

Comparação entre os algoritmos de simplificação *NSA* e *QSlim* usando a ferramenta *PolyMeCo*

Samuel Silva

IEETA — Universidade de Aveiro

sss@ua.pt

Frutuoso Silva

DI / IT — Universidade da Beira Interior

fsilva@di.ubi.pt

Joaquim Madeira

DETI / IEETA — Universidade de Aveiro

jmadeira@ua.pt

Beatriz Sousa Santos

DETI / IEETA — Universidade de Aveiro

bss@ua.pt

Resumo

Apresentam-se os resultados da comparação de algumas características de malhas triangulares geradas por dois algoritmos de simplificação: NSA e QSlim. Foram usados sete modelos originais e, para cada um, criados três modelos com diferentes níveis de simplificação. A análise e comparação das características das malhas triangulares foi realizada com o auxílio da ferramenta PolyMeCo.

As malhas geradas pelo algoritmo QSlim apresentam menor erro geométrico médio do que as malhas obtidas pelo algoritmo NSA, relativamente aos modelos originais de referência. No entanto, para alguns dos modelos considerados, a qualidade das malhas geradas pelo algoritmo NSA é superior. Assim, para alguns tipos de modelos, quando a qualidade das malhas triangulares for importante, o algoritmo NSA é uma alternativa ao QSlim.

Palavras-Chave

Malhas triangulares, Simplificação, Qualidade, Visualização.

1. INTRODUÇÃO

A representação de modelos usando malhas triangulares é comum em várias áreas de aplicação: por exemplo, CAD/CAM, simulação [Losasso 06], herança cultural [Levoy 00] e jogos de computador. Algumas vezes, no entanto, as malhas definindo a superfície dos modelos originais (p.ex., geradas a partir de nuvens de pontos obtidas usando “scanners” 3D) são demasiado complexas e não permitem a sua visualização e manipulação interactivas. Nesses casos, para obter modelos definidos por um menor número de triângulos, são aplicados algoritmos de simplificação.

Embora tenham sido propostos vários métodos de simplificação de malhas poligonais (ver [Luebke 01]), há poucos trabalhos comparando alguns desses algoritmos entre si e estabelecendo regras que auxiliem o utilizador na escolha do algoritmo mais adequado para uma determinada situação (p.ex., [Cignoni 98a] e [Rogowitz 01]). A comparação das características de malhas poligonais é suportada por algumas ferramentas ([Cignoni 98b] ou [Silva 07a]) e efectuada usando vários números de mérito, tais como o erro geométrico ou o desvio de normais.

É particularmente importante que as características de malhas geradas por qualquer novo método de simplificação sejam comparadas relativamente aos resultados de, pelo

menos, um algoritmo considerado representativo. Esta avaliação sistemática será consideravelmente facilitada se for suportada por uma ferramenta que ofereça todas as funcionalidades necessárias: desde o cálculo de números de mérito, até à utilização intuitiva e coordenada de diferentes representações e métodos de visualização. Com uma tal ferramenta, a comparação das características das várias versões simplificadas de um mesmo modelo original pode ser facilmente realizada quer por investigadores desenvolvendo novos algoritmos, quer por utilizadores aplicando métodos de simplificação e desejando avaliar os seus resultados.

Neste artigo apresentam-se, na sequência de uma publicação anterior [Silva 07b] mas, agora, usando um maior número de modelos e de números de mérito, resultados adicionais de comparação das características de malhas triangulares geradas por dois algoritmos de simplificação: *NSA* [Silva 04], desenvolvido por um dos autores, e *QSlim* [Garland 97], considerado habitualmente um algoritmo de referência. Foram usados sete modelos originais (ver Fig. 1) e, para cada um, gerados três modelos com diferentes níveis de simplificação usando cada algoritmo. A análise e comparação das características das malhas triangulares foi suportada de modo eficiente pela ferramenta *PolyMeCo*¹ [Silva 05a, Silva 05b, Silva 07a].

¹Pode ser obtida em www.ieeta.pt/polymeco



Figura 1. Modelos originais. Da esquerda para a direita: CASTING, COW, FANDISK, FLASCHE, GENUS3, HEAD e RABBIT.

Pretendeu-se, como objectivo principal de todo o trabalho realizado, avaliar se o algoritmo *NSA* produz malhas triangulares com melhor qualidade do que as geradas pelo algoritmo *QSlim*, explorando simultaneamente as (novas) funcionalidades apresentadas pelo *PolyMeCo* e ilustrando uma aplicação típica para este tipo de ferramenta.

Nas secções seguintes apresenta-se uma breve descrição dos dois algoritmos de simplificação considerados, das ferramentas para comparação de malhas poligonais descritas na literatura, e das funcionalidades do *PolyMeCo*. De seguida são apresentados os conjuntos de modelos de teste e analisados os valores médios obtidos, para os vários números de mérito usados para analisar e comparar as características das malhas poligonais. Finalmente, são apresentadas algumas conclusões.

2. ALGORITMOS DE SIMPLIFICAÇÃO: *QSlim* E *NSA*

Existem vários tipos de algoritmos para a simplificação de malhas poligonais [Cignoni 98a, Puppo 97, Luebke 01]. Neste trabalho foram usados os algoritmos *QSlim* [Garland 97], versão 2.1 (Julho de 2004), e *NSA* [Silva 04], versão 1.2, para gerar modelos simplificados a partir de malhas triangulares descrevendo a superfície dos modelos originais. O algoritmo *NSA* encontra-se disponível para testes em <http://www.di.ubi.pt/~fsilva/nsa/>. Já o código do algoritmo *QSlim* pode ser obtido em <http://www.cs.cmu.edu/~garland>, no âmbito da licença *GNU GPL*, o que permitiu aplicar os dois algoritmos aos mesmos modelos. Ambos os algoritmos simplificam uma malha efectuando sucessivas operações de “*edge collapse*”, i.e., colapsando sucessivamente uma dada aresta num vértice.

Esta operação de “*edge collapse*” é habitual em vários algoritmos de simplificação. As diferenças fundamentais entre os algoritmos que usam esta estratégia iterativa são os critérios usados para seleccionar: (1) a próxima aresta a ser processada, e (2) o ponto sobre o qual a aresta colapsa. Critérios diferentes implicam características distintas para as malhas simplificadas, bem como diferentes tempos de processamento: em geral, os vários algoritmos de simplificação procuram um ponto de equilíbrio entre a qualidade da malha poligonal final e o esforço computacional necessário.

Para a selecção da próxima aresta a ser processada, o algoritmo *QSlim* segue um critério geométrico de minimização do erro associado a cada novo vértice. Esse valor de erro é

calculado como a soma dos quadrados das distâncias para cada um dos planos definidos pelas faces incidentes nos vértices que limitam cada aresta. Assim, este algoritmo gera malhas simplificadas com reduzido erro geométrico, dado que minimiza o erro associado a cada novo vértice. Note-se que, por omissão, o algoritmo efectua o colapso de uma aresta sobre o ponto que minimiza o erro introduzido na malha, que pode estar, ou não, sobre a aresta a colapsar. No entanto, é possível restringir a selecção do novo vértice a um ponto pertencente à aresta a colapsar, a um dos seus vértices e ao seu ponto médio ou, ainda, apenas a um dos seus vértices, sempre de forma a minimizar o erro introduzido.

De modo distinto, o algoritmo *NSA* segue um critério de simplificação baseado na variação de alguns vectores normais, o que implica que a região em torno de uma aresta a colapsar seja quase plana: uma determinada aresta será apenas colapsada se a resultante variação dos vectores normais às faces associadas a essa aresta estiver dentro de uma dada tolerância ϵ , em que ϵ é o limite para o ângulo de variação entre cada um desses vectores normais e o correspondente vector normal após o colapso da aresta. No entanto, não é seguida uma estratégia de minimização do erro introduzido, ou seja, se a variação dos vectores normais for inferior à tolerância a aresta é colapsada, mesmo que existam outras que possam ter variações inferiores à actual. Além disso, no algoritmo *NSA*, a operação de colapso de arestas é feita sempre sobre o seu ponto médio não se procurando, mais uma vez, qualquer minimização do erro introduzido.

O algoritmo *NSA* é mais rápido que o *QSlim*, sem que haja uma significativa degradação da qualidade da malha resultante, tal como verificado numa primeira comparação apresentada em [Silva 04]. Em geral, o algoritmo *NSA* fornece bons resultados em termos: (1) da preservação da forma dos modelos originais, (2) da qualidade das malhas simplificadas, e (3) do esforço computacional necessário. É de notar que o algoritmo *NSA* foi desenvolvido tendo como principal objectivo a eficiência computacional, não sendo a qualidade das malhas um objectivo prioritário (embora também conseguido).

3. FERRAMENTAS PARA COMPARAÇÃO DE MALHAS POLIGONAIS

A comparação das características de malhas poligonais representando um mesmo modelo é habitualmente efectuada usando *software* apropriado, que permite calcu-

lar alguns números de mérito expressando diferenças entre duas malhas e apresenta ao utilizador quer resultados numéricos (p.ex., valores mínimos, médios e máximos de erros geométricos), quer informação visual (p.ex., colorindo a superfície de um modelo da acordo com valores de diferença determinados em cada vértice de uma das malhas).

Metro, a ferramenta desenvolvida por Cignoni et al. [Cignoni 98b], permite a comparação numérica e visual das características de malhas poligonais. Os resultados numéricos apresentados compreendem o número de vértices e faces definindo uma malha, a área da sua superfície e o seu volume, bem como as distâncias mínima e máxima entre os pontos correspondentes de duas malhas. É também possível representar um modelo colorido de acordo com os valores numéricos obtidos. A distância de Hausdorff entre duas malhas poligonais pode também ser determinada.

A ferramenta descrita por Zhou et al. [Zhou 01] permite determinar mais algumas características das malhas poligonais (em particular, alguns tipos de curvatura) e disponibiliza vários modos de visualização adicionais, incluindo a representação lado-a-lado dos modelos a ser comparados e dos valores de diferença determinados, bem como “*box-glyphs*” e animações.

MESH, a ferramenta desenvolvida por Aspert et al. [Aspert 02], avalia as diferenças entre dois modelos definidos por malhas poligonais usando a distância de Hausdorff. Fornece ainda ao utilizador vários resultados numéricos, em particular as características principais de cada malha, e ainda os valores mínimo, médio, máximo e quadrático médio (*RMS*) das distribuições de diferença calculadas entre duas malhas. É também possível visualizar cada modelo colorido de acordo com os valores obtidos.

Finalmente, Roy et al. [Roy 04] descrevem uma ferramenta denominada *MeshDev* que permite determinar o erro geométrico entre pontos correspondentes de duas malhas, bem como os desvios dos vectores normais e de outros atributos, tais como a cor ou a textura. De modo semelhante às outras ferramentas, o *MeshDev* permite calcular valores numéricos caracterizando as malhas e as distribuições de erros ou desvios determinadas. É também possível visualizar os modelos coloridos de acordo com essas distribuições.

4. PolyMeCo

As ferramentas referidas não possuem funcionalidades que facilitem, num leque variado de situações, o processo de comparação das características de malhas poligonais. Em particular, para comparar as características e avaliar a qualidade de um conjunto de modelos, será desejável que, em vez de se carregar e processar sucessivamente cada um dos modelos, de modo isolado, o cálculo e a visualização dos resultados de números de mérito possam decorrer em simultâneo, sem a utilização de qualquer ferramenta adicional. O utilizador deverá poder carregar o conjunto de modelos e indicar quais os números de mérito que devem

ser calculados e, após o seu cálculo, visualizar e comparar, de diversos modos, os resultados obtidos.

O *PolyMeCo* [Silva 07a] é uma ferramenta que disponibiliza um ambiente integrado para análise e comparação das características de malhas poligonais, em que os resultados obtidos podem ser analisados usando diferentes modos de visualização de forma coordenada (ver Fig. 2). O principal objectivo do *PolyMeCo* é oferecer um conjunto de funcionalidades que permitam a sua utilização de modo

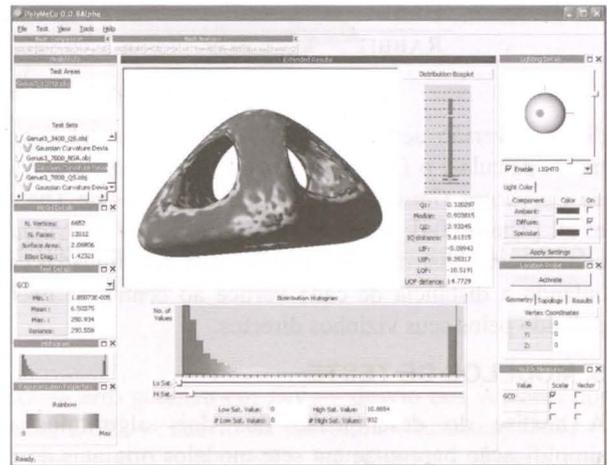


Figura 2. A interface do *PolyMeCo*.

eficiente e sistemático, em diferentes situações, podendo eventualmente ser também utilizado como banco de ensaio para o desenvolvimento de novos números de mérito descrevendo determinadas características das malhas.

4.1. Números de Mérito

O *PolyMeCo* permite o cálculo de vários números de mérito que suportam o processo de análise e comparação de malhas poligonais. São oferecidos dois tipos de números de mérito, descrevendo propriedades intrínsecas de uma malha ou medidas de diferença entre duas malhas correspondentes.

As propriedades intrínsecas² permitem avaliar as características de uma malha poligonal. Relativamente às versões anteriores [Silva 05a, Silva 05b], a versão actual (“*Alpha*” 0.0.8) do *PolyMeCo* permite determinar propriedades intrínsecas adicionais: em particular, as curvaturas média e Gaussiana usando, agora, o método proposto por Theisel et al. [Theisel 04]; bem como diversos números de mérito expressando a qualidade de triângulos (p.ex., duas métricas independentes das dimensões dos triângulos propostas por J. Shewchuk [Shewchuk 02], e uma versão melhorada da métrica originalmente proposta por H. Graf et al. [Graf 06]).

As medidas de diferença permitem comparar características ou propriedades de duas malhas. Entre outras me-

²Designação usada aqui no sentido de propriedades que podem ser calculadas directamente a partir da informação de um modelo, independentemente de qualquer modelo de referência; e não no sentido habitual, usado em Geometria Diferencial para, por exemplo, curvatura intrínseca.

Tabela 1. Algumas propriedades dos modelos originais. As três últimas colunas apresentam valores médios da qualidade dos triângulos.

Modelos	# Vértices	# Faces	Área Sup.	Diag. BBox	Menor Ang.	ShewSI	TriQ
CASTING	5096	10224	2,353	1,308	35,634	0,214	0,863
COW	2909	5804	1,091	1,271	30,161	0,201	0,818
FANDISK	6475	12946	2,206	1,452	43,458	0,235	0,936
FLASCHE	42762	85524	83187,8	310,16	45,374	0,238	0,955
GENUS3	6652	13312	2,068	1,423	37,664	0,220	0,890
HEAD	11703	23402	19,574	4,316	42,549	0,232	0,931
RABBIT	67039	134073	5,780E-03	9,321E-02	35,254	0,218	0,893

didadas, a versão actual do *PolyMeCo* permite adicionalmente calcular: o *Desvio da Curvatura Média* e o *Desvio da Curvatura Gaussiana* usando as sugestões de Theisel et al. [Theisel 04]; bem como *Diferenças de Suavidade*, com base nas distribuições de suavidade determinadas calculando a distância de cada vértice ao centro de massa definido pelos seus vizinhos directos.

5. MODELOS DE TESTE

A análise do desempenho dos dois algoritmos de simplificação baseou-se em sete modelos originais de diferentes tipos (ver Fig. 1), cujas principais características são apresentadas na Tabela 1.

A qualidade inicial desses modelos foi avaliada com base na qualidade dos triângulos que os compõem e encontra-se descrita nas últimas colunas da tabela, usando os valores médios de três números de mérito distintos:

- *Menor Ang.* — menor ângulo de cada triângulo; no melhor caso, correspondente a triângulos equiláteros, obter-se-ia 60 graus;
- *ShewSI* — a métrica $\frac{A}{(3l_{rms}^2 + \sqrt{(3l_{rms}^2)^2 - 48A^2})}$ definida por J. Shewchuk [Shewchuk 02], em que A representa a área de um triângulo e l_{rms} o valor médio quadrático do comprimento dos seus lados; para um triângulo degenerado, obtém-se um valor nulo;
- *TriQ* — a métrica $1/3 \sum_{i=0}^2 \frac{h_i}{m_i}$, em que h_i e m_i representam, para cada vértice de um triângulo, a altura e a distância ao ponto médio da aresta oposta, respectivamente [Graf 06]; para um triângulo equilátero, obtém-se $TriQ = 1$.

Os modelos FLASCHE e FANDISK apresentam uma melhor qualidade, segundo os valores médios desses três números de mérito: para o menor ângulo, obtiveram-se os valores mais próximos de 60 graus e, para os números de mérito *ShewSI* e *TriQ*, os valores mais elevados. Contrariamente, o modelo COW é aquele que apresenta menor qualidade.

Para analisar o desempenho dos dois algoritmos de simplificação foram então criados, para cada um dos sete modelos originais, seis modelos simplificados, con-

siderando três níveis de simplificação (forte, moderada e fraca) para cada um dos algoritmos.

Na primeira coluna da Tabela 2 estão listados todos os modelos criados: o nome inicia-se com a designação do modelo original, seguida do número de faces obtido e do nome do algoritmo usado. Por exemplo, o modelo CASTING_6000_NSA foi criado a partir do modelo CASTING, tem 6000 faces e foi obtido usando o algoritmo de simplificação NSA. A Figura 3 apresenta o conjunto de teste gerado para o modelo COW.

6. ANÁLISE DOS MODELOS SIMPLIFICADOS

Numa publicação anterior [Silva 07b] foram descritos os resultados de uma primeira comparação entre os algoritmos NSA e *QSlim*, para quatro conjuntos de modelos e usando apenas os valores médios de duas propriedades intrínsecas de malhas (*Menor Ângulo* e *Suavidade*) e de três medidas de diferença (*Erro Geométrico*, *Desvio de Normais* e *Métrica Composta*). Agora, foi realizada uma análise mais alargada, partindo de sete modelos originais (modelos FANDISK e FLASCHE usados em ambos os casos) e compreendendo propriedades intrínsecas (métricas *ShewSI* e *TriQ*) e medidas de diferença (p.ex., desvios das curvaturas média e Gaussiana) adicionais. Todo o processo foi suportado pela versão “Alpha” 0.0.8 da ferramenta *PolyMeCo*.

6.1. Análise Preliminar

Numa primeira fase procedeu-se à inspecção visual dos diferentes modelos simplificados, de modo a detectar possíveis artefactos. Para isso foi usada a funcionalidade do *PolyMeCo* que permite posicionar e orientar fontes de luz, de modo a analisar a superfície dos modelos sob diferentes condições de iluminação e, assim, perceber até que ponto as malhas geradas conservam características visuais aceitáveis no que respeita, por exemplo, aos “*highlights*” devidos à reflexão especular.

Na Figura 4 são apresentados alguns modelos visualizados usando diferentes configurações das fontes de luz. Para o modelo HEAD verifica-se que a versão simplificada obtida com o algoritmo NSA mantém uma melhor definição dos detalhes, e mesmo os “*highlights*” aparecem melhor definidos, do que na versão obtida usando o *QSlim*. O contrário acontece para o modelo GENUS3, em

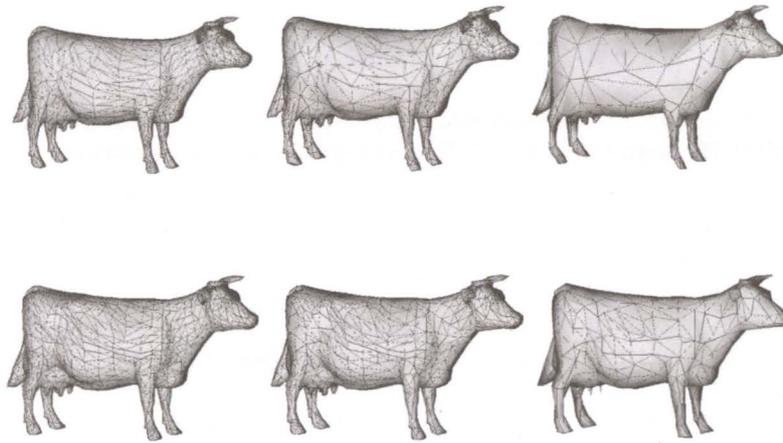


Figura 3. Conjunto de teste criado a partir do modelo Cow: em cima, versões simplificadas usando o algoritmo NSA; em baixo, versões simplificadas usando o QSlim.

que a versão simplificada usando o algoritmo NSA apresenta uma pior definição dos “highlights”.

Esta primeira inspeção visual permitiu também detectar que, para os modelos CASTING e FANDISK, as versões simplificadas usando o algoritmo QSlim exibem artefactos que afectam fortemente a qualidade visual dos modelos. A Figura 5 apresenta duas versões simplificadas do modelo CASTING. Note-se como na versão obtida usando o algoritmo QSlim a parte inferior do modelo apresenta uma triangulação estranha, tendo sido ocultados a reentrância e os vários furos.

Através de uma análise da área das superfícies dos modelos e do comprimento das diagonais das “bounding boxes” foi possível verificar que, apesar de não haver variações significativas de tamanho (i.e., diagonais das bounding boxes similares), existem modelos (p.ex., os criados a partir do modelo CASTING usando o QSlim) para os quais a área da superfície do modelo simplificado é superior ao dobro da área da superfície do modelo original. Esta diferença está directamente relacionada com os problemas de triangulação acima mencionados.

Foi também efectuada uma comparação qualitativa do volume dos diferentes modelos simplificados em relação aos modelos originais, através de uma sobreposição usando transparência, não tendo sido detectadas diferenças significativas para além dos problemas decorrentes dos artefactos encontrados na inspeção visual anterior.

6.2. Comparação usando Números de Mérito

Após a análise preliminar, foram calculados diversos números de mérito para cada um dos modelos simplificados, sendo os valores médios obtidos apresentados na Tabela 2. Além das medidas de **Qualidade de Triângulos** referidas anteriormente (*Menor Ang.*, *ShewSI* e *TriQ*), foram também calculadas várias **Medidas de Diferença**:

EG — erro geométrico; *DN* — desvio dos vectores normais; *DCG* — desvio da curvatura Gaussiana; *DCM* — desvio da curvatura média; *MétrComp* — métrica composta combinando *EG* e *DN* [Silva 06]; e *DS* — desvio de suavidade.

Globalmente, pode verificar-se que os modelos gerados usando o algoritmo QSlim obtiveram um menor erro geométrico médio (*EG*), relativamente ao original, que os correspondentes modelos gerados com o NSA, com a única excepção da simplificação fraca para o modelo CASTING. Isto deve-se ao facto de o algoritmo QSlim escolher sempre como próxima aresta a colapsar aquela que minimiza o erro, enquanto o algoritmo NSA, embora use um critério de coplanaridade, não segue, em cada passo, uma estratégia de minimização do erro introduzido.

No caso do desvio dos vectores normais (*DN*) não se verifica a preponderância de nenhum dos algoritmos: o comportamento menos bom do algoritmo NSA deve-se ao facto de não ser sempre colapsada, em cada passo, a aresta que introduziria a menor variação das normais. Para a métrica composta (*MétrComp*) verifica-se um comportamento globalmente semelhante ao da métrica *ND*. Por outro lado, os modelos simplificados pelo algoritmo NSA exibem, em geral, melhores (i.e., menores) valores médios para os desvios de curvatura média (*DCM*) e Gaussiana (*DCG*): apesar de não seguir uma estratégia de minimização de erro, este algoritmo tenta fazer uma simplificação uniforme em toda a malha, o que acaba por resultar numa melhor preservação das propriedades de forma de cada superfície.

Os modelos obtidos usando o algoritmo NSA são também melhores no que respeita ao valor médio do desvio de suavidade da superfície (*DS*), havendo apenas uma excepção para a versão fortemente simplificada do modelo RABBIT. A Figura 6 apresenta uma comparação dos desvios de suavidade entre todas as versões simplificadas do mo-

Tabela 2. Avaliação da qualidade, usando diferentes números de mérito, dos modelos criados com os algoritmos de simplificação *QSlim* e *NSA*. São apresentados os valores médios.

Modelos	Erro Geométrico (EG)	Desvio Normais (DN)	Desv. Curv. Gaussiana (DCG)	Desv. Curv. Média (DCM)	Métrica Composta (MétrComp)	Desvio Suavidade (DS)	Menor Ang.	ShewSI	TriQ
Casting_6000_NSA	1,398E-03	6,512E-02	9,214E+01	3,298E+00	3,871E-02	3,767E-03	34,063	0,210	0,854
Casting_6000_QS	1,436E-03	3,727E-01	8,255E+306	5,013E+04	3,267E-01	1,056E-01	26,116	0,179	0,725
Casting_3500_NSA	2,578E-03	1,252E-01	1,380E+02	4,931E+00	4,430E-02	6,983E-03	33,747	0,208	0,841
Casting_3500_QS	1,345E-04	3,024E-01	7,580E+03	4,433E+03	1,806E-01	1,435E-01	21,240	0,160	0,652
Casting_1700_NSA	4,163E-03	2,632E-01	2,956E+02	8,952E+00	4,656E-02	1,389E-02	33,427	0,207	0,837
Casting_1700_QS	2,700E-04	4,237E-01	6,807E+03	8,043E+02	1,006E-01	1,434E-01	17,662	0,151	0,611
Cow_3324_NSA	1,171E-03	1,237E-01	1,137E+03	1,158E+01	7,149E-02	3,300E-03	31,647	0,203	0,824
Cow_3324_QS	3,437E-04	1,121E-01	4,077E+02	7,317E+00	6,447E-02	3,708E-03	30,178	0,200	0,812
Cow_2094_NSA	1,999E-03	1,724E-01	5,130E+02	8,329E+00	6,374E-02	5,381E-03	31,929	0,204	0,827
Cow_2094_QS	6,891E-04	1,762E-01	5,593E+02	9,408E+00	6,446E-02	7,043E-03	30,453	0,199	0,809
Cow_778_NSA	5,666E-03	3,175E-01	9,963E+02	1,588E+01	5,004E-02	1,357E-02	33,082	0,207	0,838
Cow_778_QS	1,985E-03	3,379E-01	6,205E+02	1,297E+01	4,991E-02	1,729E-02	30,792	0,200	0,813
Fandisk_7000_NSA	1,211E-04	3,274E-02	1,357E+01	1,265E+00	1,776E-02	4,067E-03	36,677	0,218	0,884
Fandisk_7000_QS	8,316E-07	2,077E-01	1,674E+06	1,886E+05	1,123E-01	6,931E-02	38,905	0,220	0,883
Fandisk_3872_NSA	4,366E-04	6,670E-02	2,190E+01	2,141E+00	2,027E-02	7,094E-03	35,055	0,213	0,863
Fandisk_3872_QS	9,820E-06	2,599E-01	2,147E+03	5,108E+02	7,778E-02	7,785E-02	31,767	0,201	0,815
Fandisk_1312_NSA	2,935E-03	1,991E-01	3,463E+01	4,214E+00	2,287E-02	1,733E-02	32,914	0,205	0,833
Fandisk_1312_QS	4,753E-05	3,912E-01	3,459E+03	1,005E+03	3,980E-02	9,518E-02	20,783	0,162	0,660
Flasche_46444_NSA	3,416E-02	3,849E-02	2,054E-02	2,377E-02	3,651E-02	2,401E-01	37,635	0,220	0,893
Flasche_46444_QS	8,183E-03	3,172E-02	3,983E-02	5,639E-02	2,096E-02	2,820E-01	38,673	0,222	0,897
Flasche_25614_NSA	6,785E-02	6,391E-02	3,705E-02	3,759E-02	6,667E-02	4,810E-01	34,788	0,212	0,859
Flasche_25614_QS	1,524E-02	4,650E-02	4,328E-02	5,298E-02	2,460E-02	5,911E-01	32,564	0,206	0,834
Flasche_3094_NSA	3,698E-01	1,558E-01	3,541E-02	6,354E-02	3,621E-01	2,224E+00	32,185	0,203	0,824
Flasche_3094_QS	4,614E-02	1,102E-01	4,560E-02	6,904E-02	4,846E-02	3,514E+00	24,722	0,176	0,712
Genus3_7000_NSA	4,365E-04	2,008E-02	6,504E+00	6,460E-01	1,076E-02	4,905E-03	32,522	0,206	0,834
Genus3_7000_QS	2,361E-04	1,190E-02	4,324E+00	8,244E-01	6,365E-03	6,527E-03	29,273	0,193	0,777
Genus3_3400_NSA	1,048E-03	3,900E-02	1,240E+01	1,267E+00	1,072E-02	9,213E-03	29,904	0,196	0,796
Genus3_3400_QS	4,558E-04	2,635E-02	1,285E+01	1,623E+00	7,058E-03	1,323E-02	26,495	0,183	0,740
Genus3_1600_NSA	2,483E-03	7,665E-02	1,957E+01	1,963E+00	1,136E-02	1,651E-02	28,844	0,192	0,781
Genus3_1600_QS	5,988E-04	4,775E-02	2,138E+01	4,283E+00	6,240E-03	2,381E-02	27,027	0,184	0,744
Head_11000_NSA	1,227E-03	3,722E-02	8,174E+00	7,616E-01	1,815E-02	1,128E-02	34,296	0,211	0,857
Head_11000_QS	3,710E-04	3,880E-02	1,196E+01	1,029E+00	1,844E-02	1,424E-02	34,498	0,211	0,854
Head_5000_NSA	2,907E-03	7,341E-02	1,323E+01	1,350E+00	1,798E-02	2,146E-02	33,216	0,207	0,839
Head_5000_QS	7,961E-04	7,118E-02	1,538E+01	1,505E+00	1,584E-02	2,615E-02	33,457	0,207	0,839
Head_2300_NSA	6,434E-03	1,334E-01	1,752E+01	1,915E+00	1,894E-02	3,761E-02	32,244	0,203	0,823
Head_2300_QS	1,521E-03	1,209E-01	1,890E+01	2,313E+00	1,327E-02	4,387E-02	33,602	0,208	0,843
Rabbit_64999_NSA	7,461E-06	2,954E-02	1,547E+04	5,045E+01	1,433E-02	4,878E-05	40,603	0,227	0,914
Rabbit_64999_QS	1,963E-06	2,001E-02	3,168E+04	1,690E+02	9,700E-03	9,401E-05	34,746	0,212	0,862
Rabbit_31999_NSA	1,718E-05	4,975E-02	1,918E+04	6,678E+01	1,189E-02	1,078E-04	32,142	0,207	0,840
Rabbit_31999_QS	4,819E-06	3,098E-02	2,225E+04	7,853E+01	8,091E-03	1,479E-04	33,933	0,209	0,849
Rabbit_12999_NSA	4,619E-05	7,838E-02	2,140E+04	7,726E+01	7,643E-03	2,686E-04	27,583	0,191	0,774
Rabbit_12999_QS	1,221E-05	5,056E-02	2,190E+04	7,915E+01	4,915E-03	2,648E-04	33,748	0,209	0,846

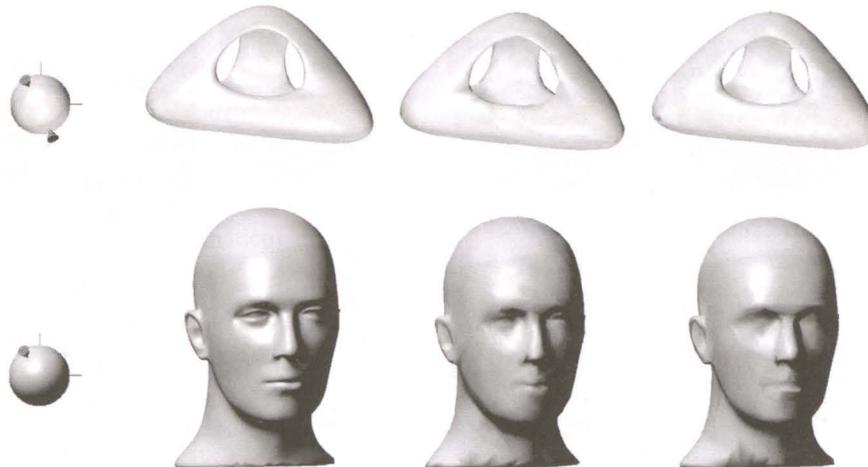


Figura 4. Modelos visualizados usando diferentes configurações das fontes de luz: em cima, GENUS3, GENUS3_1600_NSA e GENUS_1600_QS; em baixo, HEAD, HEAD_2300_NSA e HEAD_2300_QS. Do lado esquerdo: ilustração da configuração das fontes de luz utilizada.

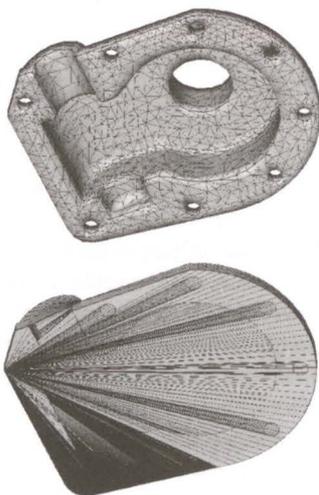


Figura 5. Simplificações fracas do modelo CASTING obtidas com os algoritmos NSA (em cima) e QSlim (em baixo). Notar como, neste último modelo, os triângulos que definem a base são incorrectamente definidos.

delo HEAD usando um mapeamento de cor comum. É fácil de perceber que os modelos obtidos usando o algoritmo NSA têm menor desvio de suavidade que os correspondentes modelos obtidos usando o QSlim.

Os valores médios dos números de mérito indicadores da qualidade dos triângulos que compõem as malhas (*Menor Ang.*, *ShewSI* e *TriQ*) apresentam um comportamento globalmente semelhante, i.e., a classificação relativa para dois modelos simplificados correspondentes é a mesma, na quase totalidade das situações, qualquer que seja a métrica considerada. O algoritmo NSA obtém, na maioria

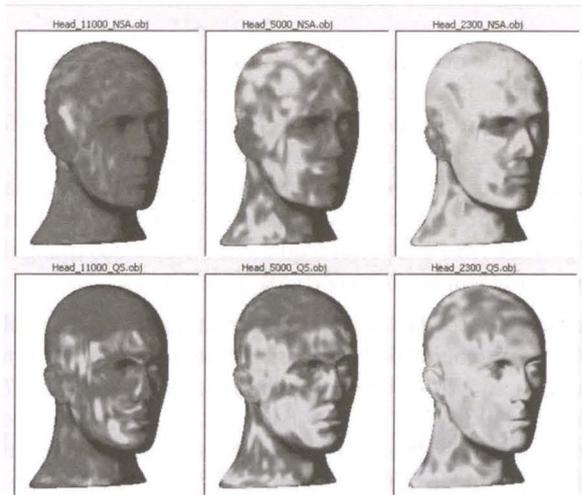


Figura 6. Comparação do desvio de suavidade da superfície entre todas as versões simplificadas do modelo HEAD, usando um mapeamento de cor comum.

das situações, melhores resultados, sendo o seu comportamento pior para modelos com um número inicial de faces mais elevado (p.ex., para as versões moderada e fortemente simplificadas do modelo RABBIT e ligeiramente simplificada do modelo FLASCHE). Uma situação distinta ocorre para o modelo HEAD, que possui características de forma particulares: o algoritmo QSlim gera triângulos melhores, em termos da amplitude média do seu menor ângulo, obtendo-se valores muito próximos para as outras duas medidas de qualidade. Estes comportamentos particulares poderão dever-se ao facto de, para o algoritmo NSA, não existir uma ordenação das arestas a colapsar: num modelo

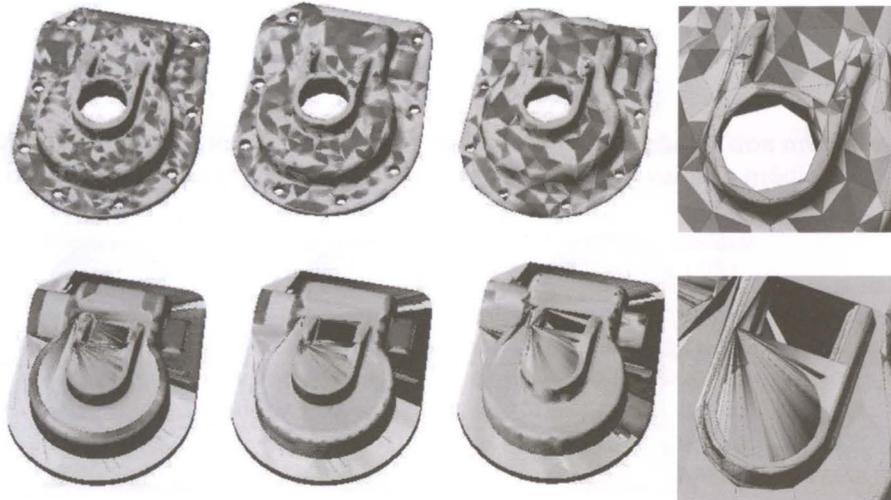


Figura 7. Modelos coloridos de acordo com os resultados obtidos com o número de mérito *ShewSI* para os diferentes níveis de simplificação: triângulos com melhor qualidade representados com a cor azul. Modelos simplificados usando o algoritmo *NSA* (em cima) e *QSlim* (em baixo). Mais à direita, detalhes dos modelos com maior grau de simplificação.

com grande número de faces as simplificações acabam por ocorrer, muitas vezes, repetidamente na mesma região (i.e., sem necessidade de se propagar a toda a malha), deformando mais os triângulos nessas zonas. É também de realçar que, em alguns modelos (p.ex., *COW*), a qualidade média dos triângulos observada nos modelos criados com o algoritmo *NSA* é superior à qualidade média dos triângulos que compõem o modelo original (ver Tab. 1).

A mais acentuada deterioração da qualidade dos triângulos com o incremento do grau de simplificação é observada nas versões simplificadas obtidas usando o algoritmo *QSlim* dos modelos *CASTING* e *FANDISK*. Isto é uma consequência dos artefactos observados na análise preliminar dos modelos. Observando a Figura 7 nota-se que os triângulos gerados pelo algoritmo *QSlim* têm pior qualidade, nomeadamente nas regiões onde os artefactos se verificam: note-se o desaparecimento do furo central. A pior qualidade dos triângulos, assim como os muitas vezes associados problemas de topologia (p.ex., com vértices com valências de várias dezenas), criam problemas numéricos que influenciam, por exemplo, o cálculo das curvaturas, o que pode justificar alguns valores discrepantes que ocorrem nos desvios de curvatura.

7. CONCLUSÕES

A análise realizada, com um conjunto mais vasto de modelos e um maior leque de números de mérito do que no estudo anterior [Silva 07b], confirmou globalmente as principais conclusões então obtidas: (1) o algoritmo *QSlim* gera modelos simplificados com menor erro geométrico, mas origina artefactos para alguns tipos de modelos (p.ex., com furos), e (2) o algoritmo *NSA* gera, em geral, modelos com melhor qualidade, sendo portanto um alternativa ao *QSlim*. O algoritmo *QSlim* apresentou, como era esperado, um

melhor comportamento em termos do erro geométrico dos modelos simplificados em relação aos originais, mas, para alguns modelos (*CASTING* e *FANDISK*), originou artefactos com um impacto visual bastante significativo, bem como alterações da forma das superfícies dos modelos e da topologia das malhas triangulares que as representam, tornando inviável a sua aplicação para modelos desse tipo. É de realçar que este problema não é revelado pelo valor médio do erro geométrico, o que reforça a ideia de que é necessário quer utilizar diferentes números de mérito para analisar/comparar as características de modelos poligonais, quer efectuar uma cuidada análise visual das superfícies dos modelos e das distribuições obtidas para os números de mérito escolhidos.

Em geral, o algoritmo *NSA* produziu malhas sem alterações de forma, ou topologia, significativas e com uma qualidade (de triângulos) maior, o que é importante não só para aplicações numéricas como também para aplicações de visualização, onde uma menor qualidade dos triângulos pode resultar no aparecimento de artefactos na superfície de um modelo. O facto de a forma das superfícies ser melhor preservada (i.e., exibem desvios de curvatura menores) parece compensar, em termos visuais, a perda de informação associada ao maior erro geométrico, por comparação com o algoritmo *QSlim*.

O algoritmo *NSA* tem um comportamento pior na simplificação acentuada de modelos com um número inicial de faces elevado ou forma inicial particular (p.ex., modelo *HEAD*). Uma provável razão é a não ordenação das arestas a colapsar, segundo a variação dos vectores normais, o que pode resultar em sucessivas simplificações de uma mesma região, deteriorando fortemente a qualidade dos triângulos que a compõem. Parece, assim, pertinente

introduzir um critério de ordenação das arestas a colapsar, mas sem perder de vista o impacto que essa modificação possa ter no desempenho do algoritmo: um dos seus pontos fortes em relação ao *QSLim* [Silva 04].

O *PolyMeCo* revelou-se essencial no cálculo dos números de mérito seleccionados e na análise e comparação sistemáticas das características dos diferentes modelos. No entanto, é clara a necessidade de usar um número de mérito que mais fielmente (e de modo automático) expresse a qualidade visual dos modelos: é necessário melhorar a *Métrica Composta* de forma a tornar mais claro o seu significado. Este facto é ilustrado pelas versões fortemente simplificadas do modelo HEAD: na análise preliminar verificou-se que a versão obtida com o algoritmo *NSA* apresenta uma melhor definição dos detalhes e dos “highlights”; no entanto, os valores médios do *Erro Geométrico*, do *Desvio das Normais* e da *Métrica Composta* não corroboram essa observação.

A avaliação da qualidade visual foi efectuada com base na inspecção da superfície dos modelos e tecendo algumas considerações sobre o impacto das características evidenciadas por alguns números de mérito (em particular referentes à qualidade de triângulos). A importância de métricas que avaliem a qualidade visual é demonstrada pelo facto de números de mérito como o *Erro Geométrico*, bastante usado na literatura, não fornecerem informação suficiente para tirar conclusões quanto a esse aspecto.

Existem algumas abordagens à simplificação de modelos poligonais que introduzem critérios de qualidade visual [Zhang 02, Williams 03] e tentam melhorar a qualidade dos modelos obtidos relativamente aos métodos que usam critérios unicamente geométricos. Com base nas ideias principais de tais métodos, deverá ser possível definir métricas para avaliação da qualidade visual de modelos simplificados que poderão ser avaliadas, por exemplo, com base nos resultados de qualidade percebida de modelos poligonais obtidos por alguns dos autores usando estudos com observadores [Silva 05c, Silva 06]. Um número de mérito para medição das diferenças de qualidade visual entre modelos, baseado nos trabalhos de Karni et al. [Karni 00] e Sorkine et al. [Sorkine 03] está a ser implementado e será testado em breve.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os comentários e sugestões pertinentes dos revisores da comunicação submetida.

O primeiro autor agradece à unidade de investigação 127/94 IEETA, da Universidade de Aveiro, a bolsa que tem permitido o seu trabalho.

Parte do trabalho do segundo autor foi realizado no Instituto Fraunhofer de Computação Gráfica (*Fraunhofer IGD*), em Darmstadt, Alemanha, no âmbito de uma Bolsa de Licença Sabática da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT). Uma palavra de agradecimento é devida ao Dr.-Ing. André Stork e a Sebastian Peña Serna, pelo acolhimento dispensado e pela proveitosa troca de ideias.

Agradece-se a utilização dos modelos poligonais aos

repositórios *AIM@SHAPE*, *Cyberware*, *Stanford University* e *3D Cafe*.

Referências

- [Aspert 02] N. Aspert, D. Santa-Cruz, e T. Ebrahimi. MESH: Measuring errors between surfaces using the Hausdorff distance. Em *Proc. IEEE Int. Conf. Multimedia and Expo 2002*, volume 1, páginas 705–708, 2002.
- [Cignoni 98a] P. Cignoni, C. Montani, e R. Scopigno. A comparison of mesh simplification algorithms. *Computers and Graphics*, 22(1):37–54, 1998.
- [Cignoni 98b] P. Cignoni, C. Rocchini, e R. Scopigno. Metro: measuring error on simplified surfaces. *Computer Graphics Forum*, 17(2):167–174, 1998.
- [Garland 97] M. Garland e P. S. Heckbert. Surface simplification using quadric error metrics. Em *Proc. SIGGRAPH 1997*, páginas 209–216, 1997.
- [Graf 06] H. Graf, S. P. Serna, e A. Stork. Adaptive quality meshing for “on-the-fly” volumetric mesh manipulations within virtual environments. Em *Proc. 2006 IEEE Int. Conf. Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems*, páginas 178–183, 2006.
- [Karni 00] Z. Karni e C. Gotsman. Spectral compression of mesh geometry. Em *Proc. SIGGRAPH 2000*, páginas 279–286, 2000.
- [Levoy 00] M. Levoy e outros. The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues. Em *Proc. SIGGRAPH 2000*, páginas 131–144, 2000.
- [Losasso 06] F. Losasso, I. Geoffrey, E. Guendelman, e R. Fedkiw. Melting and burning solids into liquids and gases. *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, 12(3):343–352, 2006.
- [Luebke 01] D. P. Luebke. A developer’s survey of polygonal simplification algorithms. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(3):24–35, 2001.
- [Puppo 97] E. Puppo e R. Scopigno. Simplification, LOD and multiresolution — principles and applications. *Eurographics Tutorial Notes*, 1997.
- [Rogowitz 01] B. E. Rogowitz e H. E. Rushmeier. Are image quality metrics adequate to evaluate the quality of geometric objects? Em

- Proc. SPIE 2001 vol. 4299, Human Vision and Electronic Imaging VI*, páginas 340–348, 2001.
- [Roy 04] M. Roy, S. Foufou, e F. Truchetet. Mesh comparison using attribute deviation metric. *Int. Journal of Image and Graphics*, 4(1):1–14, 2004.
- [Shewchuk 02] J. R. Shewchuk. What is a good linear element? Interpolation, conditioning, and quality measures. Em *Proc. 11th Int. Meshing Roundtable*, páginas 115–126, 2002.
- [Silva 04] F. G. M. Silva e A. J. P. Gomes. Normal-based simplification algorithm for meshes. Em *Proc. of Theory and Practice of Computer Graphics (TPCG'04)*, páginas 211–218. IEEE CS Press, 2004.
- [Silva 05a] S. Silva, J. Madeira, e B. S. Santos. PolyMeCo — A polygonal mesh comparison tool. Em *Proc. 9th Int. Conf. Information Visualization IV05*, páginas 842–847. IEEE CS Press, 2005.
- [Silva 05b] S. Silva, J. Madeira, e B. S. Santos. PolyMeCo — Uma ferramenta de análise e comparação de malhas poligonais. Em *Actas do 13o. Encontro Português de Computação Gráfica*, páginas 1–8, 2005.
- [Silva 05c] S. Silva, B. S. Santos, J. Madeira, e C. Ferreira. Comparing three methods for simplifying mesh models of the lungs: an observer test to assess perceived quality. Em *Proc. SPIE 2005 vol. 5749, Image Perception, Observer Performance, and Technology Assessment*, páginas 99–110, 2005.
- [Silva 06] S. Silva, C. Ferreira, J. Madeira, e B. S. Santos. Perceived quality of simplified polygonal meshes: Evaluation using observer studies. Em *Proc. Ibero-American Symposium in Computer Graphics SIACG06*, páginas 169–178, Santiago de Compostela, Spain, 2006.
- [Silva 07a] S. Silva. *PolyMeCo — A Polygonal Mesh Analysis and Comparison Tool*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2007.
- [Silva 07b] S. Silva, F. Silva, J. Madeira, e B. S. Santos. Evaluation of mesh simplification algorithms using PolyMeCo: A case study. Em *Proc. SPIE Visualization and Data Analysis 2007*, páginas 64950D–1–64950D–12, 2007.
- [Sorkine 03] O. Sorkine, D. Cohen-Or, e S. Toledo. High-pass quantization for mesh encoding. Em *Proc. Eurographics Symp. Geometry Processing*, páginas 42–51, 2003.
- [Theisel 04] H. Theisel, C. Rössl, R. Zayer, e H.-P. Seidel. Normal based estimation of the curvature tensor for triangular meshes. Em *Proc. 12th Pacific Conf. Computer Graphics and Applications (PG'04)*, páginas 288–297, 2004.
- [Williams 03] N. Williams, D. Luebke, J. D. Cohen, M. Kelley, e B. Schubert. Perceptually guided simplification of lit, textured meshes. Em *Proc. 2003 Symp. Interactive 3D Graphics*, páginas 113–121, 2003.
- [Zhang 02] E. Zhang e G. Turk. Visibility-guided simplification. Em *Proc. IEEE Visualization 2002*, páginas 267–274, 2002.
- [Zhou 01] L. Zhou e A. Pang. Metrics and visualization tools for surface mesh comparison. Em *Proc. SPIE 2001 vol 4302, Visual Data Exploration and Analysis VIII*, páginas 99–110, 2001.