

Avaliação da precisão e da facilidade de fabricação de diferentes métodos de produção de protótipos: prototipagem rápida e usinagem CNC
Evaluation of precision and ease of fabrication from different manufacturing methods for prototypes: rapid prototyping and CNC machining

ROCKENBACH, Maurício

Graduando em Engenharia Mecânica, UFRGS

BERTOL, Liciane Sabadin

Mestre em Engenharia, UFRGS

SILVA, Fábio Pinto da

Mestre em Engenharia, UFRGS

ROLD, Liane

Doutora em Engenharia, UFRGS

Palavras-chave: protótipo, prototipagem rápida, usinagem CNC.

Processos de fabricação automatizados e flexíveis possibilitam a fabricação de protótipos físicos anatômicos de formas complexas. Dentre estes processos destacam-se a prototipagem rápida e a usinagem CNC. Com o objetivo de avaliar tais processos e seu potencial para a fabricação de protótipos, este trabalho analisa, através da técnica de digitalização tridimensional a laser, a precisão de modelos fabricados por estes métodos, bem como custos e características de fabricação.

Key-words: prototype, rapid prototyping, CNC milling.

Flexible and automated manufacturing processes allow the production of anatomic models with complex shapes. Rapid prototyping and CNC milling are among these processes. Aiming to evaluate these processes and their potential to produce prototypes, this paper analyses precision, costs and manufacturing characteristics using three-dimensional laser scanning.

Introdução

Para a fabricação de protótipos, muitas vezes é necessário um processo automatizado e flexível, capaz de produzir formas orgânicas complexas. Atualmente, a tecnologia que vem se destacando é a prototipagem rápida, processo surgido no final da década de 80 como resposta a necessidade dos designers de produzir protótipos de forma mais rápida e precisa do que os métodos manuais. Este processo utiliza softwares CAD (computer-aided design) e CAM (computer-aided manufacturing) para fabricar peças diretamente a partir de um modelo tridimensional virtual. A chave dos processos de prototipagem rápida é a construção da peça através da deposição camada sobre camada de material, o que possibilita a fabricação de peças únicas e de geometrias complexas (VOLPATO, 2007). Entretanto, os processos de prototipagem rápida são limitados em quantidade de materiais que podem ser aplicados. Além disso, a tecnologia ainda não é amplamente disponível, principalmente em países em desenvolvimento como o Brasil, onde também há elevados custos envolvidos.

A usinagem por comando numérico computacional (CNC) também é um processo de fabricação automatizado e capaz de produzir peças únicas. Entretanto, por trabalhar através de remoção de material este processo apresenta desvantagens em relação a prototipagem rápida em termos de versatilidade de reprodução de geometrias e é mais complexo em sua programação. Contudo, devido a sua ampla aplicação na indústria, máquinas de usinagem CNC são mais disponíveis no mercado do que as de prototipagem rápida. Outra vantagem da usinagem CNC em relação à prototipagem rápida é a maior disponibilidade de materiais que podem ser utilizados, permitindo a utilização da seleção de materiais para determinar o material com as propriedades mais desejadas para a condição de serviço deste protótipo.

Em um contexto de melhora na expectativa de vida da população e de aumento do número de acidentes no trânsito e na prática de esportes radicais, e a conseqüente demanda por próteses, implantes e equipamentos médicos, a área da saúde apresenta-se como uma das grandes usuárias das técnicas em questão. A contribuição das áreas da tecnologia para a medicina permitiu o desenvolvimento de uma série de ferramentas úteis para o diagnóstico e tratamento de pacientes, com grande destaque atualmente para a Tomografia Computadorizada (TC) e a Imagem de Ressonância Magnética (IRM). São tecnologias de diagnóstico que oferecem uma grande quantidade de informação para os médicos, mas as imagens geradas são muitas vezes difíceis de interpretar e são manipuladas apenas em ambiente virtual.

Evoluções ocorridas na computação gráfica e nos processos de fabricação permitem que os dados obtidos por TC e IRM possam ser editados e transformados para que, a partir deles, sejam fabricados modelos físicos anatômicos, denominados biomodelos. Devido ao seu caráter físico, biomodelos são mais fáceis de interpretar e manipular do que imagens de TC e IRM (D'URSO *et al.*, 1998). Isso faz deles uma ferramenta útil nos casos cirúrgicos mais complexos, permitindo um melhor planejamento e uma simulação prévia, além de facilitar a comunicação com o paciente (SHOI e SAMAVEDAN, 2002). Além disso, uma aplicação dos biomodelos que vem ganhando destaque é o design e a fabricação de implantes e próteses personalizadas, onde um protótipo da prótese é moldado sobre o modelo para sua posterior fabricação. Estudos apontam o potencial dos biomodelos de reduzir o custo global do tratamento, além de conduzir a melhores resultados (MEURER *et al.*).

Neste sentido, este trabalho tem o objetivo de avaliar como a usinagem CNC se comporta como método alternativo para a produção de protótipos, através de um estudo de caso com biomodelos. Os aspectos escolhidos para a avaliação foram a precisão, os custos e a facilidade de fabricação.

Materiais e Métodos

Com o objetivo de realizar a avaliação dos processos de prototipagem rápida e usinagem CNC, um caso de um paciente com defeito craniano foi selecionado. Os dados do paciente foram obtidos através de tomografia computadorizada e o *software* Invesalious foi utilizado para fazer a conversão para um modelo CAD (apresentado na figura 1). Para realizar a presente avaliação, quatro dos principais processos de prototipagem rápida, com seus respectivos materiais típicos, foram selecionados. Três materiais diferentes para usinagem também foram escolhidos, baseados na disponibilidade e nas propriedades interessantes para o caso em questão. Os tempos de pré, pós e do próprio processamento foram medidos, bem como o número de intervenções do operador e o custo de cada processo.

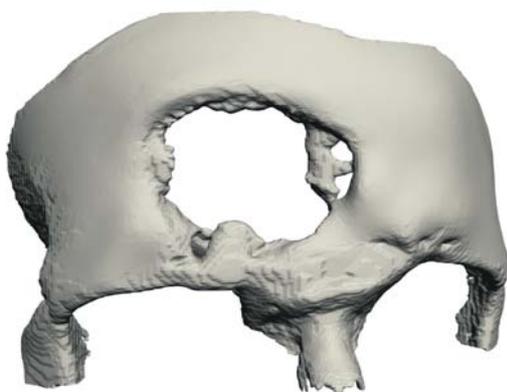


Figura 1: Modelo CAD do caso de defeito craniano estudado.

-Prototipagem rápida

Os processos de prototipagem rápida analisados foram Sinterização seletiva a laser (SLS), Modelagem por deposição de material fundido (FDM), Impressão tridimensional (3DP) e PolyJet. Os protótipos fabricados por SLS, FDM e 3DP foram produzidos pelo Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI), de Campinas - SP. O protótipo fabricado pelo processo PolyJet foi produzido pela empresa Gravasul Projetos de Matrizes e Solados Ltda., de Novo Hamburgo - RS. Alguns aspectos relevantes de cada técnica são descritos a seguir.

Sinterização seletiva a laser (SLS): Este processo utiliza um laser de CO₂ de média potência para sinterizar um material sob a forma de um pó fino. É um dos processos mais versáteis, com versões capazes de sinterizar pós metálicos. O equipamento utilizado foi um SinterStation 2000, empregando como material o Nylon.

Modelagem por deposição de material fundido (FDM): Baseia-se na deposição de um fino filamento de material termoplástico. Este é um dos processos mais difundidos, conhecido por produzir protótipos com boas propriedades mecânicas. O equipamento utilizado foi um Vantage i, empregando como material o ABS.

Impressão tridimensional (3DP): O princípio deste processo é a união de um pó fino, através de um agente aglutinante aplicado por um cabeçote de impressora jato de tinta. Normalmente, devido à alta fragilidade, para o manuseio dos protótipos produzidos é necessária a infiltração de uma resina. Como principais características podem-se citar a simplicidade dos equipamentos, além do baixo tempo e custo de fabricação. O equipamento utilizado foi um ZPrinter 310, empregando como material o gesso.

PolyJet: Utiliza um cabeçote de impressão mais avançado que deposita resina líquida, a qual é polimerizada por uma lâmpada de raios ultra-violeta. Entre cada camada é aplicado um rolo para ajuste de altura. É um dos processos mais recentes, conhecido pela boa qualidade superficial e precisão nominal (0,016mm em z). O equipamento utilizado foi um Éden 330, empregando como material uma resina acrílica.

-Usinagem CNC

Os modelos usinados foram produzidos no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O equipamento utilizado foi o Digimill 3D, uma fresadora CNC com três eixos de movimentação. Para a programação das estratégias de usinagem foi utilizado o *software* EdgeCAM.

Os materiais escolhidos para a usinagem foram MDF, Poliuretano expandido (densidade 120g/cm³) e Nylon. O MDF foi selecionado por ser comumente empregado em protótipos usinados, devido ao seu baixo custo e ampla disponibilidade. O Poliuretano também foi selecionado por ser bastante empregado em protótipos, por possuir boa usinabilidade, permitindo baixas forças de corte e altas velocidades de avanço. Já o Nylon foi utilizado por ser um polímero técnico de boa aparência, destacado por sua boa resistência mecânica.

Quanto às operações de usinagem, cada um dos materiais passou por uma etapa inicial de faceamento, para ajuste das dimensões do bloco a ser processado. Após fixado o bloco na mesa da máquina, foram realizadas uma operação de desbaste e uma de acabamento para cada lado (frente e verso) do protótipo. Cabe salientar que após a usinagem da frente do modelo, foi necessária a intervenção de um operador para virá-lo e permitir a usinagem do verso. Visando a maior viabilidade de fabricação, foram utilizadas ferramentas convencionais, uma de topo reto e diâmetro 6mm (desbaste) e outra esférica com diâmetro de 4mm (acabamento).

-Análise

Para fazer a análise de precisão dos protótipos obtidos, cada um foi escaneado pela técnica de digitalização tridimensional a laser. O cabeçote de leitura a laser utilizado foi o Conoprobe 1000, o qual é acoplado na máquina CNC Digimill 3D.

O processo consiste na varredura de uma superfície por um feixe de laser capaz de determinar a distância entre ele e o ponto sobre o qual incide. Assim, obtém-se a coordenada z, a qual possui precisão dependente da lente empregada. No presente estudo foi utilizada uma lente de 150mm, a qual possui precisão de 0,035mm. As coordenadas x e y são dadas pelo programa CNC responsável pelo posicionamento do cabeçote laser. O cruzamento destes dados geram numerosos pontos no espaço tridimensional, conhecidos como nuvem de pontos. O espaçamento entre estes pontos é chamado de resolução da medição e é diretamente responsável pelo tempo de digitalização. Todos os protótipos foram digitalizados com uma resolução de 0,1mm, o que acarretou em um tempo de 50min para cada modelo.

Após a digitalização, as nuvens de pontos foram tratadas no *software* Geomagic Studio, o qual as pré-processa para trabalhar em CAD. Assim, cada modelo digitalizado foi comparado geometricamente com o modelo CAD que serviu de base para todos os processos de fabricação. Esta etapa de análise foi realizada no *software* Geomagic Qualify. Como resultados obtiveram-se figuras que exibem em cores os desvios geométricos, bem como alguns dados estatísticos relativos a estes desvios.

Resultados e Discussão

-Características de fabricação

A tabela 1 apresenta as características de fabricação de cada um dos processos. Os parâmetros medidos foram os tempos de processamento, o tempo total de produção, o custo dos protótipos produzidos e o número de intervenções que o operador necessita realizar em cada processo. Salienta-se aqui que o tempo total consiste na soma do tempo de processo com os tempos necessários para a programação e acabamento.

Tabela 1: Características de fabricação dos diferentes processos e materiais utilizados

Processo e material	Tempo de processo	Tempo total	Preço	Intervenções
SLS (Nylon)	12h 00min	12h 40min	R\$ 600,00	1
FDM (ABS)	31h 30min	33h 50min	R\$ 600,00	2
3DP (Gesso)	2h 00min	3h 10min	R\$ 400,00	2
PolyJet (Acrílico)	8h 20min	10h 30min	R\$ 900,00	2
Usinagem CNC (MDF)	2h 15min	4h 15min	R\$ 400,00	5
Usinagem CNC (PU)	1h 15min	2h 55min	R\$ 300,00	5
Usinagem CNC (Nylon)	2h 15min	4h 15min	R\$ 500,00	5

O processo SLS, por não necessitar de material de suporte, é o único que necessita de única intervenção, a qual se dá para iniciar o processo. O 3DP, embora também não use material de suporte, necessita de uma etapa de pós-processamento inexistente nos demais, que envolve a infiltração de resina no modelo para lhe conferir maior resistência mecânica. Os processos FDM e PolyJet exigem, como etapa de pós-processamento, a remoção dos suportes.

Quanto aos tempos, destaca-se negativamente o grande tempo de fabricação observado para o processo FDM, com total de praticamente um dia e meio. Já o processo 3DP destaca-se por ser mais rápido, com a vantagem adicional de ser o de menor custo dentre os processos de prototipagem rápida. Nos resultados desta análise, o 3DP é o único comparável aos processos de usinagem CNC.

Os processos de usinagem CNC, em geral, apresentaram um baixo tempo de produção, destacando-se o PU por aceitar maiores velocidades de avanço. Por ser mais versátil e permitir a utilização de materiais mais acessíveis, a usinagem proporcionou custos reduzidos, como foi observado para os modelos fabricados em MDF e PU. Entretanto, o processo exige um número muito maior de intervenções do operador (mão de obra especializada), pois se faz necessário o posicionamento e alinhamento do bloco de material a ser usinado e a troca de ferramentas entre as operações de desbaste e acabamento.

-Avaliação dimensional

As figuras de 2 a 8 apresentam os dados relativos ao desvio geométrico para cada processo de fabricação. As referidas figuras ilustram em graduação de cores a diferença tridimensional entre as faces superiores do modelo digitalizado e o modelo CAD obtido da tomografia. Para favorecer a visualização, a resolução utilizada entre as diferentes tonalidades de cores foi de 0,05mm. Assim, as regiões coloridas em verde apresentam desvios inferiores aos 0,05mm, sendo consideradas fiéis ao modelo da tomografia. Os tons do amarelo ao vermelho representam os desvios positivos, ou seja, os pontos onde o modelo produzido é mais alto do que o modelo original, sendo que as regiões vermelho-escuras são as regiões onde este desvio foi maior do que 0,5mm. Os tons de azul são as regiões de desvio negativo, onde o modelo produzido é mais profundo que a referência, com o azul-escuro representando os desvios mais baixos do que -0,5mm.

Alguns dados estatísticos são exibidos na parte inferior esquerda de cada figura, sendo:

Max: valores dos pontos com o maior desvio tridimensional positivo e negativo, respectivamente;

Average: médias dos desvios positivos e negativos, respectivamente;

Standard Deviation: desvio padrão dos desvios tridimensionais entre os modelos.

-SLS

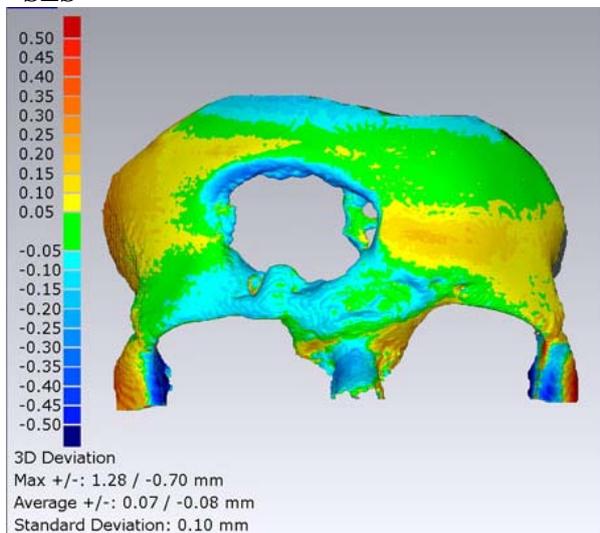


Figura 2: Precisão do protótipo fabricado por SLS.

-FDM

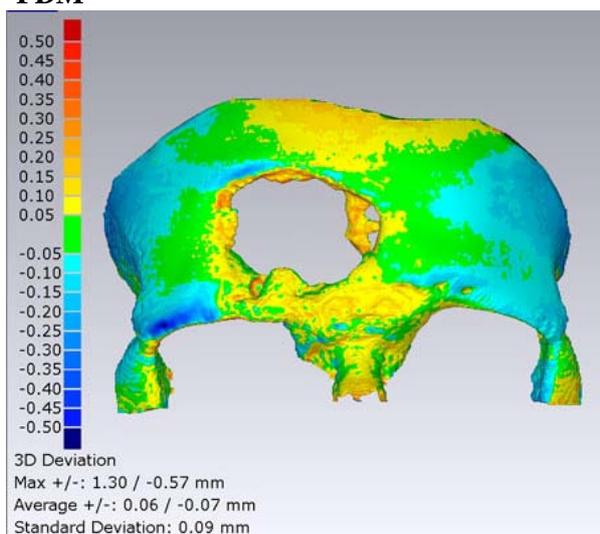


Figura 3: Precisão do protótipo fabricado por FDM.

-3DP

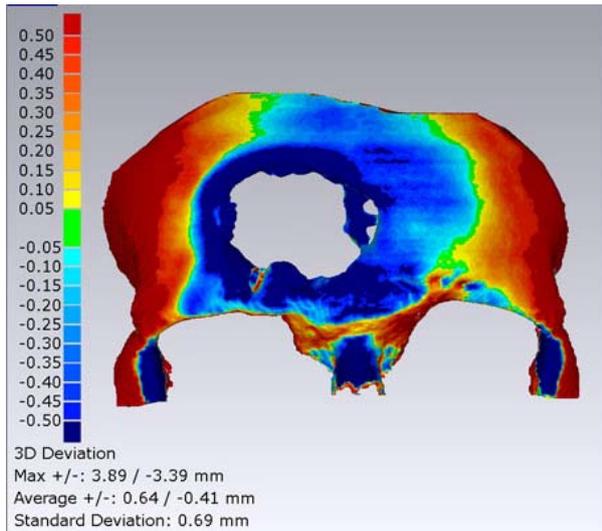


Figura 4: Precisão do protótipo fabricado por 3DP.

-PolyJet

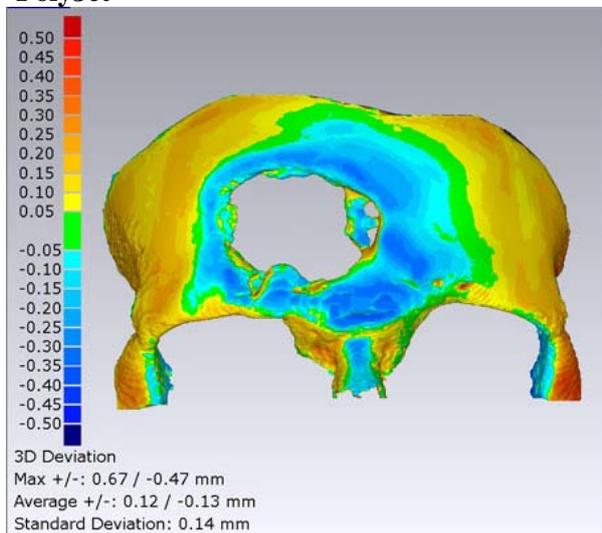


Figura 5: Precisão do protótipo fabricado por PolyJet.

-Usinagem CNC, MDF

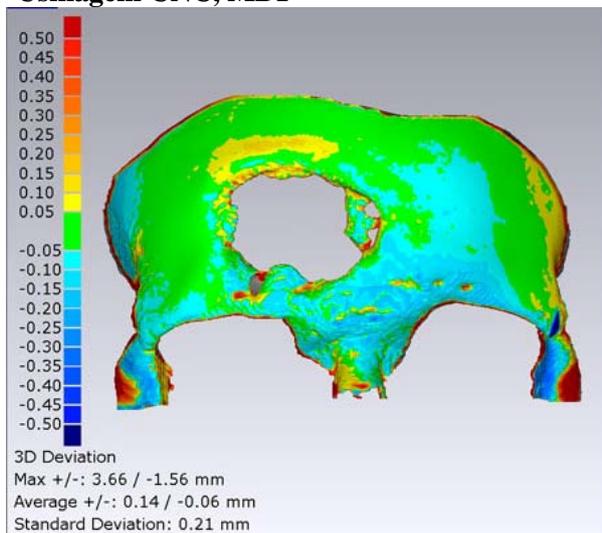


Figura 6: Precisão do protótipo fabricado por usinagem CNC de MDF.

-Usinagem CNC, PU

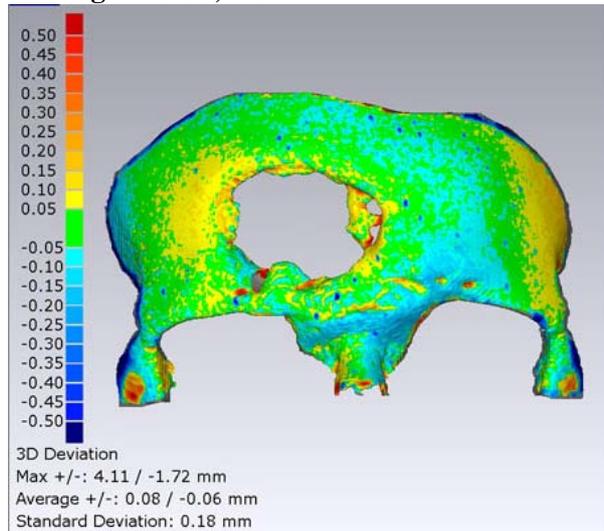


Figura 7: Precisão do protótipo fabricado por usinagem CNC de PU.

-Usinagem CNC, Nylon

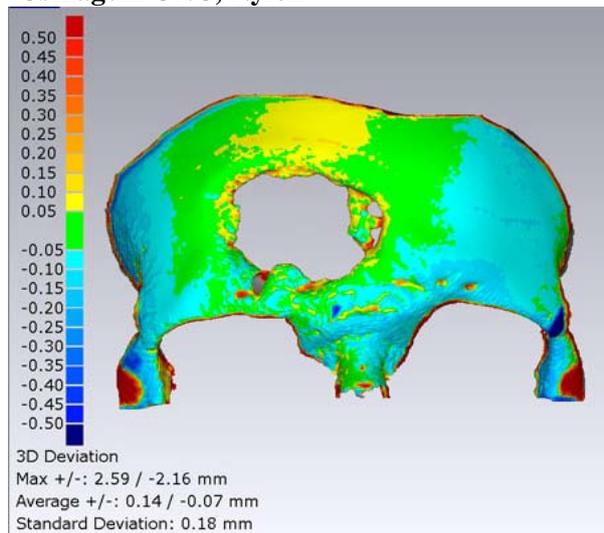


Figura 8: Precisão do protótipo fabricado por usinagem CNC de Nylon.

O processo FDM produziu o protótipo com os menores desvios. Este processo apresenta elevada precisão principalmente devido à pequena espessura do filete de material depositado. Entretanto, atribui-se à utilização dessa reduzida espessura também o grande aumento no tempo de processamento.

O processo SLS apresenta-se como o segundo mais preciso, mas também como o segundo mais demorado, embora ainda muito mais rápido que o FDM. Suas características são associadas à qualidade do pó utilizado e à precisão do laser.

É evidente que o protótipo fabricado pelo processo 3DP apresentou a menor precisão dimensional. Esta característica pode ser atribuída a uma das etapas de pós-processamento do modelo, na qual ocorre a infiltração de resina para lhe conferir maior resistência mecânica. Tal adição de material ocasiona a expansão do protótipo, explicando os desvios em relação ao modelo CAD original.

O PolyJet apresentou os menores desvios máximos, o que justifica seu reconhecimento como um dos processos que fornece melhor acabamento superficial. Porém, embora com valores bem menores, ele

apresentou um comportamento de desvios similar ao 3DP. Este comportamento pode ser associado ao rolo que ajusta a altura das camadas, o qual pode compactar parte do material, ocasionando uma pequena expansão lateral. Como a luz ultravioleta permanece acesa durante todo o processo, torna-se interessante verificar sua influência em uma possível dilatação das camadas já processadas.

Os protótipos fabricados por usinagem CNC apresentaram desvios superiores aos fabricados por SLS e FDM e similares ao PolyJet, embora ainda superiores. Assim, excetuando-se o 3DP, a usinagem convencional pode ser considerada menos precisa do que a prototipagem rápida. Embora os desvios médios não sejam tão evidentes, caracterizando a usinagem CNC como uma alternativa viável, os desvios máximos são muito superiores. Isso se deve às limitações inerentes ao uso de ferramentas de corte, tais como a impossibilidade de reproduzir curvaturas negativas ou muito pequenas, nas quais a ferramenta não alcança (representadas como pequenos pontos vermelhos nas figuras 6, 7 e 8). Estes fatores são também o motivo de os desvios médios negativos da usinagem CNC serem menores do que os da prototipagem.

Quanto aos materiais usinados, o PU apresentou-se com maior precisão, o que pode ser atribuído a sua boa usinabilidade, porém com evidentes desvios atribuídos à porosidade inerente ao material expandido (representados como diversos pontos azuis na figura 7). O MDF e o Nylon apresentaram comportamentos semelhantes, com precisões inferiores a do PU, porém sem a desvantagem da porosidade. Ressalta-se ainda que estes dois são materiais de melhor resistência mecânica.

Conclusões

Pode-se concluir que a maioria dos processos de prototipagem rápida estudados são mais precisos do que a usinagem CNC. Este fato torna-se evidente quando observadas algumas áreas de maiores detalhes que as ferramentas convencionais de usinagem têm dificuldades de reproduzir. Deve-se, então, avaliar se as regiões de menor precisão dos protótipos usinados são críticas para a aplicação em questão, ou se podem ser desconsideradas. Assim, para peças com menor complexidade geométrica, a usinagem CNC apresenta como uma alternativa viável. Cabe ainda salientar que o uso de ferramentas menores pode permitir uma maior precisão e acabamento destes processos, porém perdendo a vantagem do tempo.

Neste contexto, os processos de FDM e SLS são respectivamente os mais precisos. Isso implica também em que eles sejam mais caros do que a usinagem CNC e demandem os maiores tempos de fabricação. Entre estes dois processos, o SLS possui precisão pouco menor, porém um tempo de fabricação muito menor, o que lhe confere uma melhor relação precisão/tempo. O processo 3DP apresentou precisão consideravelmente inferior aos demais processos estudados, embora seus tempos de fabricação o tornem interessante para casos onde não se prime pela precisão. Já o processo PolyJet apresentou-se mais próximo a usinagem, com a vantagem do melhor acabamento superficial, mas com um custo mais elevado.

Cabe ainda observar que o Nylon, embora o mais caro dos materiais usinados nesta análise, é o mais resistente dentre todos, mesmo comparado com os modelos da prototipagem rápida. Acredita-se que as propriedades mecânicas dos materiais depositados, talvez pela própria densidade, ainda não atingem as dos materiais processados por métodos convencionais; porém maiores estudos precisam ser realizados neste campo.

Este trabalho foi realizado com apoio do CNPq, da CAPES, do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer e da empresa Gravasul Projetos de Matrizes e Solados Ltda.

Bibliografia

BERTOL, L. S. Contribuição ao estudo da prototipagem rápida, digitalização tridimensional e seleção de materiais no design de implantes personalizados. Dissertação de mestrado. Porto Alegre: UFRGS, 2008.
VOLPATO, N. Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações. São Paulo: Edgar Blücher, 2007.
CTI – Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer. Disponível em: <www.cti.gov.br> acessado em janeiro de 2009.

D'URSO, P.S.; ATKINSIN, R.L.; WEIDMANN, M.J.; REDMOND, M.J.; HALL, B.I.; EARWAKER, W.J.S., THOMPSON, R.G.; EFFENEY, D.J. Biomodelling of skull base tumors. *Journal of Clinical Neuroscience*, 6(1), p.31-35, 1998.

MEURER, E. et al. Os biomodelos de prototipagem rápida em Cirurgias e Traumatologia Bucomaxilofacial. *Revista Brasileira de Cirurgia e Implantodontia*, Curitiba, v.1, p.172-180, 2003.

OPTIMET. Introduction. In: OPTIMET, *Optical Metrology*, 2003. Disponível em: <<http://optimet.com/technology.htm>> acessado em janeiro de 2009.

SHOI, S.H.; SAMAVEDAN, S. Modelling and optimization of rapid prototyping. *Computer in Industry*, v.47, I. p.39-53, 2002.

SILVA, F. P. O uso da digitalização tridimensional a laser no desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao design de produtos. Dissertação de mestrado. Porto Alegre: UFRGS, 2006.

Maurício Rockenbach mauricio.rockenbach@terra.com.br

Liciane Sabadin Bertol liciane.bertol@ufrgs.br

Fábio Pinto da Silva fabio.silva@ufrgs.br

Liane Roldo lroldo@uol.com.br