. 6, p. 1644–1658, 2009.
- NOVOTNI, M.; KLEIN, R.; LI, I. F. I. Computing geodesic distances on triangular meshes. *WSCG*, p. 341–347, 2002.
- NVIDIA. *CUDA*. dez. 2011. Disponível em: <<http://developer.nvidia.com/what-cuda>>.
- OHTAKE, Y.; BELYAEV, A. G.; BOGAEVSKI, I. A. Polyhedral surface smoothing with simultaneous mesh regularization. *Geometric Modeling and Processing*, p. 229–, 2000. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=795680.797445>>.
- PAKDEL, H.; SAMAVATI, F. F. Incremental subdivision for triangle meshes. *International Journal on Computer Science and Engineering*, v. 3, n. 1, p. 80–92, jul. 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1504/IJCSE.2007.014467>>.
- PARK, C.-H.; YOO, S.-M.; PAN, W. D. LSM: A layer subdivision method for deformable object matching. *Information Sciences*, 180, n. 19, p. 3718–3727, OCT 1 2010.
- PILGWAY. *3D Coat*. ago. 2011. Disponível em: <<http://www.3d-coat.com>>.
- PIXOLOGIC. *Sculptris*. ago. 2011. Disponível em: <<http://www.sculptris.com>>.
- PIXOLOGIC. *ZBrush*. ago. 2011. Disponível em: <<http://www.pixologic.com>>.
- PUPPO, E.; PANOZZO, D. Rgb subdivision. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, v. 15, n. 2, p. 295–310, mar. 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/TVCG.2008.87>>.

- SEDERBERG, T. W.; PARRY, S. R. Free-form deformation of solid geometric models. *SIGGRAPH*, v. 20, p. 151–160, AUG 1986. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/15886.15903>>.
- SEEGER, S. et al. A sub-atomic subdivision approach. *Vision, Modeling and Visualization*, p. 77–85, 2001.
- SHEWCHUK, J. R. What is a good linear finite element? - interpolation, conditioning, anisotropy, and quality measures. *11th International Meshing Roundtable*, 2002.
- SILVA, F.; GOMES, A. Interactive editing of multiresolution meshes. *17th Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing*, p. 202–209, 2004.
- SORKINE, O. Differential representations for mesh processing. *Computer Graphics Forum*, 25, n. 4, p. 789–807, 2006.
- STANCULESCU, L.; CHAINE, R.; CANI, M.-P. Freestyle: Sculpting meshes with self-adaptive topology. *Computers & Graphics-UK*, 35, n. 3, SI, p. 614–622, JUN 2011.
- TAN, Y.; HUA, J.; QIN, H. Physically based modeling and simulation with dynamic spherical volumetric simplex splines. *Computer-Aided Design*, 42, n. 2, SI, p. 95–108, FEB 2010.
- TAUBIN, G. A signal processing approach to fair surface design. In: *Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. [s.n.], 1995. p. 351–358. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/218380.218473>>.
- TURKIYYAH, G. M. et al. Mesh cutting during real-time physical simulation. *Computer-Aided Design*, 43, n. 7, SI, p. 809–819, JUL 2011.
- VASSILEV, T. Interactive sculpting with deformable nonuniform B-splines. *Computer Graphics Forum*, 16, n. 4, p. 191–199, OCT 1997.
- VELHO, L. Quasi 4-8 subdivision. *Computer Aided Geometric Design*, 18, n. 4, p. 345–357, MAY 2001.
- VELHO, L. Stellar subdivision grammars. *Eurographics*, p. 188–199, 2003. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=882370.882396>>.
- VELHO, L.; MEDEIROS, E.; LOPES, H. *C++ topological operators for mesh manipulation*. ago. 2011. Disponível em: <<http://w3.impa.br/?esdras/tops>>.
- VELHO, L.; ZORIN, D. 4-8 subdivision. *Computer Aided Geometric Design*, 18, n. 5, p. 397–427, JUN 2001.
- ZHANG, W.; LEU, M. C. A spatial warping method for freeform modeling based on a level-set method. *Computer-Aided Design*, 41, n. 11, p. 765–771, NOV 2009.
- ZHONG, Y.; MA, W.; SHIRINZADEH, B. A methodology for solid modelling in a virtual reality environment. *Robotics And Computer-Integrated Manufacturing*, 21, n. 6, p. 528–549, DEC 2005.

ZORIN, D.; SCHRÖDER, P.; SWELDENS, W. Interactive multiresolution mesh editing. *SIGGRAPH*, p. 259–268, 1997. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1145/258734.258863>>.

ZORIN, D. et al. Subdivision for modeling and animation. *SIGGRAPH Course Notes*, 2000.