

Biomodelagem Virtual para Diagnóstico e Planejamento Cirúrgico Usando Softwares Livres

Virtual Biomodeling for Diagnosis and Surgical Planning Using Open-source Software

Resumo: Este trabalho tem por objetivo apresentar uma proposta alternativa à biomodelagem virtual por meio da utilização de *softwares* livres instalados em equipamentos convencionais de informática, contribuindo de forma efetiva para redução dos custos da técnica. Para atingir o objetivo, foi necessário identificar *softwares* livres dedicados e CAD que fossem capazes de serem aplicados em conjunto para desenvolvimento de projetos em biomodelagem. Dentre os programas disponíveis, observou-se que os *softwares* Invesalius 3.0 e FreeCAD 0.11 possuíam as características básicas para aplicação da técnica. Assim, estudos de caso foram abordados em situações de diagnóstico e planejamento cirúrgico, auxiliando o médico na tomada de decisões. Os resultados demonstraram que a biomodelagem virtual através do uso de *softwares* livres, instalados em equipamentos convencionais de informática, é viável para uso na rotina médica em diversas situações de diagnóstico e planejamento cirúrgico. As principais vantagens da presente proposta são a redução dos custos em biomodelagem e a possibilidade de disseminação da técnica, o que facilita a inclusão de um maior número de pacientes submetidos às tecnologias 3D.

Palavras-chave: Biomodelagem. Biomodelos virtuais. Planejamento cirúrgico. *Softwares* livres. Reconstrução 3D.

Abstract: This paper aims to present an alternative proposal to virtual biomodeling by the use of open-source software installed on conventional computer equipment, contributing effectively to cost reduction technique. To achieve the goal, it was necessary to identify software and dedicated free CAD who were able to be applied together to develop projects in biomodeling. Among the available programs showed that the software InVesalius 3.0 and FreeCAD 0.11 had basic characteristics for application technique. Thus, case studies were addressed in situations of diagnosis and surgical planning, assisting the physician in making decisions. The results demonstrated that virtual biomodeling through the use of open-source software such, installed in conventional computing equipment it is feasible for routine use in medical situations in various diagnostic and surgical planning. The main advantages of this proposal are the biomodeling cost reduction and the possibility of spreading technique, which facilitates the inclusion of a greater number of patients subjected to 3D technologies.

Keywords: Biomodeling. Virtual biomodeling. Surgical planning. Open-source software. 3D reconstruction.

SILVA, Francisco da; ROSADO, Victor Orlando Gamarra. Biomodelagem virtual para diagnóstico e planejamento cirúrgico usando *softwares* livres. *Informática na Educação: teoria e prática*, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 125-143, jan./jun. 2014.

Francisco da Silva

Victor Orlando Gamarra Rosado

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

1 Introdução

Biomodelagem é um termo genérico que designa a habilidade de reproduzir as características morfológicas de uma estrutura anatômica em um modelo físico. Atualmente, sua disseminação ainda é limitada em hospitais públicos, centros de saúde e consultórios médicos devido ao alto custo de aquisição de *softwares* proprietários e *hardware* de alto desempenho. Atualmente, médicos tem se baseado em diversos métodos de reconstrução 3D como ferramenta de auxílio na tomada de decisões em casos de diagnóstico e planejamento de cirurgias de alta complexidade (LAVIOLETTE *et al.*, 2011; DELIJAICOV *et al.*, 2010; GOUVEIA, 2009; KABAN *et al.*, 2009).

No passado, este planejamento era elaborado por meio da experiência adquirida pelo cirurgião em atividades de dissecação de ca-

dáveres e em exemplares patológicos cuidadosamente preservados, limitados a algumas poucas peças. No entanto, cada paciente é único e entender de forma precisa a anatomia envolvida no desenvolvimento da doença e sua relação com outras estruturas circunvizinhas exige que o médico realize uma análise criteriosa antes da execução de qualquer procedimento (RAMOS, 2007).

Para aprimorar o entendimento da patologia, estes profissionais recorrem frequentemente a exames radiológicos como Tomografia Computadorizada (TC) e Ressonância Magnética (RM), pois evidenciam os detalhes do acometimento através de imagens 2D (bidimensional). Na prática clínica, o médico analisa cada fatia da seção transversal do segmento examinado e reconstrói mentalmente um modelo 3D (tridimensional).

Baseadas nesta necessidade, muitas empresas de programação desenvolvem *softwares* que, a partir de imagens radiológicas 2D, realizam a reconstrução 3D de estruturas anatómicas, permitindo que a superfície obtida seja editada como um objeto sólido em programas CAD (*Computer Aided Design*).

Esta nova ferramenta computacional permite diagnósticos mais precisos e simulação de técnicas cirúrgicas em ambiente virtual antes de sua real aplicação sobre o paciente. Entretanto, a aplicação destes recursos tem se mostrado inviável no sistema público de saúde e consultórios médicos devido ao alto custo para aquisição da licença dos *softwares* e à necessidade de *hardware* de alto desempenho para processamento das imagens médicas (CORRÊA; BRUST; JESUS, 2010; MEURER *et al.*, 2003; LAJARIN, 2008; YACUBIAN-FERNANDES *et al.*, 2004).

Além dos custos envolvidos, a demanda de tempo para a coleta dos dados biológicos e fa-

bricação do protótipo em centro especializado, dificulta a sua aplicação em procedimentos cirúrgicos de rotina, mesmo quando há indicação médica (MEURER *et al.*, 2008). Como consequência, devido à falta de informações precisas sobre a anatomia da região afetada, a maior parte da população fica sujeita a intervenções cirúrgicas com maiores possibilidades de erros médicos (FOGGIATTO, 2006).

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é apresentar uma proposta alternativa de biomodelagem virtual através do uso de *softwares* livres instalados em equipamentos convencionais de informática e contribuir de forma efetiva para redução dos custos da técnica. Como resultado, espera-se contribuir para a disseminação da biomodelagem na rotina médica e inserir um maior número de pacientes aos benefícios proporcionados por esta tecnologia. Outra contribuição importante é a possibilidade da aplicação dos procedimentos apresentados neste trabalho à educação médica para a formação e capacitação de profissionais da saúde.

Segundo Zem-Mascarenhas e Cassiani (2001), sistemas computacionais aplicados ao ensino são considerados como ferramentas de instrução auxiliada por computador (CAI – *Computer Assisted Instruction*) e oferecem apoio ao estudante no ensino e na solução de problemas profissionais. Recursos de informática têm sido aplicados na educação de médicos, enfermeiros e fisioterapeutas (MELÉNDEZ-ÁLVAREZ, 2009; CARDOSO *et al.*, 2008) pois facilitam a assimilação do conhecimento, enriquecem e ampliam a prática profissional, além de propiciar a redução de custos de formação e capacitação profissional (SANTOS; MERCADO, 2010).

Neste sentido, será realizada uma breve abordagem teórica sobre biomodelagem, processo de obtenção de um biomodelo 3D e o conceito de *softwares* livres. Em seguida, se-

rão apresentados os programas computacionais utilizados e o modelo conceitual desta proposta. Na sequência, descreve-se o procedimento proposto para obtenção dos biomodelos através do uso de *softwares* livres e sua aplicação em três estudos de caso. Para finalizar, são discutidos os resultados e realizadas as considerações finais.

1.1 Biomodelagem

Segundo D'urso *et al.* (1999), biomodelagem é um termo genérico que designa a habilidade de reproduzir as características morfológicas de uma estrutura anatômica em um modelo físico. Especificamente, biomodelamento é empregado para descrever o processo de uso de energia radiante para capturar e processar dados biológicos, com o objetivo de gerar um modelo virtual da anatomia em estudo e convertê-lo em um modelo físico.

O biomodelo é o produto de todo este processo e representa de forma precisa a estrutura biológica do indivíduo (BIBB e WINDER, 2010). Todo o processo de reprodução física do biomodelo pode ser dividido em dois estágios principais: a biomodelagem virtual e a biomodelagem física (ou prototipagem).

Biomodelagem virtual é a etapa responsável pela criação e manipulação de um modelo digital e que tem por objetivo aprimorar a visualização anatômica. Segundo Groesel, Gfoehler e Peham (2009), esta definição também inclui os modelos computacionais manipulados em *software* CAD.

A biomodelagem física, ou mais comumente conhecida como prototipagem, é a fase responsável pela obtenção de um modelo físico, gerado a partir de um processo aditivo construtivo, capaz de reproduzir as características geométricas encontradas no modelo virtual (FERRAZ,

2009; FOGGIATTO, 2006).

Diferentes áreas fazem uso da biomodelagem, incluindo a arqueologia e a paleontologia (FOGGIATTO, 2006), a medicina veterinária (FREITAS, 2008), a odontologia (FALCÓN-ANTENUCCI *et al.*, 2008; MIYASHITA, 2008) e principalmente a área médica (LAVIOLETTE *et al.*, 2011; KABAN *et al.*, 2009).

Na medicina, as indicações mais comuns são para aprimorar o diagnóstico e o planejamento cirúrgico multidisciplinar de patologias complexas situadas na região da cabeça e pescoço. Seu uso é apropriado para casos de neurocirurgia, cirurgia de reconstrução craniomaxilofacial, implantodontia e cirurgias ortopédicas. A técnica é empregada também para a produção de próteses personalizadas, de guias e implantes cirúrgicos (BIBB; WINDER, 2010).

Os benefícios encontrados na literatura referente ao uso de biomodelos para diagnóstico e planejamento cirúrgico referem-se à redução do tempo de realização dos procedimentos operatórios, redução do período de anestesia, do risco de infecção e o número de cirurgias necessárias para obtenção do resultado final, além do custo global de tratamento (FERRAZ, 2009; ANTAS, 2007; PAIVA *et al.*, 2007; ROBIONY *et al.*, 2007).

1.2 Relatos de caso em biomodelagem

A maior contribuição da biomodelagem na medicina se concentra principalmente em situações de diagnóstico preciso e planejamento cirúrgico. Na sequência, é apresentada uma revisão bibliográfica acerca de casos que se basearam em biomodelagem para melhoria dos resultados. Os estudos de caso utilizaram *softwares* proprietários ou não divulgaram os programas aplicados.

Robiony *et al* (2007) relataram o estudo de caso de um paciente portador de microsomia submetido à correção mandibular. A imagem 3D da face do paciente foi reconstruída através dos dados anatômicos provindos de exame radiológico e sobre o biomodelo virtual foi realizado o estudo de ressecção óssea, projeto e posicionamento do distrator sobre a mandíbula (Figura 1). Sobre os modelos, os especialistas analisaram a viabilidade e efeitos de procedimentos operatórios em ambiente virtual, simulando corte e o posicionamento correto da mandíbula. Em seguida, foi projetado em software CAD o distrator para obtenção do melhor movimento mandibular. Através deste trabalho, os autores puderam observar que biomodelagem virtual é uma técnica que auxilia o cirurgião no planejamento de ressecções ósseas, reduz o tempo e custo de operação. Além disso, notaram que a análise virtual possibilita infinitas simulações e permite realizar algumas avaliações que complexas ou impossíveis de se obterem em um modelo físico, como medidas de distâncias, ângulos, volumes, áreas, etc.

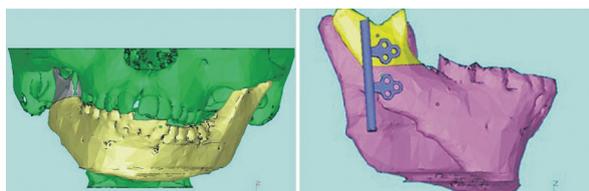


Figura 1. Visão geral da microsomia e simulação de dispositivo distrator
Fonte: Robiony *et al*. (2007).

Yacubian-Fernandes *et al* (2004) apresentam dois casos de cranioplastia onde as falhas ósseas foram submetidas ao exame de TC e as imagens 2D foram reconstruídas tridimensionalmente para obtenção de crânios virtuais (Figura 2a) que deram origem à modelos físicos. Por meio de moldes em cera, os auto-

res construíram próteses em metilmetacrilato transparente e as mesmas foram inseridas sobre a falha óssea no crânio prototipado para analisar seu perfeito encaixe (Figura 2b). No ato cirúrgico, a prótese em metilmetacrilato (Figura 2c) foi fixada sobre a fratura (Figura 3d). As vantagens relatadas pelos autores no uso da técnica são a programação e revisão da estratégia cirúrgica sobre biomodelos virtuais e físicos, confecção de próteses de forma precisa, redução do risco de infecção, redução do tempo cirúrgico em até 41% e melhor resultado estético, além de fornecer maior entendimento ao paciente sobre sua patologia e do procedimento a ser realizado.



Figura 2. Planejamento cirúrgico de cranioplastia: (a) modelo virtual 3D; (b) crânio prototipado com molde da prótese pré-confeccionada; (c) prótese em metilmetacrilato; (d) implantação da prótese
Fonte: Yacubian-Fernandes *et al*. (2004).

D'urso *et al* (1999) utilizaram a biomodelagem para diagnóstico e planejamento cirúrgico de pacientes portadores de patologia vascular cerebral submetidos à exame angiografia (TC e/ou RM) para reprodução física de biomodelos (Figura 3). Segundo relatos dos cirurgiões, através dos biomodelos virtuais e físicos na fase pré-cirúrgica, foi possível compreender de forma mais clara a posição dos aneurismas cerebrais perante outras estruturas. Além de maior compreensão, os biomodelos proporcionaram eleger o melhor posicionamento da cabeça do paciente para o ato cirúrgico, simular o corte operatório ideal e aperfeiçoou o entendimento do paciente com relação à sua patologia. As desvantagens da técnica, segundo os

autores, são os custos e o tempo de manufatura do protótipo físico.

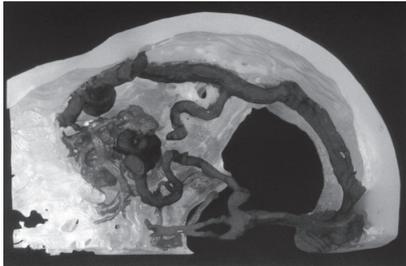


Figura 3. Visão de topo de má-formação arteriovenosa e sua relação com outras estruturas
Fonte: D'urso *et al.* (1999).

Paiva *et al.* (2007) apresentam um estudo de caso de paciente portador de sarcoma de Ewing (uma forma de lesão tumoral óssea) onde foi aplicada a técnica de biomodelagem para auxílio no diagnóstico e planejamento de cirurgia da coluna (Figura 4). Antes do procedimento cirúrgico, foram realizadas simulações sobre o biomodelos virtual e físico para adoção da melhor estratégia e o modo como seriam feitas as fixações ósseas. Os autores afirmam que o treinamento prévio sobre o biomodelo propiciou um melhor preparo técnico para o cirurgião, analisando de melhor forma a extensão da lesão e avaliando as dimensões ideais para o sistema de placa fixadora. A simulação reduziu as chances de aparecimento de intercorrências durante a cirurgia e auxiliou o cirurgião na tomada de decisões.

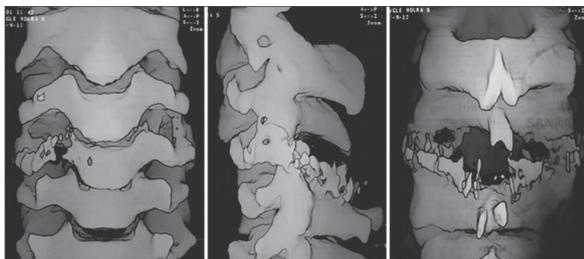


Figura 4. Reconstrução 3D da coluna vertebral apresentando lesão osteolítica na região cervical
Fonte: Paiva *et al.* (2007).

1.3 Processo de obtenção de um biomodelo

I. Aquisição de imagens do paciente

A morfologia do paciente é obtida através de exames de imagens médicas como TC e RNM. Estes são conhecidos como os dois melhores métodos para aquisição de informações para diagnóstico e planejamento cirúrgico (WINDER; BIBB, 2005; LAJARIN, 2008; BIBB; WINDER, 2010).

No processo de aquisição de dados, o paciente é submetido ao exame radiológico para varredura da região acometida, que produz uma sequência de imagens baseadas nas seções transversais do tecido analisado. Após a obtenção das imagens 2D, os dados deverão ser exportados em formato DICOM (*Digital Imaging Communications on Medicine*) e enviadas à estação de trabalho informatizada para segmentação das imagens e criação do modelo 3D virtual.

II. Segmentação das imagens e obtenção do biomodelo 3D virtual

Segmentação é o processo de separação das estruturas que deverão ser representadas no biomodelo das estruturas indesejáveis (MEURER *et al.*, 2008). Este processo se inicia com a importação dos arquivos DICOM em um *software* dedicado.

A ferramenta *threshold* é frequentemente utilizada para executar o processo de segmentação de imagens. O *threshold* é um algoritmo computacional que segmenta as estruturas de forma automática, baseando-se na definição de intervalos de densidade de cinza que expressem somente os *pixels* que correspondam ao tecido de interesse. O objetivo principal é identificar os *pixels* que pertençam a uma determinada estrutura (Figura 5), que resultará

na identificação de cada tecido através de uma imagem mapeada (MEURER *et al*, 2008; BAZAN, 2004; POMPEI *et al*, 2002).

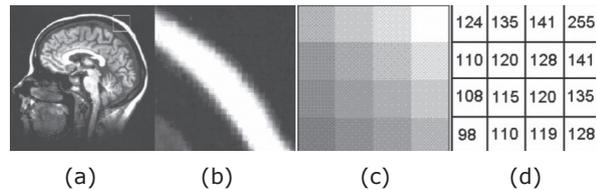


Figura 5. Classificação dos limares de cinza: (a) imagens de RM; (b) zoom na área óssea indicada em (a); (c) pixels da área aproximada; (d) quadro com níveis de cinza e seus respectivos valores numéricos
 Fonte: Santa-Bárbara (2006).

Se a segmentação automática não retornar o resultado esperado, pode ser necessário editar as imagens de forma manual. Recorre-se a este procedimento quando a região de interesse possui estruturas pouco diferenciadas ou quando há a presença de artefatos metálicos como próteses, implantes ou restaurações dentárias (MEURER *et al*, 2008). Após a segmentação, o *software* dedicado de reconstrução 3D reconhece em cada fatia as áreas definidas pelo operador e a partir do empilhamento destas uma sobre a outra, gera o modelo virtual que será referência para o modelo sólido.

A transição da superfície 3D para ambiente CAD é feita através da exportação dos dados em formato STL (*Standard Triangulation Language*) para execução da fase de projeto. Por fim, após a edição do biomodelo virtual em *software* CAD, o modelo é exportado no formato STL para a máquina de prototipagem rápida, onde será confeccionado o protótipo físico (WINDER e BIBB, 2005; MEURER *et al*, 2008; BIBB e WINDER, 2010).

III. Construção do biomodelo físico através da prototipagem rápida

A prototipagem rápida aplicada à medicina é

definida como a manufatura de modelos físicos da anatomia humana derivada de imagens médicas (WINDER e BIBB, 2005; BIBB e WINDER, 2010).

A prototipagem rápida é um processo aditivo, onde camadas de papel, cera ou plástico são “empilhadas” para se criar um objeto sólido 3D. O biomodelo virtual é refatiado em camadas paralelas dispostas uma sobre a outra, com aproximadamente 0,1 mm de espessura. Assim, curvas de níveis 2D são obtidas, informando à máquina quais locais deverão receber o material de construção. Cada camada é processada sequencialmente e rebaixadas de nível através de um elevador vertical, reproduzindo a peça a partir de sua base até o topo (ULBRICH, 2007; ROSA; OLESKOVICZ; ARAGÃO 2004; GORNI, 2001; PETZOLD; ZEILHOFER; KALENDER, 1999).

Apesar da praticidade, a prototipagem rápida não é perfeita. Entre as desvantagens, encontra-se a limitação para construir protótipos com volumes superiores a 0,125 m³, o alto custo de aquisição e de manutenção da máquina e a dificuldade em se obter protótipos de metal. Em se tratando de modelos de metal, as técnicas convencionais de usinagem ainda são mais econômicas que as de prototipagem rápida (CHOI; CHAN, 2004; GORNI, 2001).

1.4 Softwares livres

O *software* livre é uma modalidade de programa computacional que possui permissão aberta para uso, cópia e distribuição em sua forma original (ou modificado pelo usuário), podendo ser redistribuído com ou sem custo (MASSARENTI Jr, *et al*, 2006). O conceito faz uso de nova forma de produção de conhecimento, na qual desenvolvedores independentes e espalhados pelo mundo cooperam para

o crescimento do *software*, resultando em programas mais robustos e que evoluem rapidamente. Estas particularidades se devem ao compartilhamento e interação de ideias entre os programadores, bem como com os usuários destes *softwares* (MEIRA JUNIOR, 2005; DOMINGUES; MENDES Jr, 2003).

Segundo a *Free Software Foundation* (FSF), para ser considerado livre, o *software* deve cumprir os seguintes requisitos:

- Liberdade de execução do programa para qualquer finalidade.
- Liberdade de estudar o funcionamento do programa e adaptá-lo às necessidades do usuário (deve haver a disponibilização de seu código-fonte).
- Liberdade para redistribuição do programa.
- Liberdade para aperfeiçoamento do programa e posterior liberação das melhorias, de modo que todos se beneficiem.

Segundo Agostinho *et al* (2006), as principais vantagens do uso de *softwares* livres em relação aos proprietários é a possibilidade de atualizá-lo sem custo algum e a redução da necessidade de atualização ou reposição de *hardware* quando se instala novas versões. Essas características permitem que equipamentos com configurações modestas executem os *softwares* livres com eficácia.

2 Metodologia

O grande desafio deste trabalho reside na conversão das informações contidas em imagens médicas geradas por equipamentos radiológicos para sistemas CAD, onde as mesmas possam ser editadas. No momento, sistemas CAD não são capazes de realizar reconstruções 3D a partir de arquivos DICOM, nem de processar este tipo de dados. Esta barreira implica na

necessidade de execução de etapas de processamento de tais informações para converter a imagem 2D em uma superfície 3D editável em *software* CAD.

Para atingir a conversão de dados desejada, torna-se necessário identificar *softwares* livres capazes de extrair e processar as informações contidas nos exames de imagens médicas e convertê-las em modelos 3D para exportação. Para completar a transposição de dados, é importante também encontrar *software* livre CAD capaz de importar modelos médicos no formato apropriado e que possua ferramentas básicas para execução do projeto médico. De acordo com os objetivos por este trabalho, foi utilizado equipamento convencional de informática para processamento de imagens e edição do biomodelo, como mostrado no Quadro 1.

Item	Descrição
Processador	Intel Centrino Core 2 Duo
Memória RAM	3 Gb DDR2
Hard Disk (HD)	250 Gb
Placa de vídeo	Intel Express Chipset

Quadro 1. Descrição do *hardware* utilizado

Diversos *softwares* livres dedicados ao processamento de imagens médicas e programas CAD foram testados. Os motivos para exclusão destes *softwares* para aplicação neste trabalho foi a impossibilidade de se trabalhar com biomodelos, ausência de ferramentas básicas para adequação da geometria ao projeto médico e inviabilidade de importação/exportação do modelo em formatos específicos.

Dentre os *softwares* analisados, o Invesalius 3.0 (sistema dedicado) e o FreeCAD 0.11 (sistema CAD) foram identificados como os *softwares* livres mais aptos para realização dos objetivos deste trabalho. A partir dos referidos *softwares*, desenvolveu-se um mode-

lo conceitual que tem por objetivo esclarecer de forma abrangente as bases para execução de um projeto em biomodelagem, tornando-o aplicável em diversos casos da rotina médica. Os procedimentos sugeridos para realizar a reconstrução de biomodelo 3D a partir de imagens de TC podem ser seguidos para gerar biomodelos a partir de exames de RNM.

O modelo conceitual foi dividido em duas principais etapas: (1) reconstrução do biomodelo 3D e (2) projeto em *software* CAD (Figura 6).

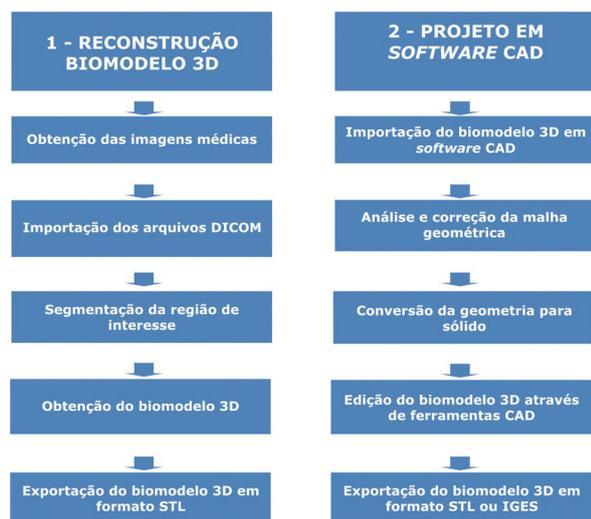


Figura 6. Sequência de atividades para obtenção de um biomodelo 3D segundo o método proposto

2.1 Reconstrução do biomodelo 3D

I. Obtenção das imagens médicas

Para execução do exame radiológico, há diferentes protocolos de aplicação que variam de acordo com o objetivo médico final. Se a meta for a reprodução física do segmento em estudo, o técnico de radiologia deve executar o protocolo para prototipagem rápida, que é

ligeiramente diferente do protocolo para diagnóstico. Um exemplo de protocolo para prototipagem rápida é apresentado por Anatomics (2011).

A execução do exame do radiológico fornece um conjunto de arquivos DICOM referente às seções transversais do segmento tomografado. Estes dados devem ser gravados em CD-ROM (*Compact Disc – Ready Only Memory*) e transferidos para o computador convencional.

II. Importação dos arquivos DICOM

A pasta contendo o conjunto de arquivos DICOM, deve ser importada no *software* Invesalius 3.0. Neste processo, os dados referentes à anatomia do paciente serão carregados, possibilitando a segmentação das imagens médicas.

III. Segmentação da região de interesse

A segmentação das imagens médicas consiste em separar de forma automática ou manual, a área de estudo de estruturas adjacentes indesejadas. Os tecidos de interesse deverão ser diferenciados dos demais através da aplicação de máscaras de segmentação, a partir do qual será gerada a superfície 3D (Figura 7).

O *software* Invesalius 3.0 oferece algumas ferramentas para edição de máscaras. A principal delas é a indicação pelo usuário do intervalo de valor de cinza correspondente à estrutura de segmentação desejada. A partir destes dados, o programa é capaz de separar todos os *pixels* que atendam a esta exigência, diferenciando a anatomia em estudo das demais.

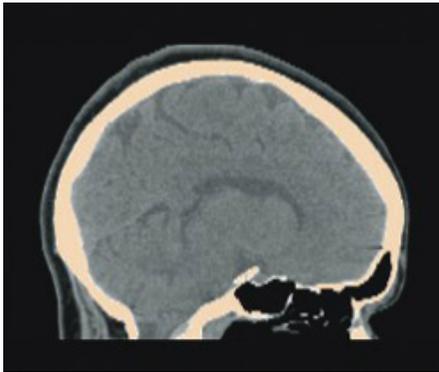


Figura 7. Visualização de biomodelo na janela de volume após reconstrução 3D

IV. Obtenção do biomodelo 3D

Para obtenção da superfície anatômica, cada máscara definida anteriormente será utilizada como base para a reconstrução 3D. Através de algoritmos, o Invesalius 3.0 é capaz de extrair os contornos definidos pelo usuário por meio da máscara de segmentação, processando todas as seções transversais existentes. O resultado é a obtenção de uma superfície 3D que representa fielmente as estruturas anatômicas definidas pela máscara (Figura 8).

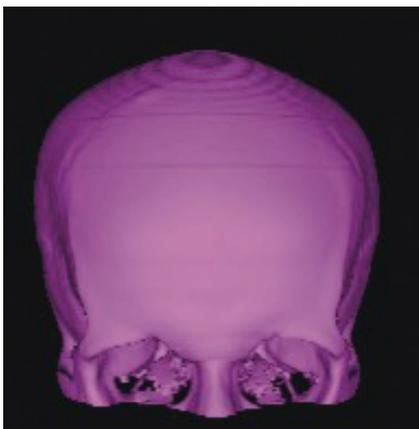


Figura 8. Visualização de biomodelo na janela de volume após reconstrução 3D

V. Exportação do biomodelo 3D em formato STL

Os biomodelos 3D gerados devem ser exportados no formato STL para finalização do projeto em *software* CAD ou ainda para máquina de prototipagem rápida. Segundo Kang (2009), este tipo de arquivo não compromete a geometria original.

2.2 Projeto em software CAD

I. Importação do biomodelo 3D em *software* CAD

Para início da fase de projeto em *software* CAD, da geometria 3D em formato STL deve ser importada no *software* FreeCAD 0.11. Em seguida, serão realizadas análises de sua superfície e edições no biomodelo.

II. Análise e correção da malha geométrica

Nas fases de segmentação e reconstrução 3D, assim como na importação da geometria no *software* CAD, podem surgir imperfeições na superfície do biomodelo. O *software* possui ferramentas capazes de varrer a superfície em busca dos defeitos de faces e corrigi-los de forma automática ou manual.

III. Conversão da malha em sólido

A aplicação da ferramenta de conversão da geometria estrutura de malha para sólida permite que a superfície se torne uma entidade sólida prontamente editável, preparando-a para ser submetida à aplicação de diversas ferramentas CAD.

IV. Edição do biomodelo 3D através de ferramentas CAD

Com o modelo sólido, diversas operações podem ser realizadas para adequação da geometria ao projeto desejado. Através das ferra-

mentas disponíveis no *software* CAD, poderão ser realizadas simulações de procedimentos cirúrgicos, confecção de próteses e desenvolvimento de guias e implantes cirúrgicos.

V. Exportação do biomodelo 3D em formato STL

Finalizada a fase de projeto, o modelo virtual pode ser exportado em formato STL, disponibilizando-o para a máquina de prototipagem rápida ou para outros *softwares* CAD mais robustos através das extensões IGS e STP.

3 Estudos de caso

Através do processo apresentado para obtenção de biomodelos 3D proposta, serão apresentados três estudos de caso provenientes de diferentes áreas da medicina.

3.1 Estudo de caso I: Aneurisma da Aorta Abdominal

O Aneurisma da Aorta Abdominal (AAA) é uma dilatação anormal da artéria aórtica em sua porção abaixo do diafragma (ARAÚJO JÚNIOR; RODRIGUES, 2003). Neste estudo de caso, o objetivo da reconstrução 3D consiste em reproduzir virtualmente o AAA e o sistema esquelético do paciente para que seja avaliada a localização e determinadas às dimensões da anomalia vascular. Para o médico, estas informações serão úteis na elaboração do diagnóstico e na definição da necessidade de procedimento cirúrgico.

Para obtenção dos biomodelos, as 268 imagens da seção transversal da região abdominal produzidas por TC foram importadas no *software* Invesalius 3.0. O vaso aórtico e a estrutura

esquelética foram segmentados através do uso de máscaras de segmentação e os biomodelos produzidos foram exportados em formato STL para o *software* FreeCAD 0.11 (Figura 9).

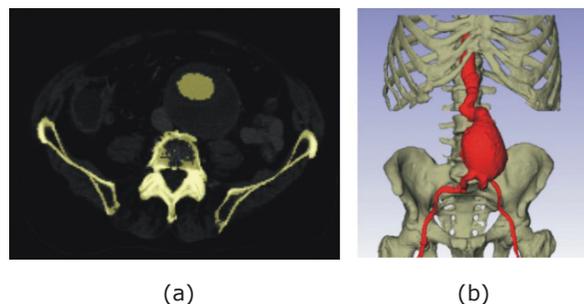


Figura 9. Segmentação das estruturas anatômicas e reconstrução 3D

Para fins de diagnóstico, foram realizadas medidas para determinação dos diâmetros do aneurisma e do vaso aórtico. Na Figura 10, observa-se o biomodelo da placa de coágulo (em vermelho) e a luz do vaso para passagem sanguínea na região do aneurisma (em verde).

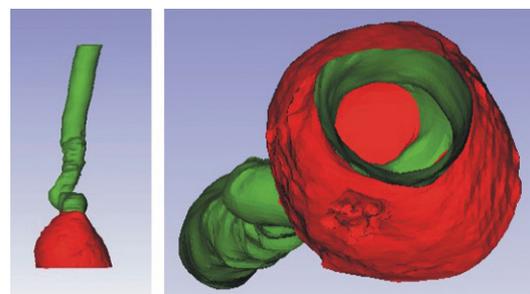


Figura 10. Visualização inferior interna do aneurisma

A ferramenta de dimensão também foi aplicada para identificar o diâmetro logo acima do aneurisma e nas artérias ilíaca direita e ilíaca esquerda. Estas informações auxiliam o médico na escolha do número de uma possível prótese vascular. Após a obtenção das medidas dos diâmetros, as superfícies 3D foram exportadas em formato STL.

3.2 Estudo de caso II: Câncer de Palato

O Câncer de Palato é um tumor maligno que acomete a fina camada óssea do crânio situada entre cavidade bucal e a porção nasal da faringe.

Neste caso, o objetivo principal é reconstruir biomodelos 3D do crânio e do maxilar para aprimoramento do diagnóstico dos danos causados pela doença e para elaboração do planejamento de ressecção cirúrgica. Pretende-se reproduzir uma prótese virtual para possível previsão dos resultados cirúrgicos.

Para reconstruir os biomodelos 3D, foram criadas máscaras de segmentação com o intuito de distinguir os diferentes tipos de tecidos. A máscara de segmentação para o crânio e os biomodelos gerados são apresentados na Figura 11.

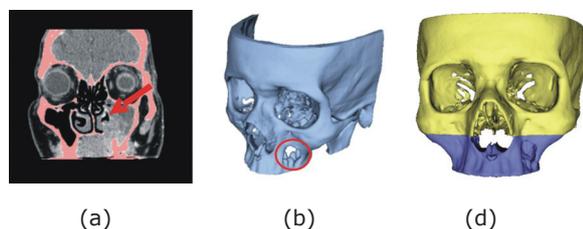


Figura 11. (a) Máscara para segmentação craniana; (b) reconstrução 3D do crânio e falha óssea provocada pelo câncer; (c) divisão do crânio

Para reduzir a quantidade de dados a serem processados, foi realizada uma divisão no biomodelo craniano separando-o em porção maxilar e porção média/superior (Figura 9c). Este procedimento permitiu aplicar as ferramentas de edição somente no biomodelo de interesse, ou seja, aquele que seria submetido à cirurgia. Após a reconstrução 3D, os biomodelos foram exportados em formato STL para disponibilização em *software* CAD.

No FreeCAD 0.11, os biomodelos foram importados e submetidos à análise de malha para verificação e reparo das superfícies e em seguida o biomodelo da região maxilar foi submetido ao processo de conversão de malha para sólido. Em ambiente CAD, o cirurgião pode avaliar os danos provocados pela patologia, analisar o melhor procedimento cirúrgico e simular a ressecção tumoral. A demarcação espacial realizada diretamente sobre o biomodelo 3D determinou a forma de como o corte cirúrgico seria realizado para a extração óssea (Figura 12).

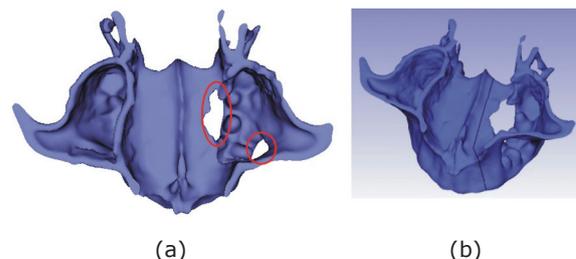


Figura 12. (a) Identificação das lesões e (b) demarcação da ressecção óssea

Após determinar a forma de ressecção cirúrgica, o biomodelo foi cortado através de operação booleana, eliminando-se a superfície lesada (Figura 9a). A porção saudável do biomodelo foi espelhada para planejar uma possível prótese personalizada para o paciente (Figura 9b). Em seguida, os biomodelos do crânio em sua porção média/superior, maxilar completo e a geometria espelhada foram alinhados no espaço para determinar a melhor posição da prótese em relação às estruturas ósseas adjacentes (Figura 13c).

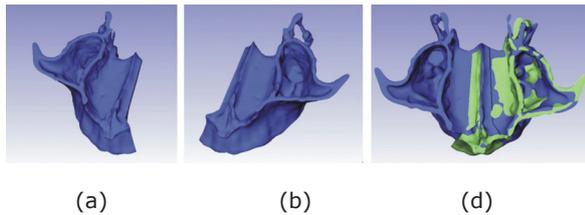


Figura 13. (a) Ressecção da região tumoral;
 (b) espelhamento da porção saudável;
 (c) alinhamento das estruturas para posicionamento da prótese

Do realinhamento de estruturas, pode-se determinar a geometria final da prótese (Figura 14a). Operações booleanas de união foram efetuadas para gerar previsões do resultado cirúrgico pós-ressecção (Figura 14b) e implantação da prótese para correção da falha óssea (Figura 14c).

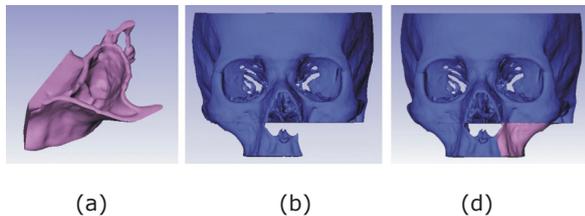


Figura 14. Previsão da prótese personalizada para o paciente

Todos os biomodelos virtuais produzidos foram exportados em formato STL, IGS e STP para disponibilizá-los para prototipagem rápida ou importação em outros *softwares* CAD.

3.3 Estudo de caso III: Meningioma

O estudo de caso III baseia-se no diagnóstico e planejamento cirúrgico de um paciente portador de Meningioma (tumor da meninge). O objetivo computacional deste caso consiste em reconstruir biomodelos 3D que represen-

tem o crânio, o tumor e a pele do paciente. Deseja-se ainda identificar o melhor acesso ao tumor e simular a craniotomia, utilizando a porção óssea extraída no processo cirúrgico virtual como estrutura para fechamento do crânio.

As imagens geradas por equipamento de TC da cabeça foram importadas no *software* Invesalius 3.0 para segmentar e reconstruir as estruturas desejadas.

Através das imagens médicas 2D, foram determinadas máscaras individuais de segmentação para representar a região acometida. Cada máscara definida por meio dos limiares de cinza das estruturas deu origem às superfícies 3D do crânio, tumor e pele. Estes foram exportados para o *software* FreeCAD 0.11 para realização da fase de projeto (Figura 15).

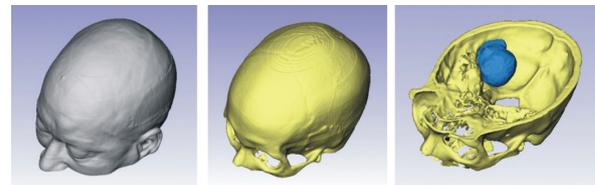


Figura 15. Biomodelos 3D da pele, crânio e tumor

Os biomodelos foram submetidos ao processo de análise e correção de malhas. Em seguida, a porção craniana relacionada à área do tumor foi convertida em sólido para aplicação de ferramentas de edição e simulação da craniotomia.

Através da visualização privilegiada fornecida pela ferramenta de transparência (Figura 14a), o neurocirurgião pode avaliar a melhor via de acesso ao tumor e indicar a região de craniotomia. Esta orientação técnica possibilitou simular a ressecção óssea (Figura 16b e 16c).

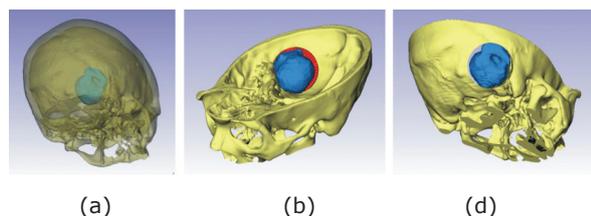


Figura 16. Aplicação da ferramenta de transparência; (b) determinação do local de ressecção óssea; (c) simulação ressecção óssea

Após a ressecção óssea virtual, a região extraída pôde ser reutilizada como prótese para cobertura da falha. Fixadores foram projetados no FreeCAD 0.11 para unir a prótese à calota craniana. Devido a esta funcionalidade, diversos dispositivos mecânicos e implantes médicos podem ser desenvolvidos no FreeCAD 0.11 e utilizados na predição de resultados cirúrgicos (Figura 17).

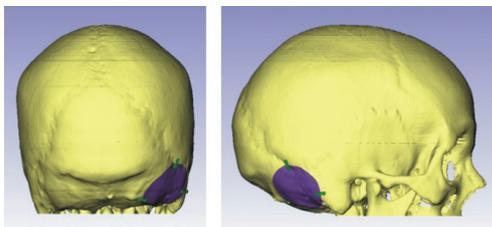


Figura 17. Predição de resultados para craniotomia

4 Discussão

Para eleger os *softwares* livres a serem empregados neste trabalho, observou-se que os programas InVesalius 3.0 e o FreeCAD 0.11 atendem aos requisitos necessários básicos para aplicação em projetos de biomodelagem. O InVesalius 3.0 permite a importação de imagens médicas 2D no formato DICOM e a exportação do biomodelo 3D em STL. Por sua vez, o FreeCAD 0.11 possui a capacidade de importar geometrias em STL, analisar e corrigir malhas,

converter malha em sólido, aplicar operações booleanas e ainda exportar a geometria em formato STL para máquina de prototipagem rápida ou IGS/STP para uso em outros *softwares* CAD mais poderosos.

As principais dificuldades relacionadas ao desenvolvimento dos estudos de caso referem-se ao alinhamento de biomodelos perante outras estruturas 3D, à segmentação manual fatia-a-fatia e à edição de geometrias 3D de grandes dimensões.

Pelo fato da face não ser simétrica, a previsão de prótese do estudo de caso II (Câncer de Palato) não apresentou um perfeito alinhamento com o maxilar saudável. Isso resultou em uma diferença de 3 mm entre a porção posterior do palato e a prótese. Segundo o cirurgião, por ser muito discreta, esta pequena desigualdade não gera comprometimentos funcionais nem alterações estéticas visíveis.

A segmentação manual através de fatias individuais apresentou bons resultados finais, apesar de ser um processo demorado para o segmentador.

Para edição de biomodelos de grandes dimensões, como aquele utilizado no estudo de caso II, houve a necessidade de dividi-los em geometrias menores para reduzir a carga de processamento computacional.

No estudo de caso I (AAA), notou-se que foi possível obter as medidas de diâmetros do aneurisma aórtico abdominal (7,5 cm), e da luz do vaso nesta região (3,5 cm). A determinação dos diâmetros da aorta logo acima ao aneurisma e das artérias ilíacas, direita e esquerda, auxiliam na identificação do número da prótese que deverá ser usada por este paciente em caso de cirurgia. Uma má determinação do número da prótese pode acarretar prejuízo financeiro, uma vez que a mesma não poderá ser implantada no paciente.

A predição de resultados cirúrgicos foi efetuada através da presente proposta. No estudo de caso II, através do biomodelagem das estruturas craniofaciais e da simulação de ressecção do tumor ósseo, pode-se estimar a falha anatômica que seria produzida no paciente e quais as consequências estéticas e funcionais que poderiam ser desenvolvidas. A predição de resultados coopera para auxiliar o paciente a entender seu caso e o médico no planejamento da menor lesão possível (Figura 18).

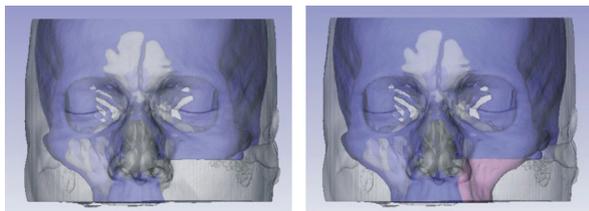


Figura 18. Previsão dos resultados estéticos para o período pós-cirúrgico, com e sem prótese

Um problema comum que surge do planejamento cirúrgico baseado em imagens 2D é a precisão da localização da anatomia a ser operada. Segundo cirurgiões, às vezes ocorre de se realizar o corte cirúrgico e, ao visualizar o corpo internamente, observa-se que a estrutura de interesse não está exatamente no local onde se previa, exigindo aumentar a incisão, o que acarreta maior trauma ao paciente.

No estudo de caso III, este problema pode ser minimizado através da aplicação de transparência nos biomodelos 3D, que permite o cirurgião analisar e determinar o melhor local para realizar a ressecção óssea. Como consequência desse procedimento, foi possível eleger o correto posicionamento do paciente sobre a mesa cirúrgica e a melhor área sobre a pele para realizar a incisão (Figura 19).

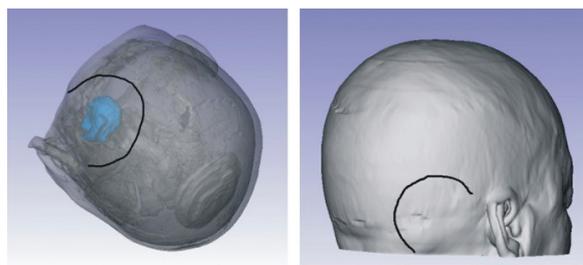


Figura 19. Determinação da melhor posição da cabeça do paciente na mesa cirúrgica e da área de incisão sobre a pele

Na prática médica, a maior contribuição do uso de biomodelos 3D virtuais está relacionada à identificação da forma patológica, localização espacial e à interação da estrutura acometida com outros tecidos. Quanto maior o número de informações disponíveis sobre o estado da doença e a região que a cerca, menores são as chances de intercorrências e maior a probabilidade de sucesso médico.

Além de aprimorar a visualização, os biomodelos produzidos por este método podem ainda serem utilizados como ferramenta de comunicação técnica entre o cirurgião e sua equipe médica, esteja este presente ou distante. Os biomodelos podem ser enviados por e-mail para que outros especialistas possam contribuir para o sucesso cirúrgico.

Em relação aos *softwares* livres utilizados, é importante destacar que, pelo fato de estes possuírem código aberto, há a oportunidade de incorporação de novas ferramentas no programa, adaptando-o aos processos de biomodelagem. Além disso, os *softwares* livres não exigiram aquisição de equipamentos computacionais de alto custo, pois os referidos *softwares* podem ser executados em máquinas convencionais e por consequência, em hospitais e consultórios médicos.

Outras aplicações da presente proposta também são viáveis. Entre elas, cita-se sua

utilização na formação acadêmica de diversos profissionais da saúde, seja através de computadores ou por meio de sistemas imersivos de realidade virtual, produção de próteses e implantes personalizados, elaboração de acervo institucional ou pessoal para patologias raras e complexas que poderão ser registradas de forma 3D e armazenadas para consultas futuras.

A utilização de biomodelos 3D para o ensino de anatomia e patologia em universidades também é uma oportunidade para aplicação dos procedimentos propostos. Em cursos de saúde como medicina, enfermagem, fisioterapia entre outros, é de grande valia a complementação das aulas de laboratório com a utilização de biomodelos 3D provindos de pacientes reais, saudáveis ou não. Atividade como a visualização do órgão em mãos e a sua reprodução em ambiente virtual podem reforçar o aprendizado do aluno.

Exercícios como dissecação de órgãos, o que frequentemente não é possível à todos os cursos de saúde, torna-se viável e de baixo custo quando utilizado de forma virtual, aumentando a interação do aluno com a identificação das estruturas anatômicas. É louvável ainda a utilização de biomodelos 3D dentro da sala de aula, onde, através de equipamentos de projeção, os alunos possam "viajar" dentro dos órgãos do corpo humano.

Outras áreas distintas podem-se utilizar da presente proposta como a arte para reprodução de objetos, a paleontologia e arqueologia para reconstrução 3D de fósseis e materiais históricos, o cinema e os games para criação de personagens.

A principal desvantagem apresentada pela proposta é a alta demanda de tempo para

processamento de biomodelos 3D de grandes dimensões no programa FreeCAD 0.11. No entanto, computadores mais atuais e com maiores capacidades de processamento podem não apresentar este tipo de problema.

5 Considerações finais

Após a execução deste trabalho, observou-se que os programas Invesalius 3.0 e FreeCAD 0.11 podem ser utilizados na rotina médica para realização de projetos em biomodelagem para fins de diagnóstico e planejamento cirúrgico, pois atendem os requisitos básicos para construção e edição de biomodelos 3D. Estes *softwares* dispensam a aquisição de *hardware* de alto desempenho e contribuem de forma significativa para a redução dos custos e disseminação da técnica.

Devido à acessibilidade aos recursos computacionais, a utilização da presente proposta pode ir além dos consultórios médicos. Aplicações no ensino de anatomia para estudantes do ensino médio e universitários de cursos como medicina, enfermagem e fisioterapia, promovem melhor assimilação do novo conhecimento e permite ao estudante trafegar entre o mundo real e o virtual do corpo humano.

Como continuidade para este trabalho, sugere-se estudos para validação dimensional entre imagens 2D e biomodelos virtuais e reais gerados a partir do uso em conjunto dos *softwares* Invesalius 3.0 e FreeCAD 0.11. Pode-se ainda pesquisar os efeitos da aprendizagem na formação médica quando associadas as técnicas convencionais de ensino em anatomia e patologia com o uso de tecnologias 3D.

Referências

AGOSTINHO, L. N. U. *et al.* Softwares livres no ensino de engenharia: uma atitude socialmente justa, economicamente viável e tecnologicamente sustentável. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 34, 2006, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2006. Disponível em: <http://www.dee.ufma.br/~fsouza/anais/arquivos/4_170_438.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2010.

ANATOMICS (Austrália). **Downloads.** Disponível em: <<http://www.anatomics.com/content/default.aspx?cat=4&sub=38>>. Acesso em: 03 jun. 2011.

ANTAS, A. F. F. **Utilização das tecnologias de prototipagem rápida na área médica.** 2007. 130 f. Dissertação (Mestrado em Design Industrial) – Escola Superior de Artes e Design de Matosinhos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007.

ARAÚJO JÚNIOR, F. L.; RODRIGUES, C. Aneurismas de aorta abdominal. In: PITTA, G. B. B.; CASTRO, A. A.; BURIHAN, E. **Angiologia e cirurgia vascular: guia ilustrado.** Maceió: UNCISAL/ECMAL & LAVA, 2003, p. 1-5. Disponível em: <<http://www.lava.med.br/livro>>. Acesso em: 05 jun. 2011.

BAZAN, O. **Usinagem de prótese para cranioplastia a partir de imagens tomográficas.** 2004. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

BIBB, R.; WINDER, J. A review of the issues surrounding three-dimensional computed tomography for medical modelling using rapid prototyping techniques. **Radiography**, v.16, n.1, p.78-83, fev. 2010.

CARDOSO, J. P. *et al.* Construção de uma práxis educativa em informática na saúde para ensino de graduação. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 13, n. 1, p. 282-288, 2008.

CHOI, S. H.; CHAN, A. M. M. A virtual prototyping system for rapid product development. **Computer-Aided Design**, v. 36, n. 5, p. 401-412, abr. 2004.

CORRÊA, A. P. S.; BRUST, A. W. A.; JESUS, G. P. Prototipagem rápida: um método auxiliar no tratamento de ameloblastoma – relato de caso. **Revista de Odontologia da UNESP**, Araraquara, v. 39, n. 4, p. 247-254, jul./ago. 2010.

DELIJAICOV, F. *et al.* Tratamento de fratura mandibular cominuta ocasionada por projétil de arma de fogo. **Revista Brasileira de Cirurgia Buco-Maxilo-Facial**, v. 10, n. 1, p. 69-76, 2010.

DOMINGUES, M. O.; MENDES Jr. O. Introdução a programas físico-matemáticos livres. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, p. 148-156, jun. 2003.

D'URSO *et al.* Cerebrovascular biomodelling: a technical note. **Surgical Neurology**, v. 52, n. 5, p. 490-500, nov. 1999.

FALCÓN-ANTENUCCI, R. M. *et al.* Avaliação das tensões na interface implante/coroa. **Revista de Cirurgia e Traumatologia Buco-Maxilo-facial**, v. 8, n. 3, p. 49-56, jul./set. 2008.

FERRAZ, E. G. **Efeito do processamento de reconstruções tridimensionais virtuais para confecção de biomodelos de prototipagem rápida:** estudo experimental em mandíbulas secas humanas. 2009. 81 f. Dissertação (Mestrado em Odontologia – Clínica Odontológica) – Faculdade de Odontologia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

FOGGIATTO, J. A. O Uso da Prototipagem Rápida na Área Médico-Odontológica. **Revista Tecnologia & Humanismo**, Curitiba, v. 20, n. 30, p. 60-68, 2006.

FREITAS, E. P. **Placa Projetada e Otimizada por Elementos Finitos para Tratamento de Fratura Mandibular em Cães.** 2008. 76 f. Dissertação (Mestrado em Cirurgia Veterinária) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2008.

GORNI, A. A. Prototipagem rápida: o que é, quem faz e por que utilizá-la? **Revista Plástico Industrial**, v. 9, n. 31, p. 230-239, 2001.

GOUVEIA, M. F. **Aplicação da prototipagem rápida no planejamento de cirurgias craniofaciais.** 2009. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Materiais e Processos de Fabricação) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

GROESEL, M.; GFOEHLER, M; PEHAM, C. Alternative solution of virtual biomodeling based on CT-scans. **Journal of Biomechanics**, v. 42, n. 12, p. 2006-2009, ago. 2009.

KABAN, L. B. *et al.* Clinical application of curvilinear distraction osteogenesis for correction of mandibular deformities. **Journal of Oral and Maxillofacial Surgery**, v. 67, n. 5, p. 996-1008, mai. 2009.

KANG, F. M. A. **Análise quantitativa de modelos de prototipagem rápida baseados em dados de tomografia volumétrica, por meio de inspeção de engenharia reversa tridimensional.** 2009. 107 f. Dissertação (Mestrado em Odontologia – Diagnóstico bucal) – Faculdade de Odontologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

LAJARIN, S. F. **Avaliação dimensional de implantes sob medida para cranioplastia**. 2008. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Manufatura) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

LAVIOLETTE, P. S. *et al.* 3D visualization of subdural electrode shift as measured at craniotomy reopening. **Epilepsy Research**, v. 94, n. 1-2, p. 102-109, mar. 2011.

MASSARENTI Jr., N. D. *et al.* Utilização de *softwares* livres em educação à distância em medicina e saúde: uma experiência de 6 anos. CONGRESSO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA EM SAÚDE, 10, 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, Sociedade Brasileira de Informática em Saúde, 2006. Disponível em: < <http://www.sbis.org.br/cbis/anaiscbis2006.htm>>. Acesso em: 15 jul. 2009.

MEIRA JÚNIOR, Wagner *et al.* Software livre como uma nova forma de geração de conhecimento. **Revista Fonte**, Belo Horizonte, v. 2, n. 2, p. 75-81, jan./jun. 2005.

MELÉNDEZ-ÁLVAREZ, B. F. Entornos virtuais como apoio ao aprendizado da anatomía em medicina. **Investigaciones Andina**, v. 11, n. 19, p. 94-106, 2009.

MEURER, E. *et al.* Biomodelos de Prototipagem Rápida em CTBMF. **Revista Brasileira de Cirurgia Periodontia**, Curitiba, v. 1, n. 3, p. 172-180, 2003.

MEURER, M. I. *et al.* Aquisição e manipulação de imagens por tomografia computadorizada da região maxilofacial visando à obtenção de protótipos biomédicos. **Radiologia Brasileira**, v. 41, n. 1, p. 49-54, jan.-fev. 2008.

MIYASHITA, E. R. **Avaliação das tensões ósseas geradas por prótese obturadora maxilar classe IV de Aramany por meio da análise de elementos finitos**. 2008. 100 f. Dissertação (Mestrado em Odontologia – Prótese buco maxilo facial) – Faculdade de Odontologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

PAIVA, W. S. *et al.* Application of the stereolithography technique in complex spine surgery. **Arquivos de Neuropsiquiatria**, v. 65, n. 2-B, p. 443-445, 2007.

PETZOLD, R.; ZEILHOFER, H. F.; KALENDER, W. A. Rapid prototyping technology in medicine – basics and applications. **Computerized Medical Imaging and Graphics**, v. 23, n. 5, p. 277-284, out. 1999.

POMPEI, J. P. S. *et al.* Segmentação de imagens médicas. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO CENPRA, 4, 2002, Campinas. Disponível em: <>. Acesso em: 22 jun. 2010.

RAMOS, P. C. F. **Contribuição ao projeto de implantes personalizados através de sistemas de**

CAD e prototipagem rápida. 2007. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

ROBIONY, M. *et al.* Virtual reality for surgical planning maxillofacial distraction osteogenesis: the role of reverse engineering rapid prototyping and cooperative work. **Journal of Oral Maxillofacial Surgery**, v. 65, n. 6, p. 1198-1208, jun. 2007.

ROSA, E. L. S.; OLESKOVICZ, C. F.; ARAGÃO, B. N. Rapid prototyping in maxillofacial surgery and traumatology: case report. **Brazilian Dental Journal**, v. 15, n. 3, p. 243-247, 2004.

SANTOS, A. N.; MERCADO, L. P. L. Arquivamento e comunicação de imagens radiológicas na formação médica online. **Revista Brasileira de Educação Médica**, v. 34, n. 4, p. 525-534, 2010.

ULBRICH, C. B. L. **Inspeção por digitalização em aplicações de prototipagem rápida na medicina.** 2007. 254 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Mecânica dos Sólidos e Projetos Mecânicos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

WINDER, J.; BIBB, R. Medical rapid prototyping technologies: state of the art and current limitations for application in oral and maxillofacial surgery. **Journal of Oral and Maxillofacial Surgery**, v. 63, n. 7, p. 1006-1015, jul. 2005.

YACUBIAN-FERNANDES, A. *et al.* Prototipagem rápida como forma alternativa para realização de cranioplastia com metilmetacrilato. **Arquivos de Neuropsiquiatria**, v. 62, n. 3-B, p. 865-868, 2004.

ZEM-MASCARENHAS, S. H.; CASSIANI, S. H. B. Desenvolvimento e avaliação de um *software* educacional para o ensino de enfermagem pediátrica. **Revista Latino Americana de Enfermagem**, v. 9, n. 6, p. 13-18, 2001.

Submetido para avaliação em 25 de março de 2013.

Aprovado para publicação em 24 de maio de 2013.

Francisco da Silva: Aluno do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Guaratinguetá - SP – Brasil. E-mail: mcn07009@feg.unesp.br

Victor Orlando Gamarra Rosado: Professor adjunto da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Bauru – SP – Brasil. E-mail: victor@feg.unesp.br