

Qualidade Medida vs. Qualidade Percebida em Malhas Triangulares dos Pulmões

Samuel Silva
IEETA – Univ. de Aveiro
Aveiro
sss@ieeta.pt

Joaquim Madeira
DET / IEETA – Univ. de Aveiro
Aveiro
jmadeira@det.ua.pt

Carlos Ferreira
CIO / DEGEI – Univ. de Aveiro
Aveiro
carlosf@egi.ua.pt

Beatriz Sousa Santos
DET / IEETA – Univ. de Aveiro
Aveiro
bss@det.ua.pt

Sumário

Em diversas áreas de aplicação, a simplificação das malhas poligonais usadas para representar os modelos, ao diminuir a sua complexidade, constitui uma possível solução para permitir a sua utilização interactiva. Em geral, uma malha obtida após um processo de simplificação possui diferenças em relação à malha original, que podem ser avaliadas usando diferentes índices de qualidade. No entanto, não é ainda claro o modo como essas medidas quantitativas (p.ex., o desvio geométrico) se relacionam com a percepção que os utilizadores têm da qualidade dos modelos simplificados.

Neste artigo, com base num conjunto de modelos pulmonares definidos por malhas triangulares e para três métodos de simplificação particulares, apresentam-se os resultados da avaliação da qualidade dos modelos simplificados usando dois processos distintos: o cálculo de índices de qualidade e a realização de uma experiência controlada com observadores. Os dados obtidos pelos dois processos são comparados, sendo possível estabelecer uma relação entre ambos. Verifica-se que, nestas condições específicas, alguns dos índices quantitativos usados podem servir como estimadores da qualidade das malhas percebida pelos utilizadores.

Palavras-chave

Malhas triangulares, Qualidade, Medidas Quantitativas, Experiência Controlada

1. INTRODUÇÃO

As malhas poligonais são utilizadas em diversas áreas, em particular em Visualização Médica, para representar modelos de órgãos e outras estruturas internas (ver, p.ex., [Bartz03]). Por vezes, devido à sua complexidade, estas não permitem a manipulação interactiva dos modelos, nem o seu armazenamento e visualização em dispositivos de fracos recursos. Isto leva a que se procure diminuir essa mesma complexidade (i.e., o número de vértices e faces de uma malha) usando, por exemplo, métodos de simplificação [Luebke01]. Este processo de simplificação resulta em diferenças (erros ou desvios) entre a malha original e a processada. Em muitas situações, é importante avaliar essas diferenças, no sentido de se perceber se são aceitáveis para a aplicação em causa.

Existem diversas ferramentas que permitem avaliar as diferenças entre malhas poligonais [Cignoni98, Roy04] e que têm sido usadas na literatura para testes de qualidade (p.ex., ver [FSilva04] e [Valette04]). As diferenças entre

malhas são habitualmente medidas através de índices de qualidade que comparam propriedades intrínsecas de duas malhas, como a posição dos seus vértices ou a curvatura das superfícies por elas definidas.

No entanto, este tipo de medidas fornece, essencialmente, uma quantificação da diferença, não se sabendo, ainda, que índices quantitativos melhor poderão expressar, e em que grau, a forma como os utilizadores percebem a qualidade dos modelos simplificados. Assim, aquando do desenvolvimento de novos métodos de processamento de malhas poligonais, ou para a comparação do desempenho de vários algoritmos para um mesmo tipo de operação, esta percepção da qualidade de uma malha, por parte dos utilizadores, terá de ser avaliada através de uma experiência controlada com observadores [Dix04]. É de notar que existe ainda pouca literatura sobre este assunto, sendo de referir o artigo de Watson *et al.* [Watson01].

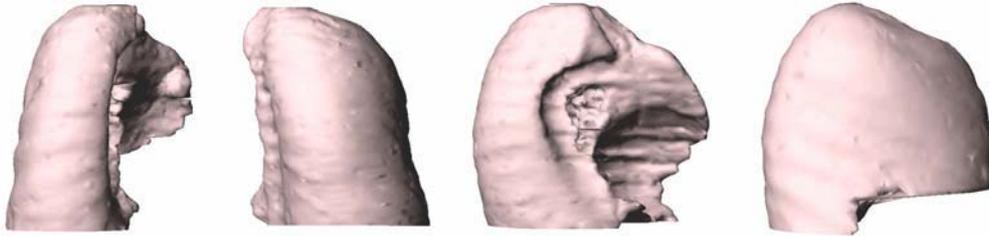


Figura 1 – Modelos pulmonares a partir dos quais foram gerados os modelos simplificados.

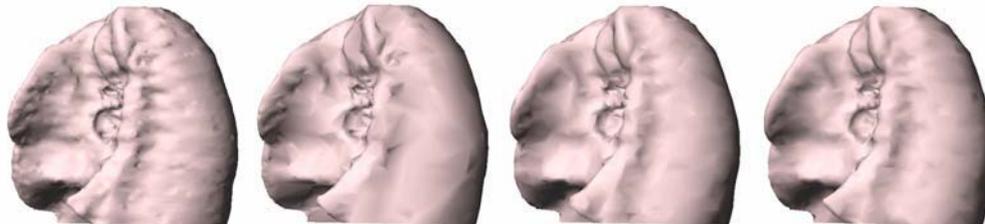


Figura 2 – Da esquerda para a direita: modelo pulmonar e as suas três versões simplificadas para 20% do número inicial de faces, usando os algoritmos de simplificação.

O presente artigo apresenta, para um conjunto de modelos pulmonares definidos por malhas triangulares e para três métodos de simplificação particulares, os resultados da avaliação da qualidade dos modelos simplificados usando dois processos distintos: o cálculo de índices de qualidade e a realização de uma experiência controlada com observadores. Os dados obtidos pelos dois processos são analisados separadamente e, depois, comparados, para que possa ser estabelecida uma relação entre os índices de qualidade e os resultados da apreciação dos observadores.

Nas secções seguintes são apresentados os modelos triangulares e os métodos de simplificação utilizados, e analisados os resultados da avaliação obtidos usando índices de qualidade. De seguida é descrita a experiência controlada e apresentados os seus resultados. Finalmente, é feita uma análise comparativa entre os resultados de ambos os processos de avaliação da qualidade das malhas, e são apresentadas as conclusões.

2. CRIAÇÃO DOS MODELOS SIMPLIFICADOS

Partindo de quatro modelos pulmonares (figura 1), construídos tal como descrito em [Silva04] e representados usando a biblioteca OpenMesh [Botsch02], foram usados três métodos de simplificação de malhas:

- QSLim [Garland97],
- algoritmo de simplificação disponibilizado na biblioteca OpenMesh [Botsch02] (OMeq),
- e esse mesmo algoritmo com um critério de simplificação adicional, relacionado com a variação permitida para as normais (“normal flipping”) à superfície dos modelos (OMeqNF);

e estabelecidos dois níveis de simplificação (para 20% e 50% do número original de faces) de modo a permitir avaliar o seu efeito na qualidade dos modelos. Assim, avalia-se a qualidade quer de modelos moderadamente simplificados (50%), quer bastante simplificados (20%).

Foram gerados, para cada modelo original, 6 modelos simplificados. A figura 2 apresenta um dos modelos originais e as suas três simplificações para 20% do número inicial de faces, usando os algoritmos de simplificação.

3. ÍNDICES DE QUALIDADE

Para medir as diferenças entre os modelos simplificados e os respectivos modelos originais foi usado o MeshDev [Roy04]. Esta ferramenta permite avaliar as diferenças geométricas locais entre duas malhas, ou seja, a distância entre pontos correspondentes após a simplificação, bem como as variações locais das normais à superfície das malhas. Os resultados disponibilizados incluem os valores máximo, médio e mínimo para os desvios calculados, e a respectiva variância.

3.1 Resultados

Para cada um dos modelos simplificados foram calculados os desvios geométrico e das normais. Para cada um destes desvios foram registados os valores máximo, médio e variância. Com base em cada um desses índices de qualidade, foi atribuída, a cada um dos modelos simplificados de um modelo original, e para um mesmo nível de simplificação, uma classificação (primeiro, segundo e terceiro lugares). O gráfico da figura 3 mostra a soma dos lugares atribuídos a cada método e para cada nível de simplificação. O valor apresentado

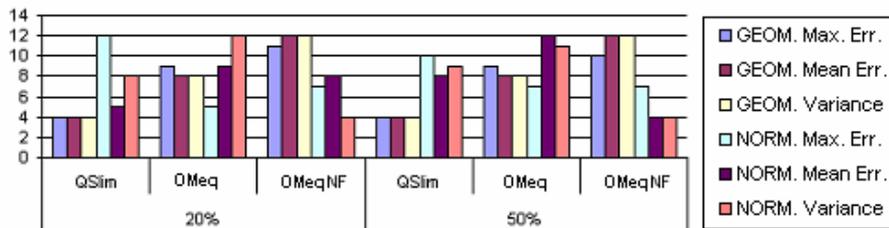


Figure 3 – Soma das posições (1º, 2º e 3º lugares) obtidas pelos três métodos, para cada nível de simplificação, usando seis índices de qualidade.

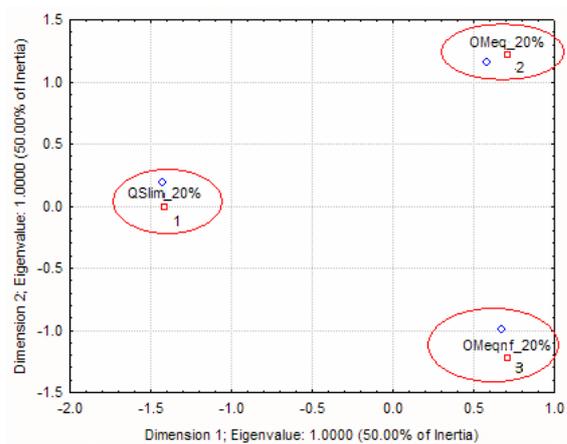


Figura 4 – Associações entre as classificações obtidas para os valores médios do desvio geométrico e os métodos de simplificação (20%).

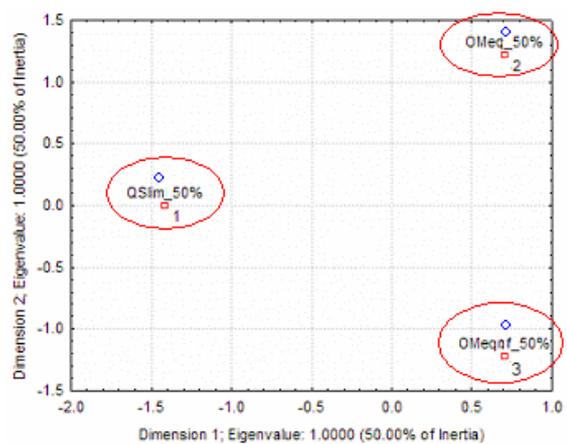


Figura 5 – Associações entre as classificações obtidas para os valores médios do desvio geométrico e os métodos de simplificação (50%).

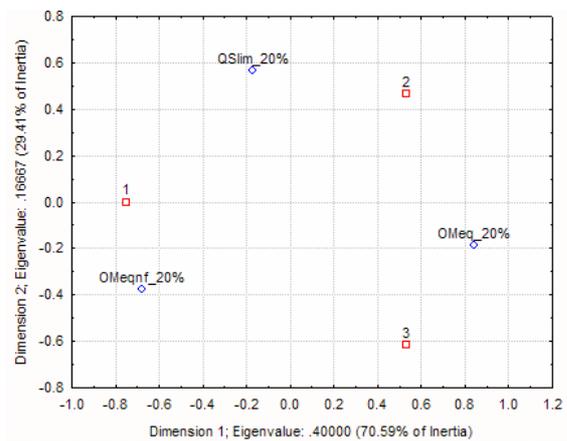


Figura 6 – Associações entre as classificações obtidas para os valores médios do desvio das normais e os métodos de simplificação (20%).

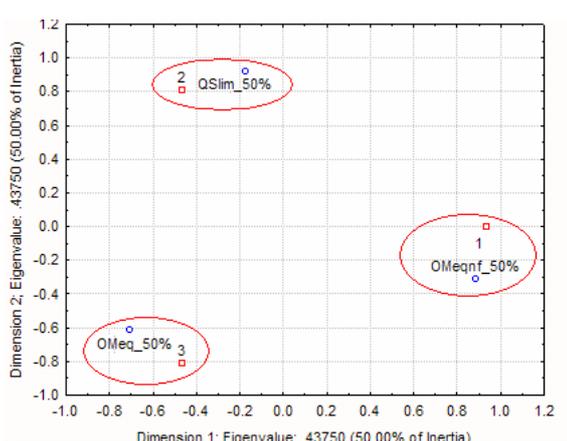


Figura 7 – Associações entre as classificações obtidas para os valores médios do desvio das normais e os métodos de simplificação (50%).

varia entre 4 (quatro primeiros lugares) e 12 (quatro terceiros lugares).

Da análise da figura 3 verifica-se que o método QSlim é o melhor classificado para ambos os níveis de simplificação

de acordo com os três índices geométricos. Por outro lado, os índices de variação das normais classificam o método OMeqNF como o melhor. Este resultado pode ser uma consequência natural do facto de, neste método, ser

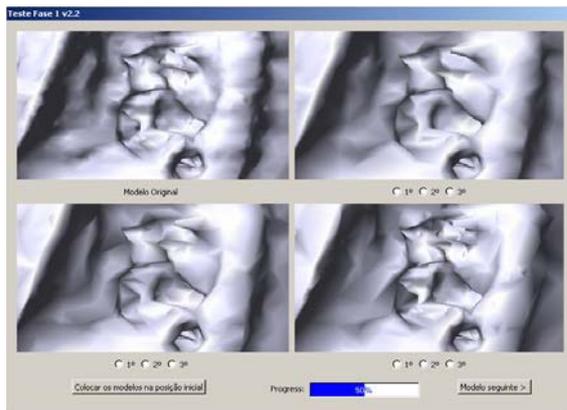


Figura 8 – Primeira fase da experiência: os observadores são confrontados com o modelo original (à esquerda, em cima) e três suas versões simplificadas. É apresentada uma situação em que foi feita uma ampliação de uma parte do modelo.

usado um critério relacionado com a variação das normais à superfície dos modelos.

De modo a estudar uma possível associação entre os métodos de simplificação e as classificações obtidas usando os valores médios dos desvios geométrico e de normais, recorreu-se a tabelas de contingência [Daniel99], optando-se por ilustrar o resultado de forma gráfica através da Análise das Correspondências [Johnson98]. Nas figuras 4 e 5, correspondentes ao valor médio do desvio geométrico, é possível verificar, para ambos os níveis de simplificação, uma clara associação entre os métodos de simplificação e as classificações: em primeiro lugar o método QSlim, seguido do OMeq e, finalmente, o método OMeqNF.

Por outro lado, para o valor médio do desvio das normais, as Análises de Correspondências apresentadas nas figuras 6 e 7 mostram resultados diferentes para cada um dos níveis de simplificação. Para o nível de simplificação de 20% não é possível observar uma associação entre os métodos de simplificação e as classificações. Para o nível de simplificação de 50%, o método OMeqNF aparece associado ao primeiro lugar, seguido do QSlim, no segundo, e, finalmente, o método OMeq no terceiro lugar.

4. EXPERIÊNCIA CONTROLADA

O objectivo da experiência foi o de comparar modelos simplificados, usando os três métodos de simplificação, de acordo com a sua qualidade percebida pelos observadores. Para efectuar as comparações entre modelos foram utilizadas preferências — em que o observador escolhe o estímulo (i.e., o modelo) no qual identifica maior qualidade —, e classificações — em que o observador atribui uma nota ao estímulo (i.e., a um modelo) de acordo com uma escala definida *a priori*.

De seguida são apresentados os aspectos principais da realização da experiência controlada, bem como os

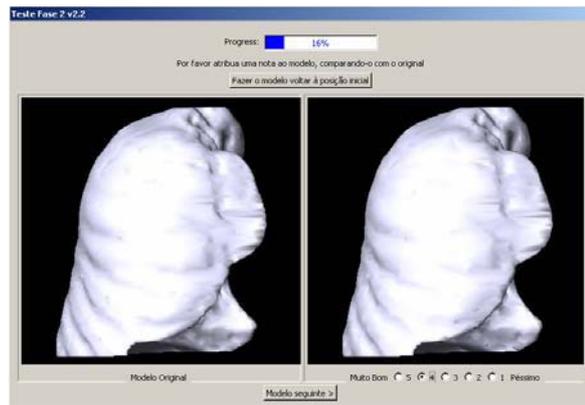


Figura 9 – Segunda fase da experiência: os observadores são confrontados com o modelo original e uma sua versão simplificada, retirada do conjunto de todos os modelos simplificados.

principais resultados obtidos. Descrições mais detalhadas destes aspectos podem ser encontradas em [Silva05].

4.1 Observadores e Métodos

O grupo de observadores que participou na experiência era constituído por 32 estudantes da Universidade de Aveiro: 18 estudantes de Engenharia e 14 de Radiologia (20 homens e 12 mulheres). As suas idades situavam-se, na maioria, entre os 18 e 25 anos. Como resultado adicional, pretendeu-se também verificar se a experiência dos estudantes de Radiologia em operações de visualização influenciava os resultados obtidos.

Para esta experiência foi escolhida uma metodologia “dentro de grupos” na qual todos os estímulos (i.e., todos os modelos de teste, no caso) são apresentados a cada um dos observadores. De modo a minimizar alguns efeitos (aprendizagem ao longo da experiência, nervosismo na primeira situação experimental ou fadiga na última) que poderiam influenciar os resultados, os diferentes (conjuntos de) modelos foram apresentados de modo aleatório a cada um dos observadores.

Todos os modelos foram representados usando sombreamento de Gouraud e foi dada a possibilidade aos observadores de alterarem a sua orientação, posição e tamanho. De modo a não causar desorientação aos observadores, as transformações resultantes da manipulação de qualquer modelo presente no ecrã eram aplicadas a todos os outros, mantendo-os sincronizados. Esta sincronização só era efectuada após a operação de manipulação terminar, ou seja, apenas o modelo manipulado era visto a movimentar-se em tempo real. Esta característica foi imposta de forma a reduzir o peso computacional destas operações. Para além disso, era disponibilizado um botão que permitia colocar todos os modelos na situação inicial.

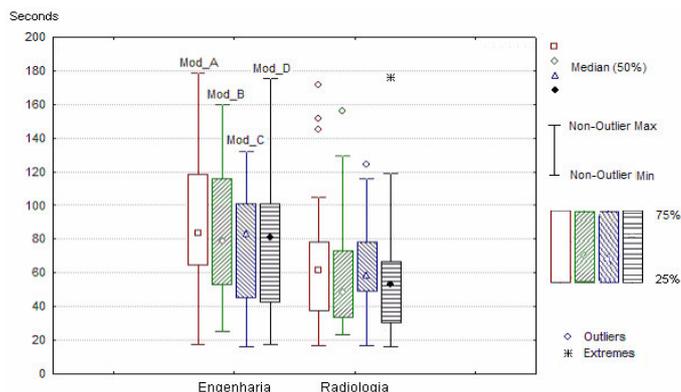


Figura 10 – Tempos de decisão agrupados por área de estudos.

4.2 Protocolo

Todos os observadores receberam, inicialmente, uma explicação sobre o enquadramento da experiência e sobre as tarefas que teriam de efectuar.

A experiência foi dividida em duas fases como se explica em seguida.

4.2.1 Fase 1 – Preferências

Nesta fase, foram apresentados a cada observador conjuntos contendo um dos modelos originais e três suas versões simplificadas, usando os três métodos de simplificação, para apenas um dos níveis de simplificação (figura 8). Era pedido aos observadores que atribuísem um primeiro, segundo e terceiro lugares aos modelos simplificados apresentados, de acordo com a sua qualidade e comparativamente ao original.

4.2.2 Fase 2 – Classificações

Nesta fase, foram apresentados a cada observador conjuntos contendo um dos modelos originais e uma sua versão simplificada (figura 9). Era pedido que fosse atribuída uma nota ao modelo simplificado usando uma escala de 1 (muito mau) a 5 (muito bom), de acordo com a sua qualidade e comparativamente ao modelo original.

4.2.3 Aplicação de suporte

De forma a permitir a implementação do protocolo definido, foi desenvolvida uma aplicação para plataformas Windows usando a linguagem C++, e as bibliotecas OpenMesh, para armazenamento das malhas poligonais, e Fox Toolkit [Fox05], para implementação da interface. Os modelos utilizados, assim como as suas versões simplificadas, foram todos lidos de disco antes do início da experiência, de modo a reduzir os tempos de espera entre situações experimentais. Para melhor desempenho, durante o *rendering* dos modelos apresentados, foram construídas listas de desenho (“*display lists*”).

Os resultados obtidos com cada observador foram, no final da experiência, reunidos num ficheiro e enviados automaticamente para um servidor.

4.3 Dados Recolhidos

No início da experiência, foram recolhidos alguns dados de modo a caracterizar o perfil de cada um dos observadores como, por exemplo, o sexo, a idade e a área de estudos.

Além das preferências e classificações atribuídas pelos observadores nas duas fases da experiência, foram também registados dados quanto ao tempo necessário, a cada um deles, para tomar uma decisão e ao respectivo número de operações de manipulação efectuadas com os modelos, de modo a se obter alguma informação sobre o grau de dificuldade da decisão.

4.4 Resultados

Nesta secção são apresentados os principais resultados obtidos na experiência controlada. Uma análise mais detalhada pode ser encontrada em [Silva05].

4.4.1 Fase 1 – Preferências

Da análise dos dados obtidos nesta fase, foi possível verificar que os observadores demoraram menos tempo a decidir quando confrontados com modelos com um nível de simplificação de 20%. Os estudantes de Radiologia foram, em geral, mais rápidos a decidir do que os estudantes de Engenharia (figura 10).

Para além disso, os observadores do sexo feminino interagiram menos com os modelos antes de tomar a decisão.

Para o nível de simplificação de 20%, os observadores preferiram os modelos simplificados usando o método QSlim (maior número de primeiros lugares) (figura 11). Em segundo lugar ficou o método OMeq seguido do OMeqNF. A Análise de Correspondências apresentada na figura 12 permite observar essa associação.

Para o nível de simplificação de 50%, os resultados não foram tão claros. Como se pode verificar pela análise do gráfico da figura 13, e pela Análise de Correspondências da figura 14, apenas se pode associar o método OMeqNF ao primeiro lugar, não sendo muito clara qualquer outra associação.

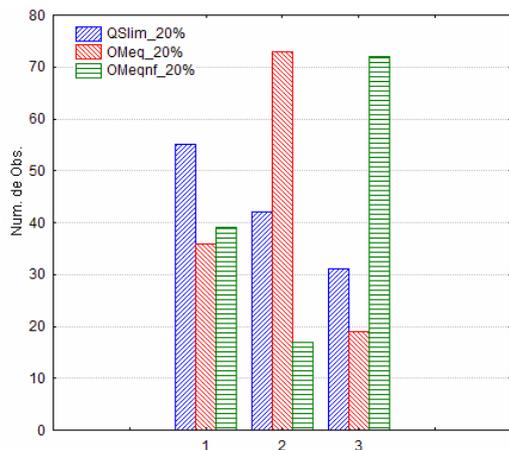


Figura 11 – Gráfico de barras mostrando o número de primeiros, segundos e terceiros lugares atribuídos a cada um dos métodos, para um nível de simplificação de 20%.

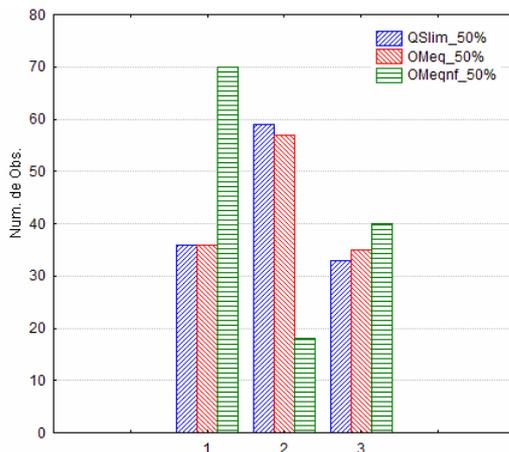


Figura 13 – Gráfico de barras mostrando o número de primeiros, segundos e terceiros lugares atribuídos a cada método para um nível de simplificação de 50%.

4.4.2 Fase 2 – Classificações

Nesta fase voltou a verificar-se que os estudantes de Radiologia decidiram mais depressa que os de Engenharia, e que os observadores do sexo feminino decidiram interagindo menos com os modelos.

Os observadores atribuíram, em geral, melhores classificações aos modelos com um nível de simplificação de 50% (figuras 15 e 16). Para o nível de simplificação de 20% o método OMeqNF é claramente o pior classificado. A análise dos dados desta fase permitiu concluir que os observadores só foram sensíveis ao método utilizado, para um nível de simplificação de 20%, já que as classificações atribuídas para o nível de simplificação de 50% foram muito semelhantes entre os três métodos. A Análise de Correspondências da figura 17 ilustra esse comportamento.

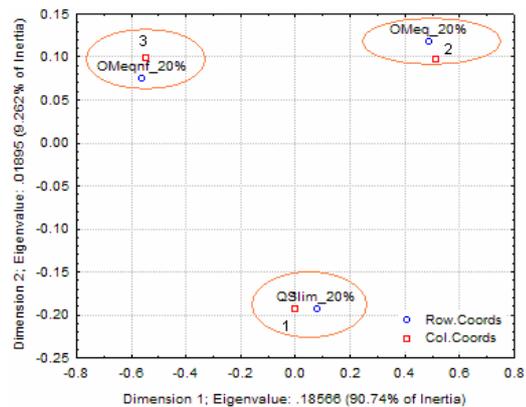


Figura 12 – Análise de correspondências mostrando a associação entre os métodos de simplificação e as preferências para o nível de simplificação de 20%.

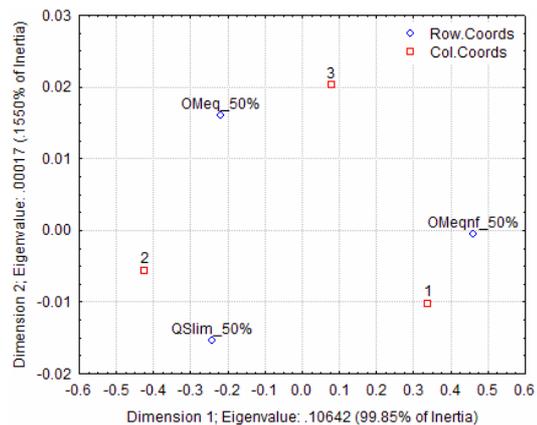


Figura 14 – Análise de correspondências mostrando a associação entre os métodos de simplificação e as preferências para o nível de simplificação de 50%.

4.5 Discussão dos resultados

Na primeira fase da experiência (preferências) foi possível fazer uma ordenação dos métodos de simplificação usados, quanto à qualidade dos modelos por eles produzidos. Essa ordenação não é a mesma para os dois níveis de simplificação. Para o nível de simplificação de 20% o método QSlím foi o preferido, seguido do OMeq e do OMeqNF. Para o nível de simplificação de 50% o preferido foi o método OMeqNF, não sendo muito clara a ordenação dos dois outros métodos.

Na segunda fase (classificações), os resultados não foram tão claros, uma vez que os observadores só se mostraram sensíveis ao método de simplificação para o nível de 20%, tendo o método OMeqNF obtido pior resultado.

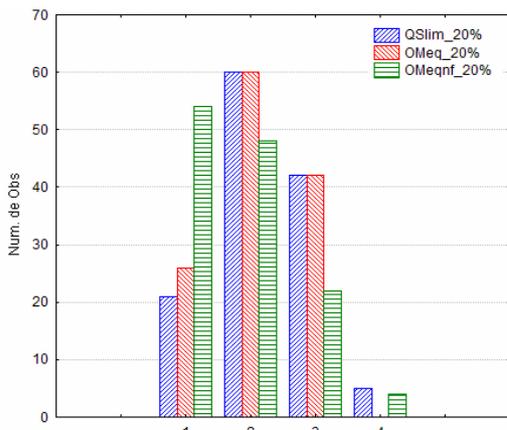


Figura 15 – Gráfico de barras mostrando as classificações atribuídas a cada um dos métodos de simplificação para o nível de simplificação de 20%.

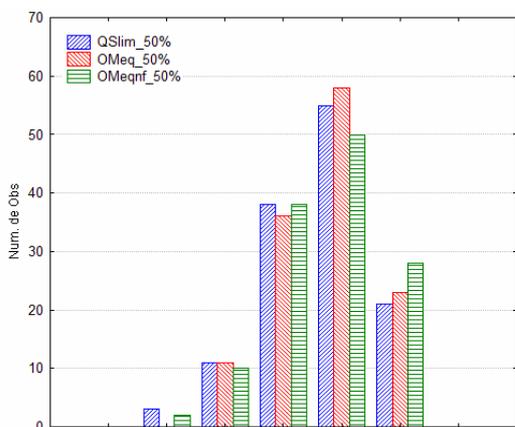


Figura 16 – Gráfico de barras mostrando as classificações atribuídas a cada um dos métodos de simplificação para o nível de simplificação de 50%.

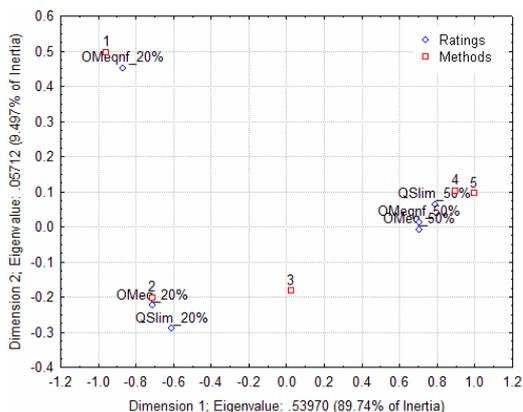


Figura 17 – Análise de correspondências mostrando a associação entre os métodos de simplificação, para ambos os níveis, e as classificações atribuídas pelos observadores.

Para o nível de simplificação de 50% todos os métodos receberam classificações semelhantes.

Resumindo, e tendo em conta as duas fases da experiência, para um nível de simplificação de 20% o melhor método foi o QSlim e para um nível de classificação de 50% o melhor método foi o OMeqNF.

5. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Os índices de qualidade usados, assim como os resultados obtidos da experiência controlada com observadores, permitem classificar a qualidade dos modelos produzidos pelos diferentes métodos utilizados. No entanto, coloca-se a questão de saber se os resultados de ambos os processos de avaliação se relacionam entre si, ou seja, se as medidas quantitativas dos índices vão ao encontro dos resultados qualitativos obtidos com observadores.

Ao efectuar uma comparação entre as Análises de Correspondências das figuras 4 e 5, e as das figuras 12 e 14, onde são mostradas projecções equivalentes para o desvio geométrico médio e para as preferências dos observadores, verifica-se que este índice de qualidade tem um comportamento semelhante ao das preferências dos observadores para um nível de simplificação de 20%.

Se a comparação for efectuada entre as Análises de Correspondências das figuras 6 e 7, e as das figuras 12 e 14, verifica-se que o desvio médio das normais tem um comportamento semelhante ao das preferências dos observadores para o nível de simplificação de 50%.

Estes resultados mostram que o valor médio do desvio geométrico expressa bem a qualidade percebida pelos observadores, quando confrontados com modelos simplificados para 20%. Para o nível de simplificação de 50%, parece ser o valor médio do desvio das normais que melhor exprime a qualidade percebida pelos observadores. Isto pode ser um indício de que estes são mais sensíveis ao desvio geométrico quando confrontados com menos informação, e ao desvio das normais quando confrontados com mais informação.

6. CONCLUSÕES

Neste artigo foi feita uma avaliação da qualidade de diversos modelos simplificados, usando três métodos e dois níveis de simplificação.

Esta avaliação foi executada usando dois processos. O primeiro envolveu a utilização de uma ferramenta que permitiu calcular as diferenças (i.e., os índices de qualidade) das malhas simplificadas, em relação às originais, em termos de características geométricas locais e da variação das normais entre as suas superfícies. O segundo processo consistiu numa experiência controlada com utilizadores em que lhes foi pedido que, usando preferências e classificações, expressassem a sua percepção quanto à qualidade dos modelos simplificados, relativamente aos originais.

Os resultados obtidos, usando estes dois processos de avaliação da qualidade, foram depois comparados, no sentido de se averiguar da existência de algumas semelhanças.

Verificou-se que, nas condições específicas descritas, alguns dos índices de qualidade utilizados (nomeadamente, o valor médio do desvio geométrico e o valor médio do desvio das normais) podem ser usados como estimadores da qualidade das malhas percebida pelos utilizadores.

No entanto, no sentido de poder generalizar os resultados obtidos, torna-se agora necessário efectuar uma experiência similar utilizando modelos de diferente natureza e usando um número mais elevado de observadores, no sentido de conferir maior significância estatística aos resultados. É também interessante aumentar o número de índices de qualidade analisados.

7. AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à Unidade de Investigação 127/94 IEETA, da Universidade de Aveiro, a bolsa que tem permitido a realização do seu trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- [Bartz03] D. Bartz, "Virtual Endoscopy in Research and Clinical Practice", State of the Art Report – EUROGRAPHICS 2003, 2003.
- [Botsch02] M. Botsch, S. Steinberg, S. Bischoff, and L. Kobbelt, "Openmesh - a Generic and Efficient Polygon Mesh Data Structure", *1st OpenSG Symp.*, Darmstadt, Germany, Jan. 2002.
- [Cignoni98] P. Cignoni, C. Rocchini, and R. Scopigno, "Metro: Measuring Error on Simplified Surfaces", *Computer Graphics Forum*, vol. 17, pp. 167-174, 1998.
- [Daniel99] W. W. Daniel, *Biostatistics: a Foundation for Analysis in the Health Sciences*, John Wiley & Sons, 1999.
- [Dix04] A. Dix, J. Finlay, G. Abowd and R. Beale, *Human Computer Interaction*, 3rd ed., Prentice Hall, 2004.
- [Fox05] J. van der Zipp., "FOX TOOLKIT", <http://www.fox-toolkit.org>, (Abril 2005).
- [FSilva04] F. Silva, A. Gomes, "Normal-based simplification algorithm for meshes", *Proc. Theory and Practice of Computer Graphics*, pp. 211-218, 2004.
- [Garland97] M. Garland and P. Heckbert, "Surface Simplification Using Quadric Error Metrics", *Proc. SIGGRAPH '97*, pp. 209-216, Aug. 1997.
- [Johnson98] D. G. Johnson, *Applied Multivariate Methods for Data Analysis*, Duxbury, 1998.
- [Luebke01] D. Luebke, "A Developer's Survey of Polygonal Simplification Algorithms", *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 21, no. 3, pp. 24-35, 2001.
- [Roy04] M. Roy, S. Foufou, and F. Truchetet, "Mesh Comparison Using Attribute Deviation Metric", *Int. Journal of Image and Graphics*, vol. 4, pp. 1-14, 2004.
- [Silva04] S. Silva, J. Madeira e B. Sousa Santos, "Construção e Visualização de Modelos Pulmonares usando Malhas Triangulares", *Actas Interação 2004*, pp. 229-231, Lisboa, Julho 2004.
- [Silva05] S. Silva, B. S. Santos, J. Madeira, and C. Ferreira, "Comparing Three Methods for Simplifying Mesh Models of the Lungs: An Observer Test to Assess Perceived Quality", *Proc. SPIE 2005, vol 5749, Image Perception, Observer Performance, and Technology Assessment*, pp. 484-495, San Diego, Feb. 2005.
- [Valette04] S. Valette and J. Chassery, "Approximated Centroidal Voronoi Diagrams for Uniform Polygonal Mesh Coarsening", *Computer Graphics Forum*, vol. 23, no. 3, pp. 381-389, 2004.
- [Watson01] B. Watson, A. Friedman, and A. McGaffey, "Measuring and Predicting Visual Fidelity", *Proc. SIGGRAPH 2001*, pp. 213-220, 2001.