

## USO DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA NA FABRICAÇÃO DE PRÓTESES BUCOMAXILOFACIAIS – CASO CLÍNICO

### **Karilany Dantas Coutinho**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Biomédica, Campus Universitário, Lagoa Nova, Natal, RN, Brasil. CEP: 59072-970.

[karilany@ufrnet.br](mailto:karilany@ufrnet.br)

### **Paulo Victor de Azevedo Guerra**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Escola de Ciência e Tecnologia, Campus Universitário, Lagoa Nova, Natal, RN, Brasil. CEP: 59072-970.

[paulovictorguerra@gmail.com](mailto:paulovictorguerra@gmail.com)

### **Antônio Braz Salsa Papaleo**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Escola de Ciência e Tecnologia, Campus Universitário, Lagoa Nova, Natal, RN, Brasil. CEP: 59072-970.

[tota.braz@gmail.com](mailto:tota.braz@gmail.com)

### **Jonas de Paiva Vieira Junior**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Escola de Ciência e Tecnologia, Campus Universitário, Lagoa Nova, Natal, RN, Brasil. CEP: 59072-970.

[jonaspaiva@hotmail.com](mailto:jonaspaiva@hotmail.com)

### **Custódio Leopoldino Brito Guerra Neto**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Biomédica, Campus Universitário, Lagoa Nova, Natal, RN, Brasil. CEP: 59072-970.

[custodioguerra@yahoo.com.br](mailto:custodioguerra@yahoo.com.br)

### **Caroline Dantas Vilar Wanderley**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Biomédica, Campus Universitário, Lagoa Nova, Natal, RN, Brasil. CEP: 59072-970.

[carolinevilar@gmail.com](mailto:carolinevilar@gmail.com)

### **Maria de Lourdes Silva de Arruda Morais**

Liga Norte-Riograndense Contra o Câncer, Av. Miguel Castro, Dix-Sept Rosado, Natal, RN, Brasil. CEP: 59062-000.

[lourd\\_arruda@hotmail.com](mailto:lourd_arruda@hotmail.com)

---

## RESUMO

Este trabalho descreve um sistema que integra métodos de reconstrução tridimensional e técnicas de prototipagem rápida, possibilitando a criação de modelos médicos (biomodelos) através de dados tomográficos. Esses modelos podem ser manufaturados através de processos que são úteis em muitas aplicações médicas, tais como fabricação de próteses, auxílio em diagnósticos e planejamentos ou até mesmo para guiar procedimentos cirúrgicos. A Tomografia Computadorizada e Ressonância Magnética são duas técnicas comumente utilizadas para capturar informações da anatomia humana. A Prototipagem Rápida é uma técnica relativamente recente para produzir objetos com formas complexas, sendo obtida diretamente através de dados digitais tridimensionais. Estes modelos sólidos são construídos pela adição de camadas de material, camada por camada. Atualmente, vários processos de manufatura estão disponíveis comercialmente, tais como Modelagem por Deposição e Material Fundido e Estereolitografia e Sinterização Seletiva a Laser. A pesquisa baseou-se em um estudo de um caso clínico de um paciente da Liga Norte-Riograndense Contra o Câncer (LNRCC), localizada em

---

Natal/RN, o paciente em estudo apresentava mutilações na região de pré-maxila, além de abertura de boca deficiente em decorrência de uma cirurgia para remoção de lesão oncológica. Este artigo descreve os procedimentos para a aquisição de imagens médicas no formato DICOM, a conversão desses arquivos de engenharia no formato STL e por fim a confecção da prótese via prototipagem 3D.

**PALAVRAS-CHAVE:**

Biomodelos, Prototipagem Rápida 3D, Próteses.

**RAPID PROTOTYPING IN MAXILOFACIAL PROSTHESIS – CASE STUDY**

**ABSTRACT**

This paper describes a system that integrates methods for three-dimensional reconstruction and rapid prototyping techniques, enabling the creation of medical models (biomodels) through tomographic data. These models can be manufactured through processes that are useful in many medical applications such as manufacturing of prostheses, assist in the diagnosis and treatment plan, or even for guiding surgical procedures. Computed tomography (CT) and Magnetic Resonance Imaging (MRI) are two commonly used techniques to capture information of human anatomy. The Rapid Prototyping (RP) is a relatively recent to produce objects with complex shapes technique, being obtained directly through three-dimensional digital data. These solid models are built by adding layers of material, layer by layer. Currently, various manufacturing processes are commercially available, such as modeling and Material Fused Deposition and Stereolithography and Selective Laser Sintering. The research was based on a study of a clinical case of a patient Norte-Riograndense Contra o Câncer (LNRCC), located in Natal / RN, patient in study showed mutilations in the region of the premaxilla, and opening poor mouth resulting from surgery to remove cancer lesions. This article describes the procedures for the acquisition of medical images in DICOM format, the conversion of these files in STL format engineering and finally to make the prosthesis via 3D prototyping.

**KEYWORDS:**

Biomodels, 3D Rapid Prototyping, Prostheses.

**USO DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA NA FABRICAÇÃO DE PRÓTESES  
BUCOMAXILOFACIAIS – CASO CLÍNICO**

**INTRODUÇÃO**

No Brasil e no mundo há um grande número de mutilados em decorrência de câncer de cabeça e pescoço e câncer bucal. Com essa nova realidade, os profissionais da área da saúde passaram a perceber que, além da retirada do tumor e eliminação das células afetadas, tornou-se necessária também a busca pela reabilitação, na tentativa de garantir também a qualidade de vida do paciente.

Deformidades ou mutilações nas regiões de cabeça e pescoço afetam o indivíduo em sua autoestima e interfere na relação interpessoal, contribuindo para o isolamento e marginalização na sociedade. De acordo com [5], as deformidades faciais são repulsivas

e embaraçosas ao portador, tornando-o psicologicamente traumatizado, obrigando-o a afastar-se do convívio social. Deformidades faciais podem ocorrer também devido a traumas ou malformações congênitas. Independentemente da causa, a reabilitação protética pode ser uma opção para solucionar problemas físicos e psicológicos decorrentes da mutilação ou deformidades maxilofaciais.

O uso da tecnologia de (PR) melhorou significativamente a concepção e fabricação de modelos complexos em uma ampla gama de aplicações. A integração de sistemas de imagens médicas com os sistemas de (PR) permite a geração de biomodelos precisos, proporcionando valiosa ajuda em áreas como planejamento cirúrgico, projeto do implante, fabricação de próteses, auxílio no diagnóstico e no planejamento do tratamento médico [4].

Em imagens médicas, por exemplo, a (TC) e a (RM) são duas técnicas comuns para a captura de informações anatômica detalhada dos pacientes. A Prototipagem Rápida é uma técnica relativamente nova para produzir rapidamente objetos em 3 dimensões e com formas complexas, diretamente a partir de dados computacionais [10]. Estes modelos sólidos são construídos por meio da adição de camadas de materiais, uma camada de cada vez, com cada camada sucessiva formando no lugar e aderindo-se à pilha de camadas previamente formadas. Vários processos de fabricação estão disponíveis no mercado hoje em dia, alguns mais utilizados são *Fused Deposition Modeling* (FDM), Estereolitografia, ou *Stereolithography Apparatus* (SLA) e Sinterização a Laser Seletiva (SLS).

Esta pesquisa consiste no estudo de técnicas para tratamento de imagens médicas para a fabricação de próteses bucomaxilofaciais, utilizando Prototipagem Rápida. O estudo é realizado desde o arquivo DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*) da tomografia computadorizada até a preparação para a injeção plástico na Impressora tridimensional.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Defeitos decorrentes de cirurgia de tumor de câncer de cabeça e pescoço, traumas ou queimaduras, e defeitos congênitos são as razões mais comuns para a reabilitação maxilofacial. Dependendo da localização e do tamanho do defeito, o mesmo pode ser restaurado ou cirurgicamente ou por meio de próteses. Cirurgias reconstrutivas e microvasculares são os tratamentos preferidos para muitos pacientes, mas a disponibilidade de tecidos e alterações induzidas por radiação do tecido podem limitar os procedimentos cirúrgicos. Reconstruções cirúrgicas de defeitos faciais são tecnicamente exigentes e a reconstrução de um nariz ou uma orelha geralmente requer várias operações para alcançar um resultado esteticamente agradável, ver [15]. Haverá sempre a necessidade de próteses maxilofaciais extrabucais. Nos casos em que a cirurgia reconstrutiva não é possível, uma prótese maxilofacial é utilizada como um substituto para a falta de estruturas biológicas, a fim de reabilitar a estrutura facial para restituir a aparência normal. A prótese restaura a anatomia normal, como também protege o tecido do defeito, proporcionando benefícios psicológicos para o paciente, ver [16], [17], [18], [19] e [20].

O método de fixação para as próteses maxilofaciais depende das exigências de cada caso individualmente, no que diz respeito à localização e tamanho do defeito, a resiliência e possíveis rebaixos de tecido adjacente, e o peso da prótese fabricada, [21]. Fatores anatômicos, como rebaixos e concavidades, podem ser usados como retenção. O

interior do defeito cirúrgico pode ser utilizado para reter a prótese. Devem ser tomadas precauções com o tecido irradiado, como a abrasão da prótese, pelo fato de poder provocar ulceração na região. Tradicionalmente, a fixação mecânica, anexando prótese bucomaxilofacial em óculos, tiaras ou faixas, tem sido utilizada. Os adesivos são utilizados, em alguns casos, para fixar a prótese, eles são simples de usar, e estão disponíveis em duas formas comuns: líquida (silicone ou acrílico com base) ou como fita dupla face. Os métodos de fixação adesiva são limitadas com o movimento da pele circundante, pele oleosa ou umidade pode soltar as margens do tecido adjacente. Uma boa higiene da prótese é necessária, e ainda, o adesivo pode irritar a pele ou causar reações alérgicas. O uso de adesivos como fixadores também exigem removedores especiais, ver [22] e [26].

Os implantes osseointegrados são utilizados para melhorar a fixação e estabilidade de próteses faciais, [23], [24] e [25]. Os primeiros implantes de titânio foram colocados para fixação de próteses de orelhas, nariz e olhos em 1979, ver [25]. Eles proporcionam a forma mais segura de fixação para próteses maxilofaciais e funciona como uma plataforma estável para a fixação delas. Uma boa fixação melhora a função da prótese e a qualidade estéticas da prótese. A maioria dos implantes usados para fixar as próteses maxilofaciais são implantes de titânio cilíndricos, que são ancorados no osso mecanicamente. A cirurgia de dois passos é geralmente necessária. Durante a primeira operação, os implantes são inseridos dentro do osso, [20].

Tecnologias como a captura tridimensional de superfície (digitalização 3D), CAD (*computer aided design*) tridimensional (3D CAD), e os processos de fabricação de camada aditivada (ou Prototipagem Rápida e Fabricação) foram investigados em aplicações protéticas bucomaxilofaciais. No entanto, a literatura, na maioria das vezes, é composta por relatos de estudos de caso clínicos, únicos, que descrevem uma determinada tecnologia ou aplicação. Muitos trabalhos iniciais consistem em fazer uma forma anatômica utilizando processos Prototipagem Rápida, como estereolitografia ou objeto laminado [28]. Pesquisas posteriores tentaram usar métodos de (PR) para produzir moldes a partir do qual as formas de prótese poderia ser moldadas, mas esta aplicação não explorou bem as vantagens da (PR) que poderiam ser melhor integrada com a prática da prótese existente, ver [28] e [29]. Outros pesquisadores tentaram explorar a capacidade do ThermoJet, processo para a produção de formas de prótese com um material de cera, que foi comparável ao das ceras utilizadas na prótese típica de laboratório [30].

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **Caso Clínico:**

A pesquisa baseou-se em um estudo de um caso clínico de um paciente, denominado no texto como Paciente 01 da Liga Norte-Riograndense Contra o Câncer (LNRCC), localizada em Natal/RN. O Paciente 01 em estudo, apresentava mutilações na região de pré-maxila, além de abertura de boca deficiente em decorrência de uma cirurgia para remoção de lesão oncológica na região, ver Figura 1. Essa condição impossibilitava o uso de uma prótese dentária.

O tratamento reabilitador deste caso Clínico será desenvolvido em duas fases, porém apenas a primeira será desenvolvida neste trabalho.

A primeira fase de reabilitação tem a função de restabelecer a abertura de boca do paciente. Para tanto, será confeccionado um dispositivo protético removível através da prototipagem no qual será instalado durante um procedimento de cirurgia plástica. Essa prótese provisória será usada pelo paciente até a completa cicatrização do tecido

mole. A segunda fase do tratamento reabilitador oral será a confecção da prótese removível definitiva.



Figura 1: Caso Clínico – Paciente 01.

### Pré-processamento das Imagens Bidimensionais:

Nessa etapa foi utilizado o Software Público gratuito InVesalius v.3-β5, desenvolvido pelo parceiro da pesquisa, o CTI (Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, Campinas/SP, Brasil), um centro de pesquisas do Ministério da Ciência e Tecnologia.

O modelo 3D da região em estudo, ver Figura 2, foi concebido com base na reconstrução anatômica do Paciente 01, obtida através das imagens médicas no formato DICOM. A técnica utilizada foi a de vetorização por delimitação dos contornos das regiões, baseada na diferenciação de pixels em cada imagem axial, coronal ou sagital, conforme visto na Figura 3. A vetorização, a qual deu origem a toda a informação de reconstrução anatômica digital 3D, não só capturou a informação anatômica real como também todo o ruído, ou seja, regiões desnecessárias para a análise em questão. Para eliminar o efeito dos ruídos, utilizou-se o próprio software InVesalius.

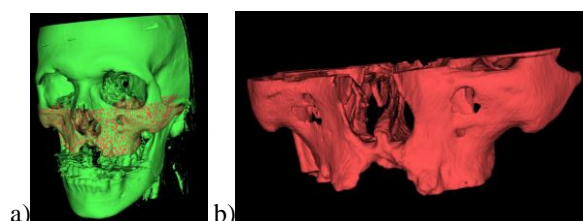


Figura 2: a) Imagem de Tomografia Computadorizada da Região Afetada. b) Detalhe.

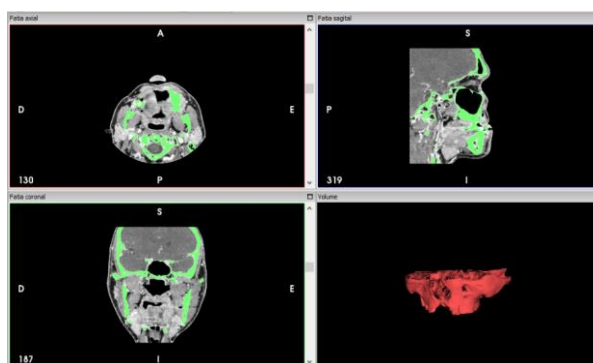


Figura 3: Posições Anatômicas da Região em Estudo.

### **Reconstrução da superfície com o auxílio de um Software CAD (Computer Aided Design):**

Nessa etapa utilizou-se um software comercial CAD para reconstrução biomodelo.

As partes perdidas do paciente, Figura 4, foram reconstruídas com o auxílio desta plataforma, Figura 5. Partes sãs e simétricas às partes afetadas, foram duplicadas e espelhadas. Para os casos de não há condições de duplicação ou reconstrução aproveitando o mesmo órgão do paciente, foi utilizado um banco de dados de tomografias computadorizadas de pacientes anônimos, fornecidas pela Liga Norte Rio Grandense Contra o Câncer, onde pode-se verificar a compatibilidade das características físicas, anatômicas e raciais do paciente anônimo que melhor se adequa e adapte ao Paciente 01.

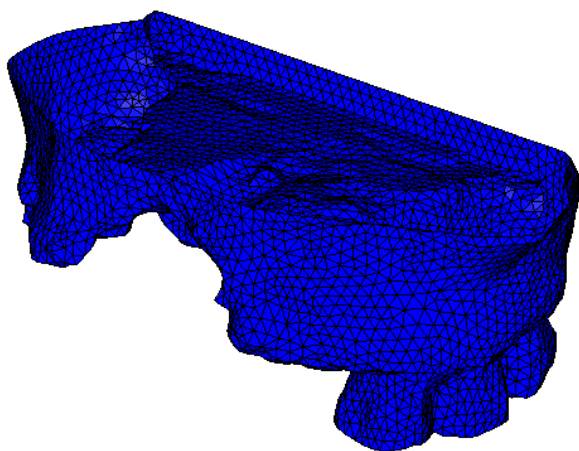


Figura 4: Modelo Inicial – Paciente 01.

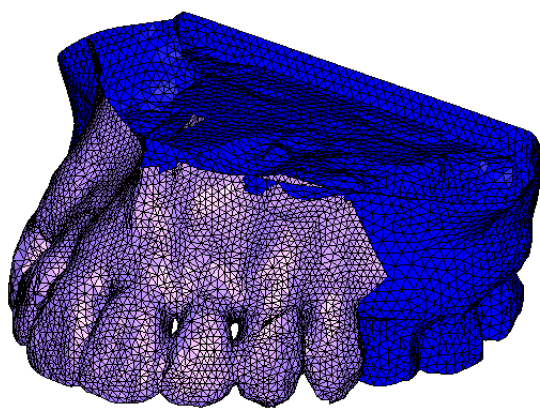


Figura 5: Reconstrução da Superfície Perdida – Paciente 01.

### **Arquivo STL e visualização das imagens geradas, Software CAD (Computer Aided Design):**

Uma vez que o modelo foi reconstruído tridimensionalmente, há a necessidade de converter a imagem tridimensional gerada para um formato que seja compreensível pelo sistema de prototipagem rápida. O formato STL é aceito como padrão e é o mais utilizado como interface entre os processos de prototipagem rápida. Sendo este, o

utilizado nesta metodologia. Este processo será realizado com o auxílio da plataforma CAD.

### **Fabricação dos Biomodelos - Máquina de Prototipagem Rápida:**

A prototipagem rápida possibilita a confecção de modelos tridimensionais obtidos através de um modelo CAD trabalhado tridimensionalmente, ou através de imagens que foram obtidas através de *scanners* tridimensionais. Isto proporciona a criação de modelos reais a partir de modelos virtuais.

A manufatura em prototipagem rápida refere-se aos processos que constrói partes (camada por camada) de forma aditiva. A prototipagem rápida é muito utilizada em processos de manufatura na indústria automotiva, aeroespacial, telecomunicações e máquinas industriais. No entanto, outras possibilidades de aplicação estão emergindo, entre as quais o uso do processo de prototipagem rápida aplicada à área médica.

No processo de prototipagem rápida deste trabalho, o biomodelo será construído em camadas, iniciando pela camada mais baixa e assim sucessivamente, construindo o objeto através de pilhas de camadas, até que se forme o objeto final. Esses sistemas são bastante precisos, de modo que as camadas podem ter espessuras de 0,1 mm.



Figura 6: Prótese Fabricada por Prototipagem 3D – Paciente 01.

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

A modelagem das superfícies e sua transformação em modelo sólido permitirá uma futura análise por elementos finitos simulando as cargas e os efeitos causados.

Foi possível realizar a prototipagem dos modelos, já que o arquivo STL foi gerado, sem falhas.

A modelagem das superfícies demonstrou que é possível a obtenção de geometrias a partir de tecidos diferentes do ósseo, com o Software InVersalius. A superfície gerada apresentou-se apta, conforme esperado.

Os resultados obtidos na modelagem da prótese foram satisfatórios e a mesma está apta para ser instalada no paciente.

## CONCLUSÃO

O uso de prototipagem rápida associada a métodos de reconstrução tridimensional automáticas podem melhorar diversas áreas relacionadas a aplicações médicas, tais como a visualização 3D de uma anatomia específica, planejamento cirúrgico, projeto e fabricação do implante da prótese. Modelos físicos derivados de dados de (TC) ou (RM) podem oferecer aos médicos, cirurgiões e dentistas uma relação direta, compreensão intuitiva de detalhes anatômicos complexos que não podem ser obtidos a partir de imagens.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais à Liga Norte-Riograndense Contra o Câncer/ Natal/ Brasil, ao Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer/ Campinas/Brasil e ao LAIS - Laboratório de Inovação Tecnológica em Saúde da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, localizado no Hospital Universitário Onofre Lopes/UFRN.

## REFERÊNCIAS

- [1] Arora, A., et al. Custom-Made Implant for Maxillofacial Defects Using Rapid Prototype Models, American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons, Elsevier Inc, 2013.
- [2] Choi, J.Y. et al. “Analysis of errors in medical rapid prototyping models”, Int. J. Oral Maxillofac. Surg. 31: 23–32, 2002.
- [3] Fernandes, A.U; Goiato, M.C; Dos Santos, D.M. Effect of weathering and thickness on roughness of acrylic resin and ocular button. ContLensAnteriorEye. p. 33-124, Jun. 2010
- [4] Foggiatto, J. A. O Uso Da Prototipagem Rápida Na Área Médico-Odontológica, UTFPR, 2010.
- [5] Goiato, M.C; Fernandes, A.U; Dos Santos, D.M; Barão, V.A.R. Positioning Magnets on a Multiple/Sectional Maxillofacial Prosthesis. J Contemp Dent Pract. p. 101-107. 2007.
- [6] Pedrini, H. Reconstrução 3d a partir de seções transversais de objetos. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia da Computação e Automação Industrial. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 98 p, 1994.
- [7] Rezende, J.R.V. Fundamentos da prótese buco-maxilo-facial. São Paulo. Sarvier, 1987.
- [8] Rodrigues, Shenoy e Shenoy; Prosthetic rehabilitation of a patient after partial rhinectomy: Aclinical report. J Prosthet Dent; p. 93-125. 2005.
- [9] Safira. et al. Aplicação dos biomodelos de prototipagem rápida na Odontologia, confeccionados pela técnica da impressão tridimensional. Revista de Ciências Médicas e Biológicas. 2010.
- [10] Sugar, A. et al. The development of a collaborative medical modeling service: organizational and technical considerations. Br. J. Oral Maxillofac. Surg., Edinburgh, v.42, p.323-330, 2004.



- [11] Vinagre, M. A. M. Obtenção de Modelos Anatômicos por Prototipagem Rápida, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2008.
- [12] Yan Yongnian, et al. Rapid Prototyping and Manufacturing Technology: Principle, Representative Technics, Applications, and Development Trends, Tsinghua Science and Technology, ISSN 1007-0214 01/38, pp1-12, volume 14, number s1, 2009.
- [13] Zhang, S., et al. Application of Rapid Prototyping for Temporomandibular Joint Reconstruction, American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons. Elsevier Inc. All rights reserved, 2011.
- [14] <http://www.ligacontraocancer.com.br/> acesso dia 21 de março de 2013.
- [15] Ariani N, Visser A, van Oort RP, Kusdhany L, Rahardjo TB, Krom BP, van der Mei HC, Vissink A. Current state of craniofacial prosthetic rehabilitation. *Int J Prosthodont* 2103;26:57-67.
- [16] Flood TR, Russell K. Reconstruction of nasal defects with implant-retained nasal prostheses. *Br J Oral Maxillofac Surg* 1998;36:341-345.
- [17] Huber H, Studer SP. Materials and techniques in maxillofacial prosthodontic rehabilitation. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am* 2002;4:73-93.
- [18] Wallace CG, Wei FC. The status, evolution and future of facial reconstruction. *Chang Gung Med J* 2008;31:441-449.
- [19] Beumer J, Reisberg DJ, Marunick MT, Powers J, Kiat-amnuay S, van Oort R, Zhao Y, Wu G, Eversole LR, Cherrick HM, Roumanas E, Pedroche D, Baba T, de Cubber J, Moy PK, Noorda WD, van Dijk G. Rehabilitation of facial defects. In: Beumer J, Marunick MT, Esposito SJ editors. *Maxillofacial rehabilitation: prosthodontics and surgical management of cancer-related, acquired, and congenital defects of the head and neck*. 3d edition. Chicago: Quintessence Publishing Co. 2011. p. 255-314.
- [20] Mantri S, Khan Z. Prosthodontic rehabilitation of acquired facial defects. In: Agulnik M, editor: *Head and neck Cancer*. InTech 2012. p. 315-336.
- [21] Chalian VA. Treating the patient with facial defects. In: Laney WR, editor. *Maxillofacial prosthetics*. Littleton, Massachusetts: PSG Publishing Co.; 1979. p. 279-308.
- [22] Lemon JC, Chambers MS, Jacobsen ML, Powers JM. Color stability of facial prostheses. *J Prosthet Dent* 1995;74:613-618.
- [23] Parel SM, Tjellström A. The United States and Swedish experience with osseointegration and facial prostheses. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1991;6:75-79.
- [24] Ethunandan M, Downie I, Flood T. Implantretained nasal prosthesis for reconstruction of large rhinectomy defects: the Salisbury experience. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2010;39:343-349.
- [25] Leonardi A, Buonaccorsi S, Pellachia V, Moricca LM, Indrizzi E, Fini G. Maxillofacial prosthetic rehabilitation using extraoral implants. *J Craniofac Surg* 2008;19:398-405.
- [26] Mantri S, Khan Z. Prosthodontic rehabilitation of acquired facial defects. In: Agulnik M, editor: *Head and neck Cancer*. InTech 2012. p. 315-336.
- [27] Chua, C. K., Chou, S. M., Lin, S. C., Lee, S. T. and Saw, C. A. (2000), "Facial prosthetic model fabrication using rapid prototyping tools", *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 11 No. 1, pp. 42-53.
- [28] Cheah, C. M., Chua, C. K., Tan, K. H. and Teo, C. K. (2003a), "Integration of laser surface digitizing with CAD/CAM techniques for developing facial prostheses.

- Part 1: Design and fabrication of prosthesis replicas”, *International Journal of Prosthodontics*, Vol. 16 No. 4, pp. 435-41.
- [29] Cheah, C. M., Chua, C. K. and Tan, K. H. (2003b), “Integration of laser surface digitizing with CAD/CAM techniques for developing facial prostheses. Part 2: Development of molding techniques for casting prosthetic parts”, *International Journal of Prosthodontics*, Vol. 16 No. 5, pp. 543-8.
- [30] Chandra, A., Watson, J., Rowson, J. E., Holland, J., Harris, R. A. and Williams, D. J. (2005), “Application of rapid manufacturing techniques in support of maxillofacial treatment: evidence of the requirements of clinical application”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 219 No. 6, pp. 469-76.