



MATERIAL ALTERNATIVO DE BAIXO CUSTO APLICADO A TÉCNICA DE IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL 3Dprinter PARA A CONFECCÃO DE BIOMODELOS

NEWTON SALVADOR GRANDE NETO¹, CARLOS EDUARDO SILVA BRITO¹, RUÍS
CAMARGO TOKIMATSU¹, FELIPE DE CARVALHO ZAVAGLIA², CECÍLIA
AMÉLIA DE CARVALHO ZAVAGLIA²

¹Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP)
Departamento de Engenharia Mecânica (DEM)
Brasil Centro, 56 – Ilha Solteira – SP (Brasil)

²Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM)
Rua Mendeleev, 200 – Campinas – SP (Brasil)

(Recibido 11 de octubre de 2017, para publicación 18 de enero de 2018)

Resumo – Biomodelos em diversos materiais vem sendo desenvolvidos para o auxílio do planejamento de cirurgias complexas, como por exemplo de reconstrução de crânio. A obtenção destes biomodelos se baseia na execução de três etapas básicas: aquisição de imagens bidimensionais, tratamento destas imagens via software de modelagem e a manufatura do biomodelo através da manufatura aditiva. Um conjunto de tecnologias proporcionou a reprodução física de um modelo complexo em vários tipos de materiais, de forma automatizada, a partir de um modelo virtual utilizando a impressão tridimensional. Muito similar a uma impressora comercial a jato de tinta, a impressão dos biomodelos é através de camadas sucessivas de pó aglutinadas por um líquido chamado *binder*. Os materiais de consumo utilizados nesta técnica possuem alto valor de mercado, inviabilizando a utilização da técnica de impressão tridimensional com maior frequência. Este trabalho teve como objetivo principal a preparação de um material alternativo de baixo custo, a base de gesso, a fim de se comparar resistência mecânica e qualidade superficial com materiais comerciais amplamente aceitos no mercado nacional. As discussões e conclusões versam sobre análises comparativas entre os materiais, por meio de resistência mecânica, granulometrias e morfologia do pó, qualidade superficial e utilização de resina de cianoacrilato como pós-processamento, visto que esta última é prática comum para a maioria dos objetos manufaturados.

Palavras-chave – Impressão tridimensional, manufatura aditiva, material alternativo, biomodelos.

1. INTRODUÇÃO

Diversos foram os avanços tecnológicos desenvolvidos pelos humanos, um desses em especial é conhecido como biomodelagem. Esta tecnologia é resultado da integração de diversas áreas, como por exemplo, engenharia, computação, medicina, entre outras. Tem por finalidade a reprodução física (Fig. 1) de uma morfologia advinda do interior do corpo humano para o auxílio de estudos sobre determinadas enfermidades, planejamentos de cirurgia e simulações de uma cirurgia real. Para isso, algumas técnicas são utilizadas, como por exemplo a tomografia computadorizada para a obtenção das imagens bidimensionais internas de uma estrutura, um software de modelagem tridimensional para o tratamento das imagens e a manufatura aditiva para a confecção física do biomodelo [5]. De uma forma totalmente nova a medicina atingiu um novo patamar sobre o planejamento de cirurgias complexas com a utilização de biomodelos, com o objetivo de reduzir riscos presentes durante e pós-cirúrgicos, tempos de anestesia, exposição a infecções ou até mesmo eventos inesperados. Em múltiplas cirurgias, também é observado a redução do número de intervenções cirúrgicas para se atingir um resultado final satisfatório [1,4].

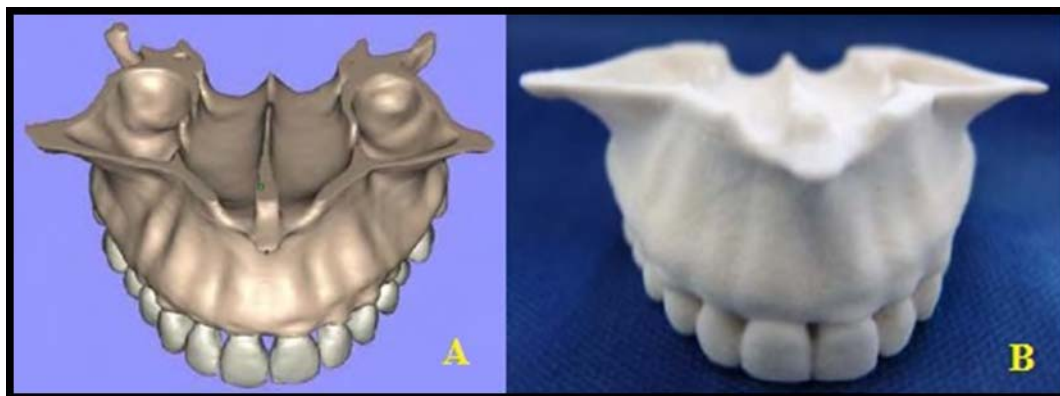


Fig. 1. A) Estrutura virtual e B) sua reprodução física (biomodelo).
(Adaptado de Myashita, 2008)

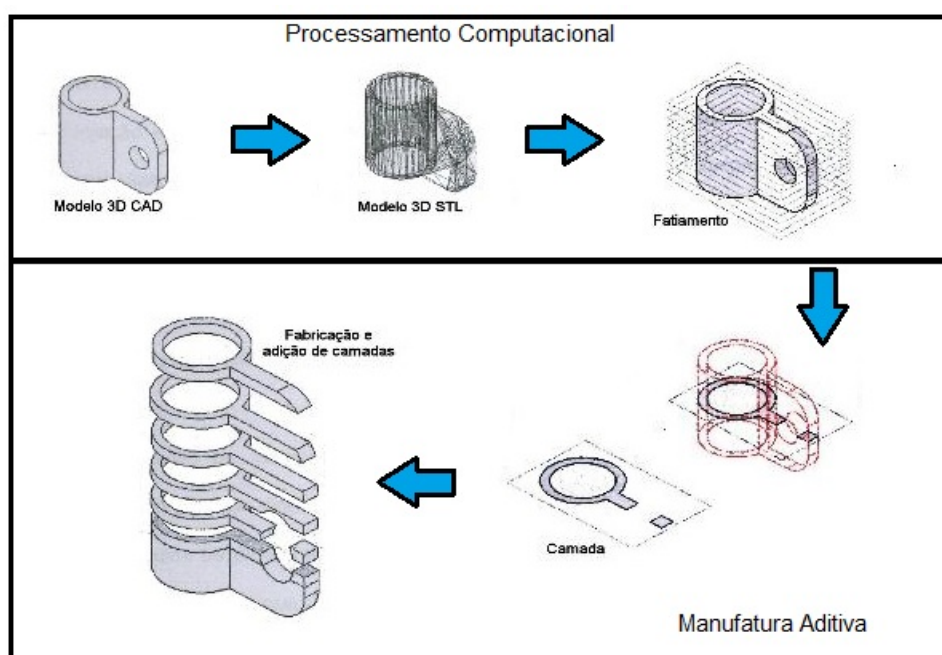


Fig. 2. Construção de um modelo virtual utilizando a manufatura aditiva.
(Adaptado de Bessa, 2013)

A manufatura aditiva é um recente processo de fabricação, desenvolvido no final da década de 80, visando a construção por camadas, ou seja, de uma maneira diferente aos métodos convencionais, como por exemplo os processos de fabricação com remoção de material. Este processo é formado por um conjunto de tecnologias capazes de reproduzir fisicamente, em diversos tipos de materiais, um modelo virtual, seja este complexo ou não, de forma automatizada. Esta tecnologia passa por dois processos conhecidos como computacional e de manufatura aditiva (Fig. 2). No processamento computacional a construção do modelo virtual é realizada através de um sistema *CAD* (*Computer Aided Design*) e gerando um arquivo de fatiamento digital em extensão *STL* (*Standard Triangulation Language*). No processo de manufatura aditiva, o modelo virtual é construído camada a camada através de uma máquina até que o modelo tridimensional esteja completo [10].

Diversas variações de máquinas de manufatura aditiva foram criadas para satisfazer todas as necessidades, sendo assim elas foram divididas em três grandes grupos, segundo a matéria-prima utilizada: baseados em sólidos, líquidos e pós [9, 10]. Biomodelos podem ser confeccionados em diversos tipos de mate-

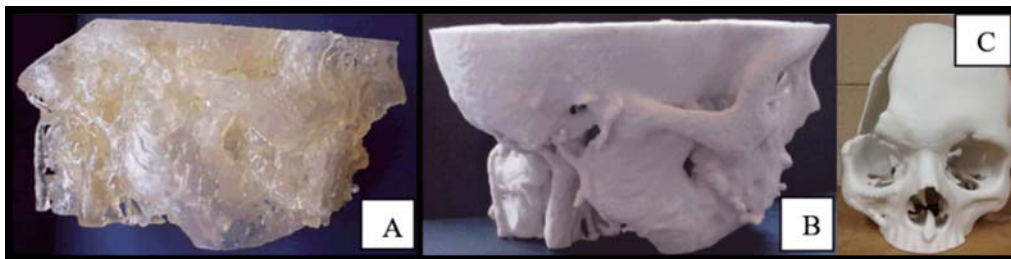


Fig. 3. Biomodelo translúcido obtido por SL (A), biomodelos opacos obtido por SLS (B) e por 3DPrinter (C). (Adaptados de Meurer *et al.*, 2007)

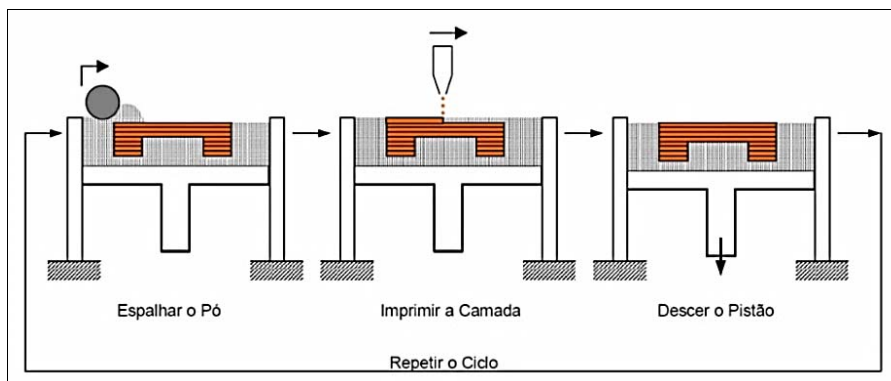


Fig. 4. Funcionamento da técnica 3DPrinter. (Volpato *et al.*, 2007)

riais (Fig. 3), para isso são utilizadas técnicas de manufatura aditiva diferentes, como por exemplo a este-reolitografia (SL) quando se necessita de um modelo translúcido para o estudo de cavidades internas, em contrapartida quando há necessidade de um estudo sobre a superfície de um modelo, a cor opaca é dese-jada então utiliza-se, como por exemplo, a sinterização seletiva a laser ou a 3Dprinter [5].

A técnica 3Dprinter (Fig. 4) provém dos processos baseados em pó e possui grande similaridade a im-pressoras jatos de tinta comerciais. No início da confecção dos modelos, a impressora espalha e nivela na plataforma de construção uma quantidade de matéria-prima na forma de pó, preparando a camada. Poste-riormente um cabeçote de impressão realiza a liberação de um aglutinante (*binder*) sobre esta camada recém-formada realizando a reação química necessária e consolidando a camada. A cada ciclo finalizado uma camada bidimensional do modelo é confeccionada, logo a soma das camadas resulta em um modelo tridimensional [10].

As máquinas e as matérias-primas das técnicas de manufatura aditiva são de alto custos, criando um distanciamento entre as novas tecnologias em sua aplicação dentro de centros cirúrgicos. Diante desta dificuldade, diversas pesquisas estão sendo realizadas para a redução de custo, sejam em máquinas ou em matéria-prima, com o objetivo de viabilizar e difundir este novo processo de fabricação em diversas áreas da medicina moderna.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A matéria prima utilizada na técnica 3DPrinter deve possuir algumas características ímpares para um bom sucesso da construção dos modelos, como fluidez do material em pó para uma distribuição homogê-nea, alto fator de empacotamento das partículas, não seja higroscópico, possua bom acabamento superfí-cial após a camada ser depositada e a spessura da camada deve ser maior do que as dimensões dos aglo-merados.

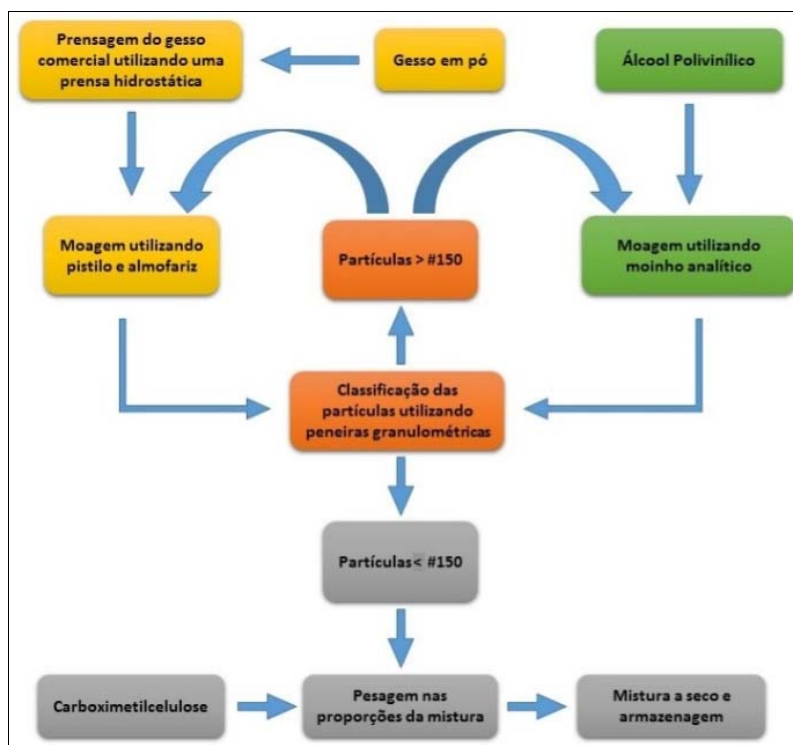


Fig. 5. Etapas do processo de preparação do material alternativo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através estas características, o material alternativo desenvolveu-se seguindo as recomendações de Meira (2013), sendo sua composição de 94 Vol.% de gesso em pó (Marca Ingenor), 5 Vol.% de ligante (Poli Vinil Ácool) e 1 Vol.% de agente higroscópico (Carboximetilcelulose). O fluxograma da Fig. 5 demonstra as etapas da preparação do material alternativo.

O material comercial é produzido pela empresa Zcorporation™ e foi gentilmente cedido pelo Instituto Nacional de Biofabricação (INCT – Biofabris) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp).

Utilizou-se também uma impressora tridimensional conhecida como ZPrinter 310 Plus da empresa ZCorporation™ para a confecção das amostras, com camadas de 0,1mm de espessura.

O aglutinante (*binder*) utilizado para os dois materiais é composto de agentes reativos, emolientes, lubrificantes e estabilizantes (90 Vol.% de água destilada, 5 Vol.% de álcool isopropílico, 4,5 Vol.% de glicerina e 0,5 Vol.% de extran).

Como a técnica de banho em resina de cianoacrilato é muito utilizada após a impressão de peças, para o ganho de resistência mecânica, as amostras foram separadas em dois grupos:

- Como manufaturados (peças verdes);
- Com banho de resina em cianoacrilato TEKBOND® 721 de baixíssima viscosidade, em torno de 1,5 a 5 CPS.

Utilizou-se o equipamento MTS 810 localizado no laboratório de Ensaio Mecânicos do DEMM/FEM da Unicamp para as análises de resistência mecânica. Para a realização dos ensaios foram utilizadas as normas C1161-13 para os ensaios de flexão e a C1424-10 para os ensaios de compressão. As dimensões dos corpos de prova são: 6x4x40mm (flexão) e Ø7x14mm (compressão).

Utilizou-se o equipamento EVO LS15 Zeiss® localizado no laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) a fim de verificar a qualidade superficial e porosidade dos materiais.

Análises físicas de densidade e fidelidade dimensional também foram realizadas utilizando balança digital de alta precisão e paquímetro.

3. DISCUSSÃO E RESULTADOS

3.1. Caracterização dos materiais

Inicialmente realizaram-se análises de MEV com os materiais em forma de pó a fim de verificar o aspecto morfológico das partículas (Fig. 6).

É possível observar que as partículas possuem geometria irregular e estão distribuídas majoritariamente em partículas pequenas e algumas outras de maior tamanho. Esta distribuição contribui para o aumento da densidade das peças impressas.

Algumas análises realizadas neste material comercial pelo Prof. Carlos Alberto Fortulan da EESC-USP reforçam que a geometria das partículas não possui uma forma arredondada e apresentam uma distribuição granulométrica bimodal em torno de 10 μm e 50 μm , característica que promove uma boa fluidez e empacotamento das partículas durante a impressão de peças [11].

Análises realizadas utilizando o equipamento *Malvern Mastersizer 2000* revelam que os tamanhos das partículas estão distribuídos entre 0,4 μm e 120 μm , com uma média de tamanho em torno de 46,33 μm [3].

A Fig. 7 mostra os aspectos morfológicos das partículas do material alternativo através das análises de MEV.

As partículas do material alternativo não possuem geometria bem definida e são constituídas por um aglomerado de partículas pequenas junto a outras maiores. A inclusão do ligante na preparação do material alternativo tem como objetivo esta aglomeração para facilitar o acesso do aglutinante com o pó na fabricação das peças, melhorando a reação química que consolidará as camadas [6].

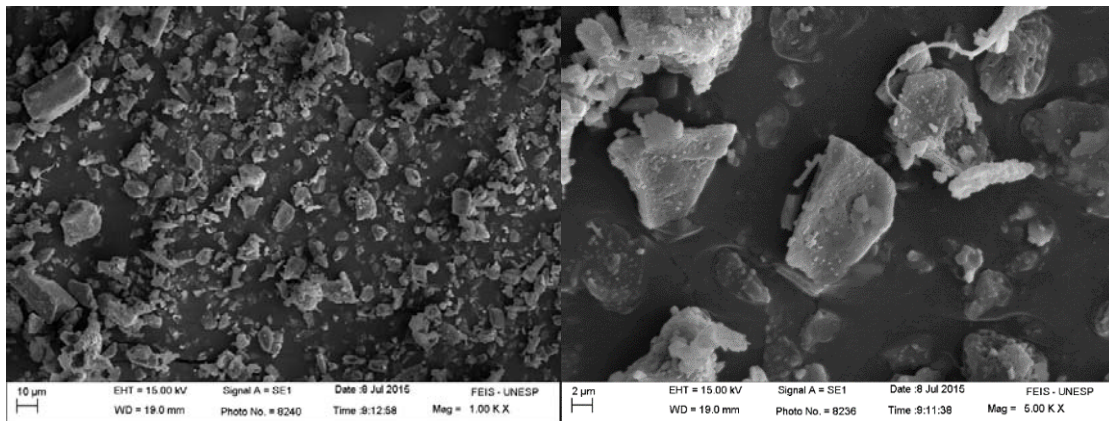


Fig. 6. Aspecto morfológico das partículas do material comercial.
Fonte: Elaborado pelo autor.

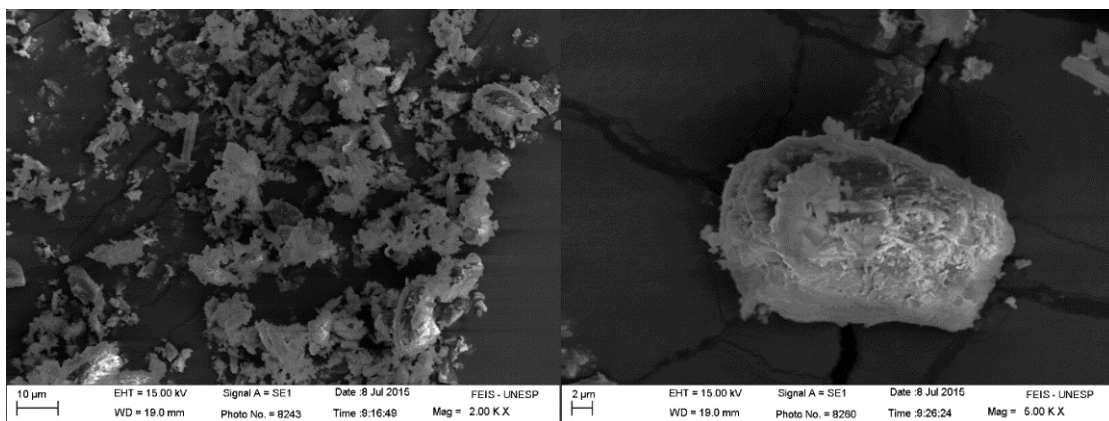


Fig. 7. Aspecto morfológico das partículas do material alternativo.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1. Resultados obtidos das análises mecânicas e físicas das amostras na condição como manufaturadas.

Material	Ensaio de Flexão			Ensaio de Compressão			Densidade (g/cm ³)	
	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)		Tensão Máxima (MPa)
Comercial	40,25±0,06	6,28±0,06	4,12±0,04	1,46±0,21	7,15±0,05	14,30	1,87±0,19	1,162
Alternativo	39,97±0,06	6,30±0,03	4,28±0,06	0,64±0,10	7,12±0,07	14,40	0,45±0,06	0,82

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2. Caracterização das amostras na condição como manufaturada

As análises mecânicas e físicas das amostras na condição como manufaturadas (peças verdes) estão demonstradas na tabela 1.

Observa-se que o material comercial na condição como manufaturado apresentou uma resistência mecânica superior diante dos ensaios realizados, devido ao seu processo de fabricação, que alia a utilização de métodos industriais e matérias-primas de alta qualidade. No entanto, os modelos fabricados pelo processo de impressão tridimensional devem possuir resistência mecânica suficiente apenas para o manuseio, característica necessária para a manipulação dos objetos, sendo assim, o material alternativo desenvolvido atendeu satisfatoriamente este requisito.

O ligante PVA proporcionou um desempenho superior na aglomeração das finas partículas de gesso, aumentando o acesso do aglutinante as camadas fabricadas, melhorando a reação química, e aumentando a resistência mecânica e densidade dos manufaturados, quando comparados ao trabalho de Meira (2013).

Para se entender a diferença do comportamento mecânico destes materiais, foram realizadas fractografias (Fig. 8) das amostras de ensaio de flexão.

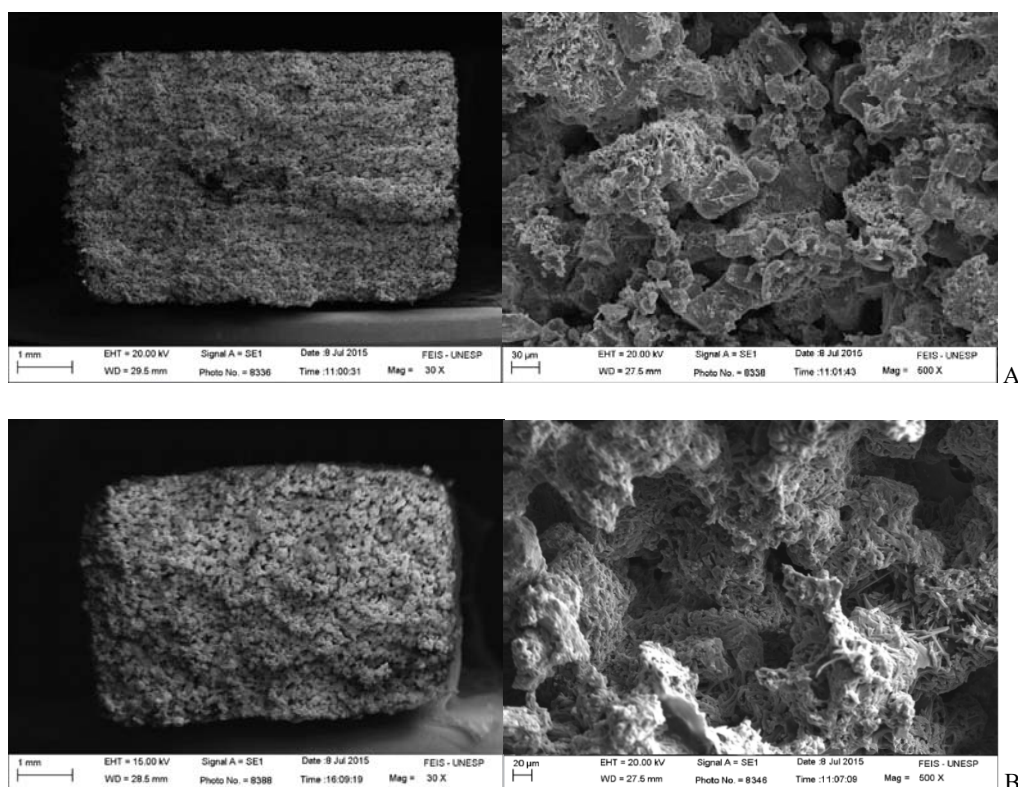


Fig. 8. Fractografia das amostras com material comercial (A) e alternativo(B) na condição como manufaturada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

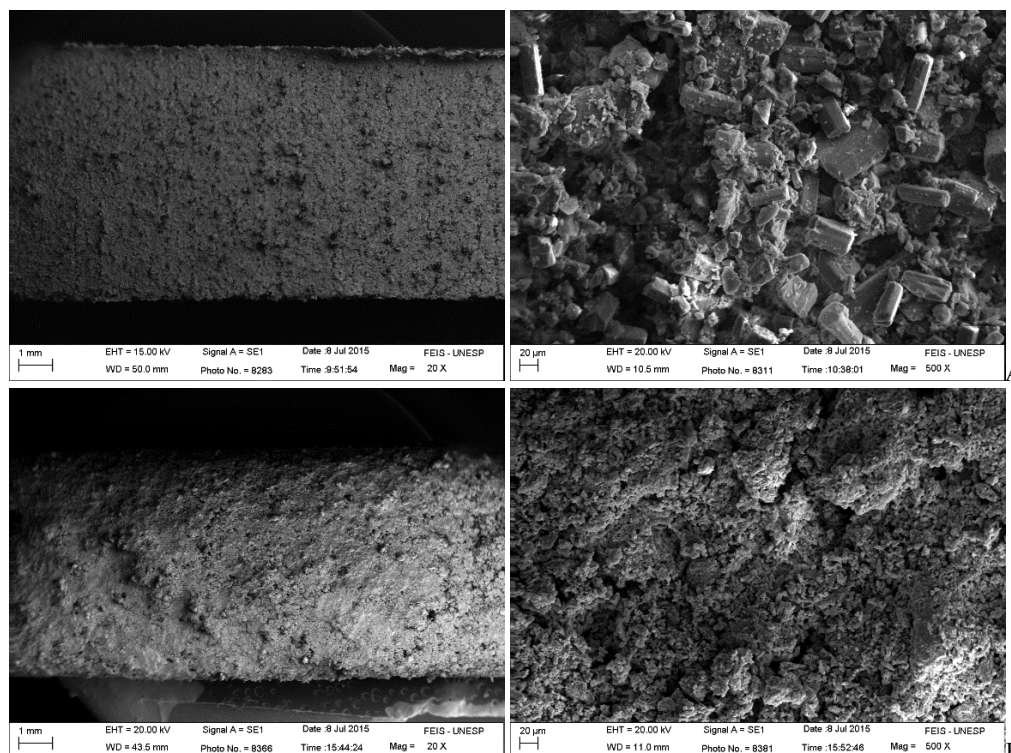


Fig. 9. Superfície das amostras com material comercial (A) e alternativo (B) na condição como manufaturada.
Fonte: Elaborado pelo autor.

As amostras demonstram possuir grande porosidade em seu interior, devido a reação química entre o aglutinante quando entra em contato com o pó dos materiais. Esta reação cria pequenos aglomerados, como podem ser observados na região da fratura, porém nas amostras com material comercial estes aglomerados são bem menores do que no material alternativo, proporcionando camadas mais uniformes, aumentando sua densidade e resistência mecânica.

Para analisar a qualidade superficial das amostras como manufaturadas (Fig. 9), realizaram-se análises de MEV.

As amostras com material alternativo demonstraram a presença de uma superfície mais irregular e com arestas menos definidas (abaulamento dos cantos vivos). O tamanho das partículas influencia muito na qualidade das camadas produzidas, por isso deve-se utilizar partículas menores que o tamanho da camada a ser depositada, porém uma faixa muito grande de tamanhos também proporciona esta irregularidade. Sendo assim, o material comercial demonstrou uma superfície mais regular e arestas bem definidas quase que por toda sua extensão, proporcionando uma amostra de espessura mais homogênea, como pode ser visto na tabela 1, os valores de altura ($14,30 \pm 0,00$ mm) e espessura ($4,12 \pm 0,04$ mm) muito próximo dos valores do projeto virtual.

3.3. Caracterização das amostras na condição resinada

As análises mecânicas e físicas das amostras na condição resinadas estão demonstradas na tabela 2.

Tabela 2. Resultados obtidos das análises mecânicas e físicas das amostras na condição resinada.

Material	Ensaio de Flexão			Ensaio de Compressão			Densidade (g/cm ³)	
	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)		Tensão Máxima (MPa)
Comercial	40,41±0,05	6,54±0,06	4,24±0,10	9,65±1,11	7,36±0,07	14,34	17,40±1,90	1,42
Alternativo	40,09±0,12	6,62±0,08	4,54±0,07	11,76±1,09	7,43±0,09	14,30	18,56±0,96	1,18

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3. Comparação entre os ganhos de resistência mecânica e densidade dos materiais.

Material	Amostras como manufaturada	Amostras Resinadas	Ganho
	Ensaio de Compressão Tensão Máxima (Mpa)		
Comercial	1,87	17,4	830%
Alternativo	0,45	18,56	4024%
Ensaio de Flexão Tensão Máxima (Mpa)			
Comercial	1,46	9,65	561%
Alternativo	0,64	11,76	1738%
Densidade (g/cm ³)			
Comercial	1,17	1,42	21%
Alternativo	0,82	1,18	44%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que após o pós-processamento de banho em resina de cianoacrilato, o material alternativo se demonstrou mais resistente, devido ao fato de possuir maior porosidade, facilitando a absorção de resina, que em seu estado endurecido possui uma resistência mecânica muito elevada em relação ao gesso. A técnica de pós-processamento se demonstrou muito mais eficiente no material alternativo, como pode ser visto na tabela 3.

Observa-se que o material alternativo com suas características singulares, após o pós-processamento de banho em resina de cianoacrilato, proporciona um ganho de aproximadamente 4,4 vezes maior em relação a resistência de compressão e 2,8 vezes maior em relação a resistência de flexão, como também aumenta em torno de 2,1 vezes a capacidade de absorver a resina, demonstrando um grande rendimento nesta aplicação.

Para se entender a diferença do comportamento mecânico destes materiais, foram realizadas fractografias (Fig. 10) das amostras de ensaio de flexão.

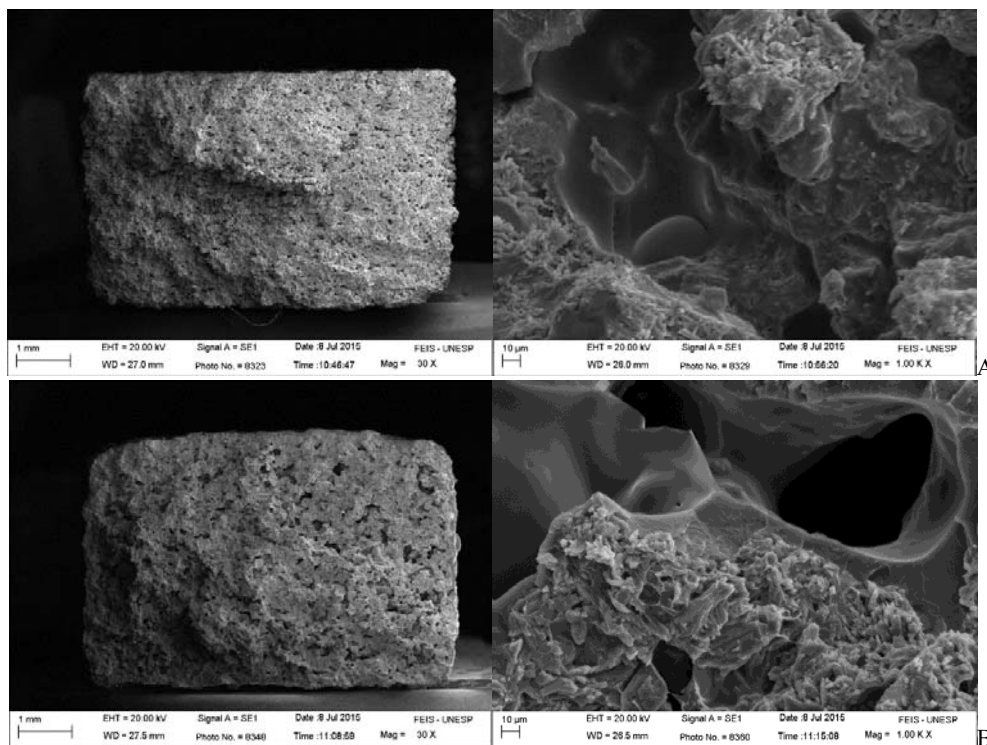


Fig. 10. Fractografia das amostras com material comercial (A) e alternativo (B) na condição resinada.

Fonte: Elaborada pelo autor.

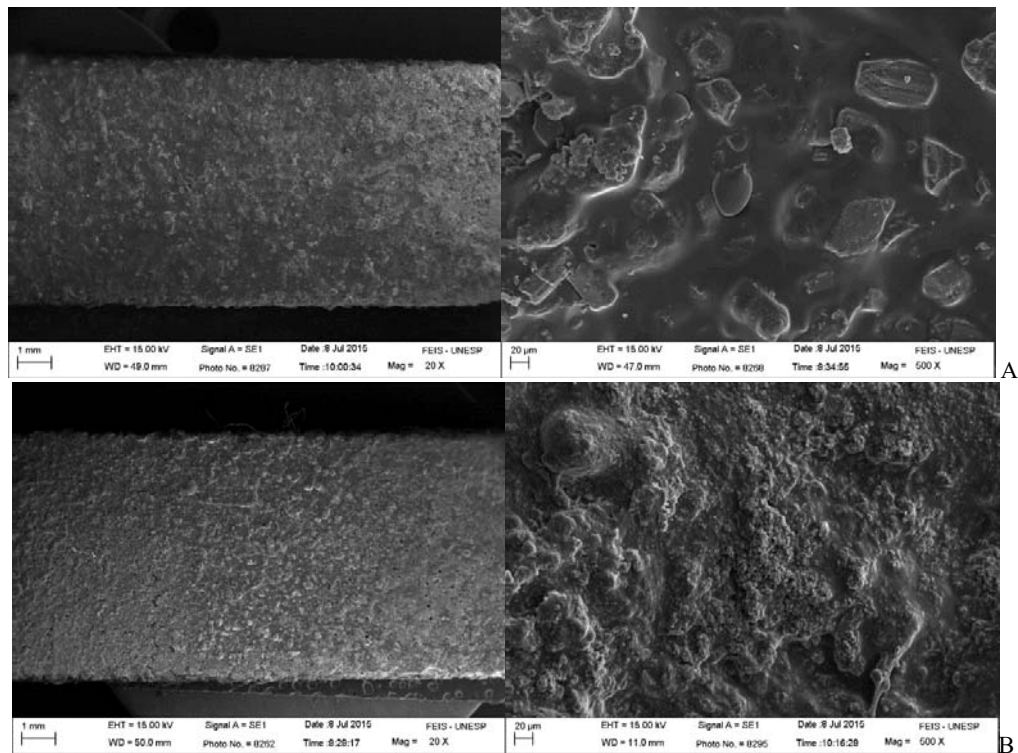


Fig. 11. Superfície das amostras com material comercial (A) e alternativo (B) na condição resinada.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que as amostras absorveram a resina de cianoacrilato em seu interior, devido à baixíssima viscosidade, em torno de 1,5 a 5 CPS. A concentração de resina absorvida diminuiu de acordo com a penetração, pois durante o processo de cura a mesma se adere aos aglomerados perdendo a capacidade de escoar dentro do material. A maioria das cavidades dos poros foram preenchidas por resina, logo conclui-se que a porosidade, neste caso específico, se mostrou benéfica, aumentando a densidade e a resistência mecânica das amostras confeccionadas por manufatura aditiva.

Para analisar a qualidade superficial das amostras como manufaturadas (Fig. 11), realizaram-se análises de MEV.

Observa-se que as amostras com material comercial obtiveram uma camada na superfície com maior presença da resina de cianoacrilato, em contrapartida as amostras com material alternativo, por absorverem mais facilmente a resina, criaram um pequeno filme sobre as partículas.

3.4. Exemplos impressos

Alguns exemplos (Fig. 12) foram impressos para demonstrar a capacidade do material alternativo de baixo custo replicar ou substituir peças e modelos impressos com material comercial de alto custo.



Fig. 12. Impressão de peças e modelos com material alternativo (todas as peças da esquerda da dupla) e com material comercial (todas as peças da direita da dupla).

Fonte: Elaborada pelo autor.

4. CONCLUSÕES

O material alternativo proposto para este estudo promoveu com sucesso a manufatura de peças e amostras, como também proporcionou resistência mecânica suficiente para o manuseio e aplicação de pós-processamento de banho em resina de cianoacrilato.

O material comercial possui resistência mecânica e qualidade superficial superior quando utilizado na condição como manufaturado, mas como a prática de pós-processamento é usualmente empregada após a impressão das peças, o material alternativo se mostrou mais eficiente para absorção da resina, aumentando sua resistência mecânica e densidade.

O material alternativo por sua vez demonstrou que a porosidade pode ser utilizada como uma característica importante para um banho de resina com mais eficiência.

Para a composição do material alternativo foram gastos, no ano de 2015, em torno de R\$5,17 por kg de material, enquanto o material comercial utilizado para este trabalho custa em torno de 121 vezes mais. Esta grande diferença entre custos serve de diretriz para a melhora deste material e em um futuro próximo ser utilizado na confecção de biomodelos que auxiliam no planejamento de cirurgias complexas em centros cirúrgicos de todo país.

REFERÊNCIAS

- [1] Antas, A.F.F., Utilização das tecnologias de prototipagem rápida na área médica. Dissertação (Mestrado em Design Industrial) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Escola Superior de Artes e Design de Matosinhos, Porto (2007)
- [2] Bessa, J.S., Prototipagem rápida: engenharia do produto. São Paulo: Faculdade de Pitágoras (2015)
- [3] Budding, A., Vaneker, T.H.J., “New strategies for powder compaction in powder-based rapid prototyping techniques”, *Procedia CIRP*, Amsterdam, 6, 527-532 (2013)
- [4] Ferraz, E.G., Efeito do processamento de reconstruções tridimensionais virtuais para confecção de biomodelos de prototipagem rápida: estudo experimental em mandíbulas secas humanas. Dissertação (Mestrado em Odontologia - Clínica Odontológica) - Faculdade de Odontologia, Universidade Federal da Bahia, Salvador (2009)
- [5] Gouveia, M.F., Aplicação da prototipagem rápida no planejamento de cirurgias craniofaciais. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (2009)
- [6] Meira, C.R. *et al.*, “Desenvolvimento de pó à base de gesso e binder para prototipagem rápida”, *Cerâmica*, São paulo, **59**(351), 401-408 (2013)
- [7] Meurer, E. *et al.*, “Os biomodelos de prototipagem rápida em cirurgia e traumatologia bucomaxilofacial”, [S. l.]: Blog Ortodontia Contemporânea (2015)
- [8] Miyashita, E.R., Avaliação das tensões ósseas geradas por prótese obturadora maxilar classe iv de aramany por meio da análise de elementos finitos. Dissertação (Mestrado em Oodontologia – Prótese Buco Maxilo Facial) - Faculdade de Odontologia, Universidade de São Paulo, São Paulo (2008)
- [9] Silva, G.C., Kaminski, P.C., “Prototipagem rápida aplicada às peças utilizadas em ensaios estáticos de embalagens para acondicionamento e transporte de peças automotivas”. In: *Congresso E Exposição Internacionais Da Tecnologia Da Mobilidade*, 16. São Paulo. Anais. [S. l.: s. n.] 1-9 (2007)
- [10] Volpato, N., Ferreira, C.V., Santos, J.R.L., *Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações*. São Paulo: Edgard Blücher (2007)
- [11] Zavaglia, F.C., Síntese, caracterização e processamento de beta fosfato tricálcico para manufatura de implantes personalizados. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas (2011)

LOW COST ALTERNATIVE MATERIAL APPLIED TO A THREE-DIMENSIONAL PRINTING TECHNIQUE 3DPRINTER TO OBTAIN BIOMODELS

Abstract – Biomodels in various materials have been developed to aid the planning of complex surgeries, such as skull reconstruction. Obtaining these biomodels it is based on the execution of three basic steps: acquisition of two-dimensional images, treatment of these images via modeling software and biomodel manufacture by additive manufacturing. A set of technologies provided the physical reproduction of a complex model in various types of materials, automatically, from a virtual model using three-dimensional printing. Very similar to a commercial printer inkjet, the printing of biomodels is through successive layers of bonded powder by a liquid called binder. Consumables used in this technique have high market value, preventing the use of three-dimensional printing technique more often. This work aimed to the preparation of a low cost alternative material based on plaster, in order to compare strength and surface quality with commercial materials widely accepted in the national market. The discussions and conclusions deal with comparative analysis of materials by means of mechanical strength, grain size and morphology of the powder, surface quality and the use of cyanoacrylate resin as post-processing, since the latter is common practice for most manufactured objects.

Keywords – Three-dimensional printing, Additive manufacturing, Alternative material, Biomodels.