

Impressão 3D: materializando o virtual

3D printing: materializing the virtual world

Marlos Loiola¹
Wendel Shibasaki¹
Lucineide Lima²
Maria Cecília Seixas³
Sergio Ribeiro⁴
Thais Maria Poleti⁵
Ricardo Danil Guiraldo⁶
Luiz Gonzaga Gandini⁷
Flavio Cotrim-Ferreira⁸

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi explanar sobre as tecnologias de impressão 3D existentes no mercado, suas características, incluindo os materiais utilizados e suas aplicações na Ortodontia. A impressão 3D está se tornando um assunto de crescente interesse na Ortodontia, apresentando vantagens como a substituição dos modelos de gesso e a confecção de alinhadores, contenções e outros aparelhos customizados, além de permitir um melhor planejamento do caso. Entretanto, existem vários tipos de tecnologias de impressão 3D e materiais disponíveis que podem ser utilizados. As principais características a serem observadas pelo profissional na escolha de um método de impressão 3D são: a precisão, o tempo de impressão, o custo da execução e dos materiais utilizados, e a necessidade de pós-processamento e de operador qualificado. Concluiu-se que através de dados digitais podem ser criados protótipos de várias formas e materiais, que facilitam o diagnóstico e planejamento, além de possibilitar a comunicação a distância entre profissionais. As impressoras 3D estão se tornando mais acessíveis, porém o custo da execução, dos materiais utilizados e da manutenção da máquina, a necessidade de pós-processamento e de operador qualificado são questões ainda a serem consideradas.

Unitermos – Ortodontia; Impressão tridimensional; Prototipagem rápida.

ABSTRACT

The aim of this work was to explain the 3D printing technologies on the market, their characteristics, including the materials used, and their applications in orthodontics. 3D printing is becoming a matter of growing interest in orthodontics, presenting advantages such as replacement of plaster models and the fabrication of aligners, restraints and other custom appliances, as well as better case planning. However, there are several types of 3D printing technologies and materials available that can be used. The main features to be observed by the professional in choosing a 3D printing method are: accuracy, printing time, cost of execution and materials used, and the need for post-processing and qualified operator. It was concluded that through digital data, prototypes of various forms and materials can be created, which facilitate diagnosis and planning, as well as enabling distance communication between professionals. 3D printers are becoming more affordable, but the cost of running, materials used and maintaining the machine, the need for post-processing and qualified operator are still issues to consider.

Key words – Orthodontics; Three-dimensional printing; Rapid prototyping.

¹Alunos do programa de pós-graduação em Ciências Odontológicas (doutorado em Ortodontia) – Unesp Araraquara.

²Aluna do programa de pós-graduação em Odontologia (doutorado em Dentística) – Unopar Londrina.

³Aluna do programa de pós-graduação em Odontologia (mestrado em Ortodontia) – Unopar Londrina.

⁴Especialista em Imaginologia – BMF FOB-USP, Bauru; Professor convidado especializações EBMS e ABO; Responsável técnico – Imagem Pierre Fauchard.

⁵Mestrado, doutorado e pós-doutorado – FOB-USP, Bauru; Professora e coordenadora da pós-graduação stricto sensu em Odontologia – Unopar.

⁶Doutor em Materiais Dentários – FOP/SP; Professor da graduação e pós-graduação – Unopar.

⁷Doutor em Ortodontia e professor – Foar/Unesp; Pós-doutorado em Ortodontia e professor do Depto. de Ortodontia – Baylor College of Dentistry, Dallas/EUA; Professor do Depto. de Ortodontia – Saint Louis University, Saint Louis/EUA.

⁸Mestre em Ortodontia e doutor em Diagnóstico Bucal – Fousp; Professor associado dos cursos de graduação em Odontologia, especialização e mestrado em Ortodontia – Unicid; Editor científico – Revista OrtodontiaSPO.

Introdução

Avanços da tecnologia digital estão mudando o cenário da Ortodontia. Um dos mais recentes é a incorporação de tecnologias de impressão tridimensional (3D) a partir de arquivos digitais¹. Embora a impressão 3D tenha surgido há muitos anos, a implementação de impressoras 3D na Ortodontia aumentou significativamente na última década, e isso se deve em parte à redução dos custos e à melhor precisão, o que a tornou acessível aos ortodontistas².

A impressão tridimensional pode ser utilizada para converter um modelo digital em um modelo físico (Figura 1), pois apesar de os modelos digitais terem vantagens sobre o físico³⁻⁴ em algumas ocasiões, como confecção de alinhadores, contenções e outros aparelhos, eles são necessários⁵.



Figura 1

Impressão 3D de modelo anatômico de paciente com dente incluído.

No entanto, alguns fatores precisam ser considerados ao selecionar e aplicar uma impressora 3D em Ortodontia, como resolução da impressora, custo (incluindo manutenção e materiais) e tempo de impressão. A orientação de impressão, etapas de pós-processamento necessárias e volume de impressão são algumas considerações adicionais importantes que podem afetar a precisão da parte impressa¹.

Nesse contexto, o objetivo desta revisão de literatura é explicar sobre as tecnologias de impressão 3D existentes no mercado, suas características, incluindo os materiais utilizados e suas aplicações na Ortodontia.

Revisão da literatura

O termo impressão 3D é geralmente usado para descrever uma abordagem de fabricação que constrói objetos por camadas. Esse processo é mais corretamente descrito como manufatura aditiva e também é conhecido como prototipagem rápida⁶.

Tecnologias de impressão 3D não são todas novas; muitas modalidades em uso hoje foram desenvolvidas e usadas pela primeira vez no final da década de 1980 e 1990⁷. No entanto, o termo “impressão 3D” é relativamente novo e o primeiro paciente a ser tratado com a ajuda desse tipo de impressão data de 1999. O desenvolvimento da tecnologia de *software* em computadores e aplicativos são alguns dos fatores responsáveis pelas mudanças tecnológicas que levaram a impressão 3D para onde ela está hoje. Para que a impressão 3D tenha valor, precisamos criar objetos para imprimir; o uso do *software* CAD nos permite sua criação a partir do zero⁸.

O diagnóstico, planejamento e a evolução do tratamento ortodôntico são realizados utilizando vários recursos, dentre eles os modelos dos arcos dentários. Os modelos de gesso

tradicionais são pesados e volumosos, podem sofrer danos permanentes e são de difícil utilização e compartilhamento, quando necessário um planejamento integrado entre profissionais. Além disso, o seu armazenamento requer um espaço físico considerável. Para localizá-los, é preciso um tempo extra e, quando do término do tratamento, a manutenção destes por um período prolongado é necessária por motivos legais⁹⁻¹⁰.

Uma alternativa aos modelos físicos seria a utilização de modelos digitais obtidos através da digitalização dos modelos ou moldagens¹⁰⁻¹¹. Um método direto de aquisição do modelo digital é o escaneamento intraoral, método que pode substituir os modelos de gesso e cuja necessidade é demonstrada por meio de diversos estudos^{9,12-13}.

A impressão dos modelos digitais passou a ser possível com o surgimento de impressoras 3D, que permitem obter uma cópia física fidedigna de uma imagem digital de maneira prática, fácil e barata⁹⁻¹⁰. Além disso, os procedimentos CAD/CAM na Ortodontia são utilizados para projetar e fabricar aparelhos ortodônticos customizados,

fos pré-contornados personalizados e guias de colagem indireta (Figura 2)^{9,14}. Essa tecnologia é utilizada também para a confecção de alinhadores (Figura 3)¹⁵ e contenções ortodônticas^{9,16}.

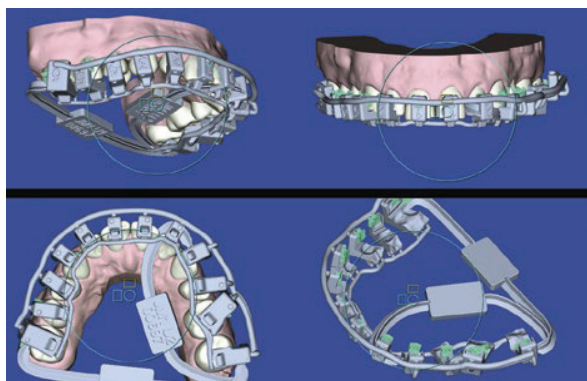


Figura 2

Planejamento do guia de colagem indireta no software Elementrix.

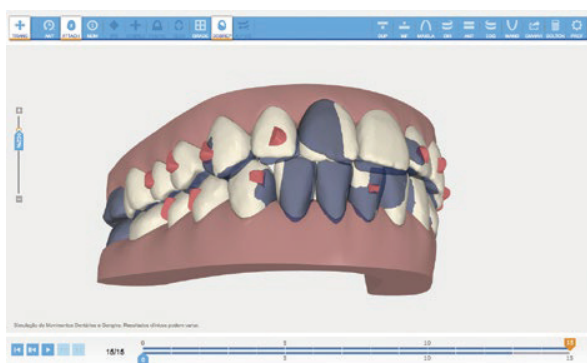


Figura 3

Planejamento de alinhadores no software ClinCheck Invisalign.

Existem muitas tecnologias de impressão diferentes, cada uma com suas vantagens e desvantagens. Infelizmente, os equipamentos funcionais e produtivos têm como características o alto custo, os materiais, a manutenção e o reparo¹⁷.

Um aparelho de estereolitografia (SLA) utiliza um *laser* de varredura para construir o objeto por camadas, uma de cada vez, utilizando uma cuba de resina fotopolimerizável. Cada camada é traçada pelo *laser* na superfície da resina líquida, ponto em que uma "plataforma de construção" desce e outra camada de resina é adicionada sobre a superfície, e o processo se repete até a formação do objeto. Esse processo é caro quando usado para objetos grandes, mas essa tecnologia é comumente usada na Odontologia para a produção de guias de implante impressos em 3D¹⁷.

Sabendo que as tecnologias de impressão tridimensionais dependem de uma série de variáveis associadas ao processo

de materialização e que estas podem afetar a precisão e a utilidade clínica dos modelos, um estudo realizado em 2017¹ avaliou o efeito da altura da camada de impressão sobre a precisão de modelos ortodônticos impressos usando uma impressora de formato SLA e comparou a precisão de modelos ortodônticos fabricados com várias impressoras 3D comercialmente disponíveis. Trinta e seis modelos idênticos foram impressos, com alturas de três camadas (12 por grupo): 25, 50 e 100 μm . Quarenta e oito modelos adicionais foram impressos usando quatro impressoras 3D disponíveis comercialmente (12 por grupo). Cada modelo impresso foi digitalizado e comparado com o arquivo de entrada por meio de análise de superposição usando um algoritmo de melhor ajuste para avaliar a precisão. Diferenças estatisticamente significantes foram encontradas nos grupos de altura com camada de 25 e 100 μm , apresentando maiores e menores desvios, respectivamente. Os vários modelos de impressoras 3D ficaram dentro dos limites clinicamente aceitáveis. Os autores concluíram que a altura da camada pode afetar a precisão de um modelo ortodôntico impresso em 3D, mas o impacto deve ser considerado em relação às tolerâncias clínicas associadas à aplicação prevista¹.

O jateamento de polímero é uma tecnologia que utiliza materiais de resina fotopolimerizável e ponta de impressão semelhantes a de uma impressora de jato de tinta, para estabelecer camadas de polímeros que são polimerizados a cada passagem. Ela pode usar uma plataforma estacionária e uma ponta dinâmica ou vice-versa. Diversos materiais podem ser impressos, incluindo resinas, ceras para fundição e materiais borrachoides semelhantes ao silicone. Elas são úteis para a impressão de modelos odontológicos, mas que são caros quando produzidos dessa maneira¹⁷.

A prototipagem rápida ou impressão 3D é uma técnica que vem se desenvolvendo rapidamente, e pode desempenhar um papel significativo na eventual substituição de modelos de gesso. Um grupo de pesquisadores da Holanda, em 2014⁵, avaliou a precisão e a reprodutibilidade de modelos físicos reconstruídos a partir de dados digitais por meio de várias técnicas de prototipagem rápida. Doze modelos de gesso convencionais de indivíduos escolhidos aleatoriamente foram selecionados e serviram como padrão-ouro. Os modelos de gesso foram digitalizados e os arquivos foram convertidos em modelos físicos usando três técnicas de prototipagem rápida: processamento de luz digital, jateamento de fotopolímero e impressão tridimensional. Medições lineares nos modelos de gesso foram comparadas com medidas lineares nos modelos de prototipagem rápida. Todos os modelos foram medidos cinco vezes, com um intervalo de duas semanas entre as medições. Nesse estudo, concluíram que os modelos odontológicos reconstruídos pelas técnicas de prototipagem rápida foram considerados clinicamente aceitáveis em termos de

precisão e reprodutibilidade e podem ser apropriados para aplicações na Ortodontia⁵.

Em 2018, um estudo realizado com pesquisadores coreanos buscou avaliar a precisão e exatidão da impressão de modelos com impressoras tridimensionais (3D) através de diferentes técnicas de impressão¹⁸. Modelos digitalizados de um *typodont* com referências posicionadas previamente foram impressos cinco vezes, usando o aparelho de estereolitografia (SLA), processamento de luz digital (PLD), fabricação de filamento fundido (FFF) e a técnica PolyJet. Os modelos impressos em 3D foram digitalizados e avaliados quanto a medidas das referências nos dentes, arcos e oclusão. Concluíram que a técnica de impressão 3D apresentou diferenças significativas na precisão e exatidão dos dentes e dos arcos. As técnicas PolyJet e PLD foram mais precisas do que as técnicas FFF e SLA, sendo que a técnica PolyJet teve a maior precisão¹⁸.

Buscando comparar a acurácia de medidas entre os modelos de prototipagem rápida reconstruídos a partir de dados de modelo de estudo digital, foi realizado um estudo, em 2017¹⁹, objetivando comparar a concordância e precisão de medidas feitas com modelos de prototipagem rápida e de gesso para avaliar diferentes graus de apinhamento. Foram impressos dez conjuntos de modelos para cada categoria de apinhamento (leve, moderado e severo) e digitalizados usando um escâner de luz estruturada. Modelos de gesso e prototipados foram medidos usando paquímetros digitais para tamanhos de dente nos planos mesiodistal, vestibulo-lingual e de altura da coroa e para medidas de dimensão do arco. Houve diferenças estatisticamente significativas em todos os planos e em todas as categorias de apinhamento, exceto na altura de coroa no grupo de apinhamento moderado e nas dimensões do arco nos grupos de apinhamento leve e moderado. Os autores concluíram que os modelos de prototipagem rápida não foram clinicamente comparáveis aos modelos de cálculos convencionais, independentemente do grau de apinhamento¹⁹.

Os modelos fabricados com tecnologias de impressão tridimensionais vêm revolucionando a prática da Ortodontia, mas geralmente são compostos por materiais poliméricos que podem não ser adequados para certas aplicações, como aparelhos soldados. Para analisar esse comportamento, um estudo foi realizado com o intuito de investigar a acurácia dimensional e as propriedades mecânicas de modelos impressos em base cerâmicas tridimensionais antes e após diversos tratamentos destinados a melhorar suas propriedades mecânicas²⁰. Foram impressos trinta modelos a partir de um substrato à base de sulfato de cálcio e divididos em três grupos para tratamento: calor elevado (250°C por 30 minutos), baixo calor (150°C por 30 minutos) e tratamento com sal de Epsom. Um *scanner* a

laser foi utilizado para escanear cada modelo antes e após o tratamento e a estabilidade dimensional foi analisada por superposições digitais usando um algoritmo de melhor ajuste. Os modelos foram pesados antes e após o tratamento para avaliar as alterações de massa. Observou-se que o grupo de tratamento com sal de Epsom teve aumentos estatisticamente significativos, tanto no pico de estresse compressivo quanto no módulo de elasticidade quando comparado com os outros grupos de tratamento. Todos os grupos de tratamento tiveram alterações estatisticamente significativas na massa, com o grupo de sal de Epsom ganhando massa e os dois grupos de tratamento térmico perdendo massa. Concluiu-se que os modelos impressos tridimensionalmente com sulfato de cálcio e tratados com sal de Epsom mostraram melhora significativa nas propriedades mecânicas de compressão e mantiveram a estabilidade dimensional clinicamente aceitável²⁰.

Outra tecnologia utilizada para impressão 3D é a sinterização seletiva a *laser*, que está disponível desde meados da década de 80. Nesse processo, um *laser* de varredura funde um pó para construir estruturas camada a camada²¹. Os polímeros utilizados nesse processo possuem altos pontos de fusão e excelentes propriedades do material²².

Discussão

Tecnologias de impressão 3D não são todas novas; muitas modalidades em uso hoje foram desenvolvidas e usadas pela primeira vez no final da década de 1980 e 1990⁷. O desenvolvimento da tecnologia de *software* em computadores e aplicativos é um dos fatores responsáveis pelas mudanças tecnológicas que levaram a impressão 3D para onde ela está hoje⁸.

Uma alternativa aos modelos físicos seria a utilização de modelos digitais obtidos através da digitalização dos modelos ou moldagens¹⁰⁻¹¹. A impressão dos modelos digitais passou a ser possível com o surgimento de impressoras 3D, que permitem obter uma cópia física fidedigna de uma imagem digital de maneira prática, fácil e barata⁹⁻¹⁰.

Existem muitas tecnologias de impressão diferentes, cada uma com suas vantagens e desvantagens. Os equipamentos funcionais e produtivos têm como características o alto custo, os materiais, a manutenção e o reparo¹⁷. As tecnologias de impressão tridimensionais dependem de uma série de variáveis associadas ao processo de materialização, e estas podem afetar a precisão e a utilidade clínica dos modelos¹.

Tendo disponíveis diversas modalidades e materiais de impressão, é necessário conhecer as vantagens e desvantagens de cada equipamento (Tabela 1) para poder lançar mão daquela que mais se adapte à rotina de cada profissional.

TABELA 1 - MODALIDADES E MATERIAIS DE IMPRESSÃO

Modalidades e materiais de impressão em 3D		
Técnicas	Vantagens	Desvantagens
Resina fotopolimerizável		
Estereolitografia (SLA) - polímero sensível à luz, polimerizada camada por camada por um <i>laser</i> de varredura em um recipiente de polímero líquido.	Fabricação rápida. Capaz de criar formas complexas com alta resolução de recursos. Materiais de menor custo, se usados em grandes quantidades.	Disponível apenas com polímeros líquidos polimerizáveis por luz. A resina pode causar irritação por contato e inalação. Prazo de validade limitado. Não pode ser esterilizado por calor. Tecnologia de alto custo.
Photojet - o polímero sensível à luz é colocado em uma plataforma de compilação a partir de uma ponta de impressão do tipo jato de tinta, então é polimerizado camada por camada em uma plataforma descendente de incremento.	Relativamente rápido. Alta resolução, alta qualidade possível. Vários materiais disponíveis, várias cores e propriedades físicas, incluindo materiais elásticos. Tecnologia de baixo custo.	Material de suporte tenaz pode ser difícil de remover completamente. Material de suporte pode causar irritação na pele. Não pode ser esterilizado por calor. Materiais de alto custo.
DLP (processamento de luz digital) - resina líquida é polimerizada camada por camada por uma fonte de luz. O objeto é construído de cabeça para baixo em uma plataforma de elevação incremental.	Boa precisão, superfícies lisas, relativamente rápidas. Tecnologia de baixo custo.	Polímeros líquidos curáveis leves e materiais semelhantes à cera para fundição. A resina pode causar irritação por contato. Prazo de validade limitado. Não pode ser esterilizado por calor. Materiais de maior custo.
Pasta em pó		
Gesso ou material cimentício fixado por gotas de água (colorida) da ponta de impressão "jato de tinta". Objeto construído camada por camada em um leito de pó, em uma plataforma descendente incremental.	Materiais e tecnologia de baixo custo. Pode imprimir em cores. Material não ajustado fornece suporte a um processo relativamente rápido. Materiais seguros.	Baixa resolução. Baixa força. Não pode ser embebido ou esterilizado pelo calor.
Pó sinterizado		
Sinterização seletiva a <i>laser</i> (SLS) para polímeros. Objeto construído camada por camada por deposição de pó. A construção aquecida absorve a temperatura do material até um ponto abaixo do ponto de fusão.	Gama de materiais poliméricos, incluindo <i>nylon</i> , elastômeros e compósitos. Peças fortes e precisas. Geralmente, o <i>nylon</i> pode ser autoclavado. O objeto impresso pode ter funcionalidade mecânica completa. Materiais de menor custo se usados em grande volume.	Infraestrutura significativa necessária, por exemplo: ar comprimido, controle climático. Menor custo a granel. Risco de inalação. Tecnologia de alto custo. Superfície áspera.
Sinterização seletiva a <i>laser</i> (SLS) - para metais e ligas metálicas. Também descrito como fusão seletiva a <i>laser</i> (SLM) ou sinterização direta a <i>laser</i> de metal (DMLS). Sinterização a <i>laser</i> do metal em forma de pó, camada por camada em uma câmara de construção a frio.	Objetos de alta resistência podem controlar a porosidade. Variedade de materiais, incluindo titânio, ligas de titânio, cromo-cobalto, aço inoxidável. A liga de metal pode ser reciclada. Detalhes finos possíveis.	Tecnologia extremamente dispendiosa, materiais moderadamente caros. O pó e o condensado de nanopartículas podem ser perigosos para a saúde. Risco explosivo. Superfície áspera. No pós-processamento é necessário tratamento térmico. Processo relativamente lento.
Fusão de feixe de elétrons (EBM, Arcam). Câmara de construção aquecida. Pó sinterizado camada por camada, varrendo feixe de elétrons na plataforma de construção descendente.	Processo de alta temperatura, portanto não é necessário suporte ou tratamento térmico depois. Alta velocidade. Partes densas com porosidade controlada.	Tecnologia extremamente dispendiosa, materiais moderadamente caros. A poeira pode ser perigosa para a saúde. Risco explosivo. Superfície áspera. Resolução mais baixa.
Termoplástico		
Modelagem de Deposição Fundida (FDM) - primeira tecnologia 3DP, mais usada em impressoras "domésticas". Material termoplástico expelido através do bocal na plataforma de construção.	Alta porosidade. Resistência mecânica variável. Materiais e equipamentos de baixo a médio custo. Baixa precisão em equipamentos de baixo custo. Alguns materiais podem ser esterilizados por calor.	Materiais de baixo custo, mas limitados - apenas termoplásticos. Complexidade de forma limitada para materiais biológicos.

Fonte: Dawood 2015⁶.

Conclusão

A utilização de impressões 3D está gerando grandes avanços na Odontologia e, em particular, na Ortodontia. Através de dados digitais, podem ser criados protótipos de várias formas e materiais, que facilitam o diagnóstico e planejamento, além de possibilitar a comunicação a

distância entre profissionais. As impressoras 3D estão se tornando mais acessíveis, porém o custo da execução, dos materiais utilizados e da manutenção da máquina, a necessidade de pós-processamento e de operador qualificado são questões ainda a serem consideradas. Ainda assim, a prototipagem rápida está se tornando cada vez mais presente e importante na Ortodontia.

Referências

1. Favero CS, English JD, Cozad BE, Wirthlin JO, Short MM, Kasper FK. Effect of print layer height and printer type on the accuracy of 3-dimensional printed orthodontic models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2017;152(4):557-65.
2. Groth C, Kravitz ND, Jones PE, Graham JW, Redmond WR. Three-dimensional printing technology. *J Clin Orthod* 2014;48(8):475-85.
3. Costalos PA, Sarraf K, Cangialosi TJ, Efstratiadis S. Evaluation of the accuracy of digital model analysis for the American Board of Orthodontics objective grading system for dental casts. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2005;128(5):624-9.
4. Stevens DR, Flores-Mir C, Nebbe B, Raboud DW, Heo G, Major PW. Validity, reliability, and reproducibility of plaster vs digital study models: comparison of peer assessment rating and Bolton analysis and their constituent measurements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2006;129(6):794-803.
5. Hazeveld A, Huddleston Slater JJ, Ren Y. Accuracy and reproducibility of dental replica models reconstructed by different rapid prototyping techniques. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2014;145(1):108-15.
6. Andonovic V, Vrtanoski G. Growing rapid prototyping as a technology in dental medicine. *Mech Eng Sci J* 2010;29(1):31-9.
7. Strub JR, Rekow ED, Witkowski S. Computer-aided design and fabrication of dental restorations: current systems and future possibilities. *J Am Dent Assoc* 2006;137(9):1289-96.
8. van Noort R. The future of dental devices is digital. *Dent Mater* 2012;28(1):3-12.
9. Camardella LT, Vilella OV, van Hezel MM, Breuning KH. Accuracy of stereolithographically printed digital models compared to plaster models. *J Orofac Orthop* 2017;78(5):394-402.
10. Keating AP, Knox J, Bibb R, Zhurov AL. A comparison of plaster, digital and reconstructed study model accuracy. *J Orthod* 2008;35(3):191-201; discussion 175.
11. Bootvong K, Liu Z, McGrath C, Hagg U, Wong RW, Bendeus M et al. Virtual model analysis as an alternative approach to plaster model analysis: reliability and validity. *Eur J Orthod* 2010;32(5):589-95.
12. Naidu D, Freer TJ. Validity, reliability, and reproducibility of the iOC intraoral scanner: a comparison of tooth widths and Bolton ratios. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2013;144(2):304-10.
13. Wiranto MG, Engelbrecht WP, Tutein Nolthenius HE, van der Meer WJ, Ren Y. Validity, reliability, and reproducibility of linear measurements on digital models obtained from intraoral and cone-beam computed tomography scans of alginate impressions. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2013;143(1):140-7.
14. Ciuffolo F, Epifania E, Duranti G, De Luca V, Raviglia D, Rezza S et al. Rapid prototyping: a new method of preparing trays for indirect bonding. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2006;129(1):75-7.
15. Lagravere MQ, Flores-Mir C. The treatment effects of Invisalign orthodontic aligners: a systematic review. *J Am Dent Assoc* 2005;136(12):1724-9.
16. Al Mortadi N, Eggbeer D, Lewis J, Williams RJ. CAD/CAM/AM applications in the manufacture of dental appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2012;142(5):727-33.
17. Dawood A, Marti Marti B, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br Dent J* 2015;219(11):521-9.
18. Kim SY, Shin YS, Jung HD, Hwang CJ, Baik HS, Cha JY. Precision and trueness of dental models manufactured with different 3-dimensional printing techniques. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2018;153(1):144-53.
19. Wan Hassan WN, Yusoff Y, Mardi NA. Comparison of reconstructed rapid prototyping models produced by 3-dimensional printing and conventional stone models with different degrees of crowding. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2017;151(1):209-18.
20. Ledingham AD, English JD, Akyalcin S, Cozad BE, Ontiveros JC, Kasper FK. Accuracy and mechanical properties of orthodontic models printed 3-dimensionally from calcium sulfate before and after various postprinting treatments. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2016;150(6):1056-62.
21. Deckard C, Beaman JJ. Process and control issues in selective laser sintering. *ASME Prod Eng Div PED* 1988;33(1):191-7.
22. Ono I, Abe K, Shiotani S, Hirayama Y. Producing a full-scale model from computed tomographic data with the rapid prototyping technique using the binder jet method: a comparison with the laser lithography method using a dry skull. *J Craniofac Surg* 2000;11(6):527-37.