

## **Influência do tipo e da técnica de aplicação de agente infiltrante na resistência mecânica de componentes produzidos por manufatura aditiva (3DP)**

**(influence of the type and the technique of application of infiltrant agent in the mechanical resistance of components produced by additive manufacture (3DP))**

S. T. Mello<sup>1</sup>, N. C. Salles<sup>1</sup>R. C. Tokimatsu<sup>1</sup>

UNESP – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira /Departamento de Engenharia Mecânica –  
Ilha Solteira – SP, Brasil  
ruis.c.tokimatsu@unesp.br

### **Resumo**

Adotou-se a tecnologia de manufatura aditiva 3DP para estudar como a adição de diferentes agentes infiltrantes influenciam no acréscimo de densidade aparente e resistência mecânica de amostras feitas de componentes de gesso, constituídas por corpos de prova cilíndricos e prismáticos, de modo a simular a melhor composição para biomodelos. Para isto, o pós-processamento foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa, foram aplicados separadamente nas amostras, quatro tipos de adesivos à base de etilcianocrilato, por gotejamento, e um à base de epóxi, por moldagem com pá. Já na segunda etapa, foram aplicados nas amostras, também separadamente, quatro tipos de adesivos à base de etilcianocrilato, por gotejamento e banho de imersão, e um à base de epóxi, por moldagem com pá. Para ambas etapas, obteve-se o melhor resultado com o adesivo de cianocrilato de baixíssima viscosidade, o qual foi capaz de promover aumento de densidade aparente e de resistência mecânica.

**Palavras-chave:** 3DP. Biomodelos. Pós-processamento. Cianocrilato. Epóxi.

### **ABSTRACT**

3DP additive manufacturing technology was adopted to study how different infiltrating agents influence the increase in apparent density and mechanical strength of samples made of gypsum components, constituted by cylindrical and prismatic specimens, in order to simulate the best composition for biomodels. For this, post-processing was divided in two stages. In the first stage, separately, four types of ethylcyanoacrylate-based adhesives were applied on the samples by dripping, and one epoxy-based adhesive was applied by shovel molding. In the second stage, also separately, four types of ethylcyanoacrylate based adhesives were applied in the samples, by dripping and by dipping, and the epoxy-based, by shovel molding. Besides the adhesive application methods, the two stages also differ from the binders used to constitute the gypsum-based samples. For both steps, the best result was obtained by the cyanoacrylate adhesive with very low viscosity, capable of causing greater variations of density and additions of strength to the samples.

**Keywords:** 3DP. Biomodels. Post-processing. Cyanoacrylate. Epoxy.

## INTRODUÇÃO

Novas tecnologias no âmbito da manufatura aditiva têm sido desenvolvidas em decorrência da competitividade da indústria em termos de preços, melhorias incrementais, velocidade de impressão, precisão, matéria-prima e propósitos diferentes.

Em meados da década de 90, o MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) desenvolveu a tecnologia de impressão tridimensional 3DP. Logo em seguida, a empresa estadunidense *Z Corporation*, hoje *3D SYSTEMS*, adquiriu licença exclusiva para continuar o desenvolvimento e comercializar equipamentos baseados no princípio desta tecnologia[1].

A construção da peça é semelhante à impressão de uma imagem numa folha de papel por uma impressora a jato de tinta. Um rolo espalha e nivela o material em pó, contido num compartimento que se move verticalmente. Então, o pó é agregado por um fluido aglutinante denominado *binder*, depositado no material por um cartucho contido num cabeçote, que se move no eixo horizontal (Figura 1). Este fluido atua como um tipo de cola, agregando as partículas do pó. E assim a geometria 2D de cada camada vai sendo construída sucessivamente[2].

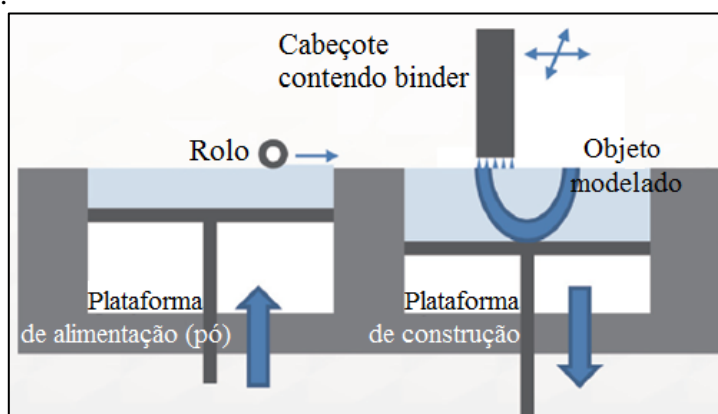


Figura 1 – Esquema de funcionamento da 3DP - Fonte: Adaptado[3] de Kim et al. (2016).

O pós-processamento se inicia com a limpeza e retirada do material em excesso ou ligeiramente fixado a peça. Em seguida, para conferir maior resistência e acabamento a peça, aplica-se uma resina adequada à mesma, que infiltrará na peça através de seus poros[1]. Estes agentes infiltrantes podem ser cera fundida, verniz, poliuretano, cianocrilato e epóxi[4]. Materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos são os materiais utilizados pela tecnologia 3DP[5].

A atuação da manufatura aditiva é tão vasta, que pode ir desde objetos fabricados com destino a educação, passando por peças para o setor automotivo e aeroespacial, até a atuação na área da saúde, revolucionando o atual mundo de diagnósticos e cirurgias, reproduzindo designs simples ou complexos e arrojados.

Há um grande interesse pela 3DP na área biomédica, onde peças com presença de poros é desejável, bem como a morfologia, distribuição e interconexão dos macro-poros. Nesta área os produtos em destaque são a alumina, a hidroxiapatita, a zircônia, e os cimentos baseados em apatitas[6, 7, 8]. No entanto, a baixa resistência mecânica e a baixa densificação são os obstáculos a serem superados, no momento, relativos à impressão tridimensional de cerâmicas[5]. Para isto ocorrer, deve-se utilizar os agentes infiltrantes mais adequados.

Porém, as tecnologias em geral necessitam de atenção especial a posteriori, de modo a aprimorar as qualidades de seus manufaturados. Para suprir esta exigência, de modo a atender o propósito requerido, os produtos devem passar por meio de tratamentos específicos. A variação dos componentes do tratamento, bem como o método de aplicação deste, irão influir

diretamente na melhoria destes produtos. Terminado o tratamento, o produto estará pronto para ser manipulado, conforme o setor que o requisitou.

Este trabalho teve como objetivo principal investigar como diferentes agentes infiltrantes podem influenciar nas propriedades mecânicas de peças concebidas por impressão tridimensional 3DP. Para tanto, estabeleceu-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar fisicamente e quantitativamente as variações dimensionais e de densidades de peças infiltradas por adesivos de cianocrilato (aplicados por técnicas de gotejamento e banho de imersão) e epóxi (moldados com pá);
- Analisar e comparar o ganho de resistências mecânicas à compressão e à flexão das peças, antes e depois da infiltração dos diferentes adesivos;
- Avaliar os aspectos superficiais que as aplicações dos agentes infiltrantes proporcionam as peças, bem como estimar a capacidade de penetração dos adesivos nas peças;
- Determinar qual combinação de agente infiltrante e técnica de aplicação gera uma peça ideal para compor futuros biomodelos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente, obteve-se os *designs* virtuais dos corpos de prova(amostras) através do software *SOLIDWORKS*®. Então, foram manufaturadas 120 amostras pela impressora *ProJet*® 160 (figura 02), constituídas por material em pó à base de gesso *Visijet*® PXL™ *CORE*, com 80 a 90% de Sulfato de Cálcio hemi-hidratado (SAFETY DATA SHEET VISIJET® PXL CORE, 2017), e pelo *binder VisiJet*® PXL™ *Clear*, sendo todos os produtos da marca *3D SYSTEMS*.

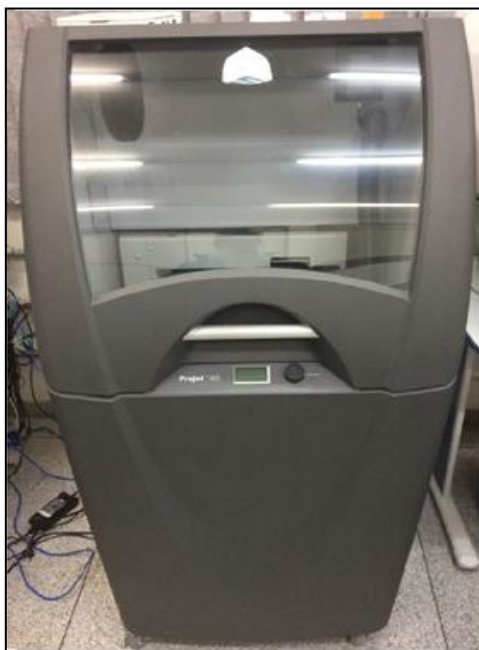


Figura 02 – Impressora 3DP *ProJet*® 160, *3D SYSTEMS* (GC3M/DEM/FEIS/UNESP).

Essas amostras constituem-se de 60 corpos de prova prismáticos (6x4x40mm), e 60 corpos de prova cilíndricos ( $\varnothing 7 \times 14$ mm), utilizados para determinar as resistências mecânicas médias dos corpos de prova antes (verdes) e depois do pós-processamento, através de ensaios de compressão[9](ASTM C1424-10, 2010) e flexão três pontos[10](ASTM C1161-13, 2013), respectivamente, realizados posteriormente pelo equipamento universal de ensaios mecânicos 810 *FlexTest*, com capacidade de 100kN, marca MTS (Figura 3), para efeito comparativo do ganho das resistências.

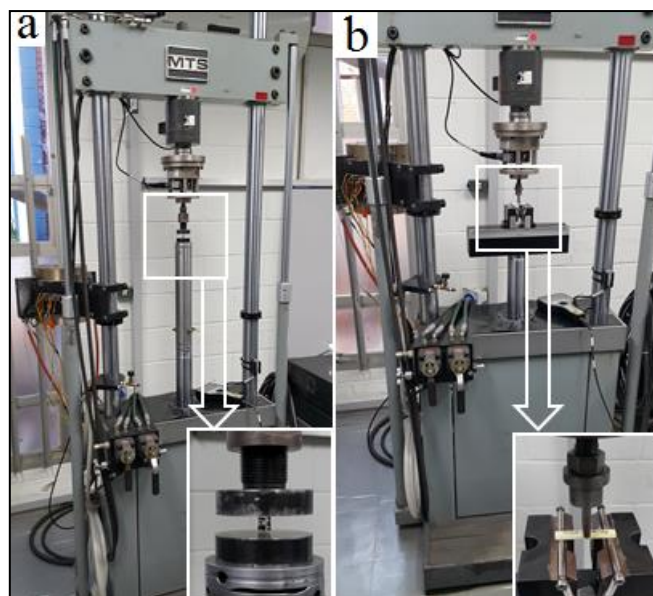


Figura 3 – Equipamento universal 810 *FlexTest*, MTS (LEM/DEMM-FEM/UNICAMP): (a) Ensaio de compressão; (b) Ensaio de tração;

### Pós-processamento

Logo após a confecção das amostras, deu-se início ao primeiro passo do pós-processamento, a limpeza (Figura 04), ou remoção de detritos das amostras, através do jateamento de ar comprimido de uma mangueira contida no equipamento de limpeza, ou unidade de pós-processamento, da marca *3D SYSTEMS*.

As amostras foram organizadas em seis condições, sendo uma condição com corpos de prova cilíndricos e prismáticos verdes, isto é, sem pós-processamento, e as demais condições com corpos de prova cilíndricos prismáticos a serem cobertos superficialmente por agentes infiltrantes, sendo quatro tipos de adesivos de cianocrilato e um de epóxi. Os adesivos foram aplicados às amostras numa temperatura média de aproximadamente 25 °C. Na Tabela 1, encontram-se descritos todos os adesivos utilizados por condição, com suas respectivas especificações.

Tabela 1 – Tipo e viscosidade dos adesivos utilizados, todos da marca Tek Bond.

Tipo de resina	Nome comercial	Base química	Viscosidade [cP]
V5	Adesivo instantâneo multiuso 721	Etilcianoacrilato	3 a 5
V60	Adesivo instantâneo multiuso 725	Etilcianoacrilato	40 a 60
V120	Adesivo instantâneo multiuso 793	Etilcianoacrilato	80 a 120
V1800	Adesivo instantâneo multiuso 200	Etilcianoacrilato	1400 a 1800
V25000	Super epóxi – Adesivo líquido	Epoxi	18000 a 25000

Também foram obtidas as massas e as dimensões de todas as amostras, com a balança eletrônica BD-650, marca *INSTRUTHERM* e com o paquímetro digital 100.170, marca

*DIGIMESS*, respectivamente, antes e depois do pós-processamento, para comparação das variações de densidades aparentes.

A aplicação dos adesivos nas amostras se deu por meio de duas técnicas:

- Gotejamento, para todos os adesivos de cianocrilato, onde deve-se cobrir completamente o corpo de prova, pingando o adesivo de gota em gota;
- Moldagem com pá, para o adesivo de epóxi, de forma a moldar o conteúdo espesso nas paredes do corpo de prova, envolvendo-a totalmente.

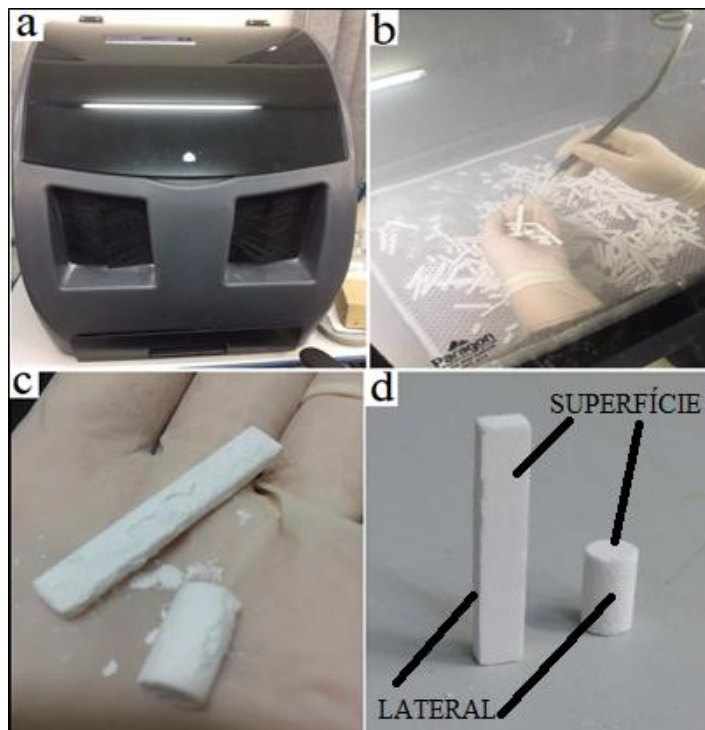


Figura 04 – Limpeza: (a) Unidade de pós-processamento, *3D SYSTEMS*; (b) Interior da unidade; (c) Amostras antes da limpeza; (d) Amostras depois da limpeza.

Por último, para caracterização das amostras, foram feitas imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV), por meio do microscópio EVO LS15, marca *Zeiss*, do Laboratório Multiusuário FEIS/UNESP).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análise por imagens MEV

Na Figura 5, estão agrupadas imagens das superfícies de seis corpos de prova prismáticos, por condição. Conforme previsto por Volpato et al. (2007), estas imagens mostram que todos os adesivos foram capazes de unir as partículas soltas na superfície dos corpos de prova, envolvendo-os totalmente numa espécie de película, conferindo-lhes um aspecto superficial satisfatório, evitando assim a alta desagregação de detritos, muito comum aos manufaturados por 3DP antes de receberem o pós-processamento.

Foram feitas imagens das seções transversais fraturadas dos corpos de prova, obtidas após os ensaios de flexão. O propósito foi medir o alcance de penetração das resinas em direção ao centro do corpo de prova. Esta penetração se deu por meio do preenchimento de vazios, externos e internos. Observou-se ainda que, à medida que a viscosidade aumenta, a penetração



diminui. A condição V25000 obteve a menor parcela estimada de penetração, devido a altíssima viscosidade do adesivo de epóxi. Esta ocorrência conferiu uma espécie de envoltória espessa ao redor corpo de prova, simbolizando a quantidade de adesivo não penetrado. As médias estimadas e os desvios das penetrações e da envoltória dos adesivos nos corpos de prova encontram-se na Tabela 2 e Figura 6.

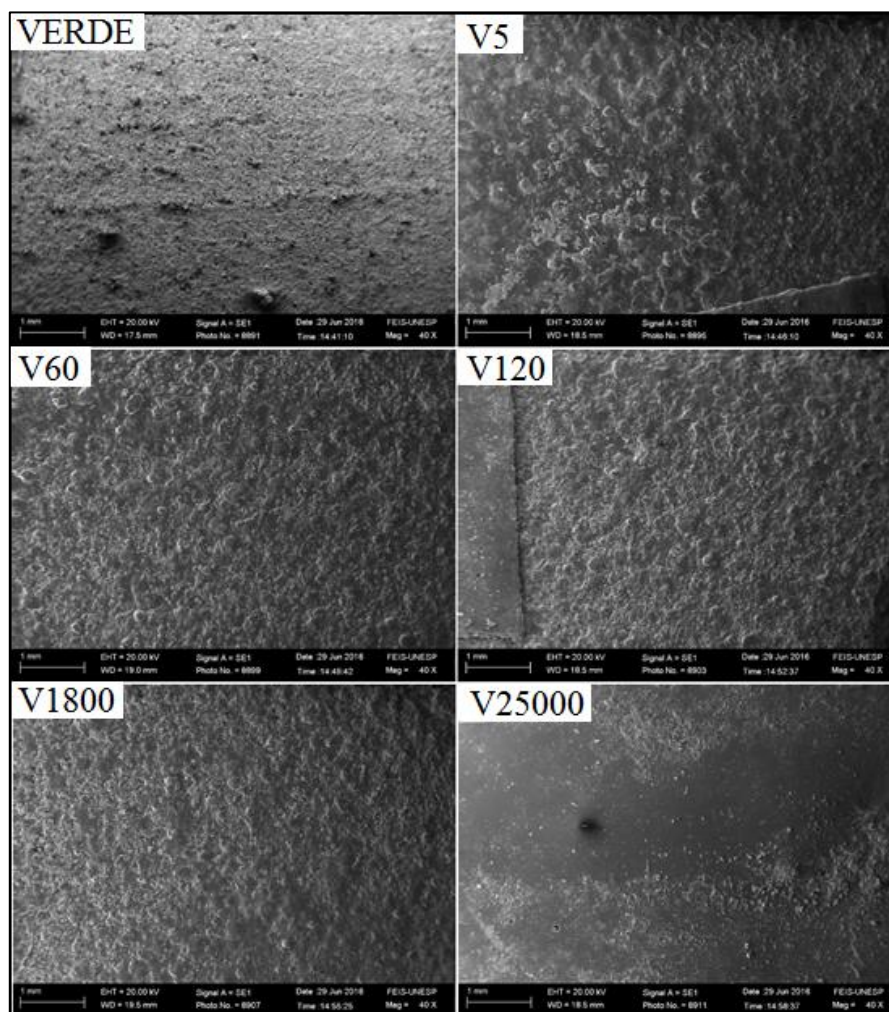


Figura 5 – Vista das superfícies dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x.

Tabela 2 – Médias com desvios padrões das penetrações e da envoltória das resinas nas amostras prismáticas.

Tipo de resina	Resina / Gotejamento		Resina / Imersão	
	Penetração [mm]	Envoltório [mm]	Penetração [mm]	Envoltório [mm]
V5	1,7 ± 0,2	---	1,6 ± 0,1	---
V60	1,0 ± 0,3	---	0,6 ± 0,0	---
V120	0,5 ± 0,0	---	0,5 ± 0,1	---
V1800	0,4 ± 0,0	---	0,4 ± 0,0	---
V25000	0,3 ± 0,0	0,1 ± 0,0	0,3 ± 0,0	0,1 ± 0,0

## Densidades Aparentes e Resistências Mecânicas

Os dados médios com desvios padrões obtidos para as amostras pertencentes a cada condição podem ser vistos na Tabela 3 e na Tabela 4. Esta tabela indica variações significativas de densidades aparentes para todos as condições. Contudo, atribuiu-se as maiores variações aos adesivos de cianocrilato de viscosidades mais baixas, onde o adesivo da condição V5 se sobressaiu.

Num estudo realizado por Frascati[11], peças manufaturadas à base de gesso por 3DP foram infiltradas, separadamente, por dois adesivos de cianocrilato e cinco adesivos de epóxis, onde constatou-se que a resistência à tração e à flexão da peça aumentavam à medida que o adesivo penetrava. Notou-se ainda que, quanto menos viscoso era o infiltrante utilizado, maior era sua absorção e conseqüentemente, maior era a resistência atribuída à peça. O autor ainda afirmou que o cianocrilato tem uma cura muito rápida, e por isso não poderia penetrar a peça profundamente, fenômeno que ocorreu com alguns adesivos epóxi do estudo. Os adesivos de cianocrilato do autor tinham viscosidades por volta de 2 cP, e os de epóxi, viscosidades por volta de 600 cP, sendo este último com viscosidades extremamente mais baixas do que o epóxi V25000, utilizado neste presente trabalho.

Quanto às resistências médias à compressão e à flexão das amostras, notou-se um acréscimo de grande proporção de resistência conforme as viscosidades dos adesivos aplicados diminuem.

Frascati[11] relata o oposto, no qual os adesivos de epóxi tiveram melhor desempenho nos quesitos resistência à flexão e quantidade de penetração. Porém, vale ressaltar que, em seu trabalho, os epóxis utilizados, além de terem viscosidades muito menores, foram aplicados de maneiras diferentes, e, em alguns casos, as amostras foram colocadas no forno para maior absorção do adesivo.

Já Grande Neto[12] frisa em seu trabalho os significativos ganhos de resistência à compressão e flexão, bem como de densidade aparente, que o adesivo de cianocrilato V5 proporciona ao manufaturado de gesso por 3DP.

As Figuras 7 e 8 proporcionam uma leitura mais compreensiva das variações de densidades aparentes médias e dos ganhos de resistências médias, que o pós-processamento proporcionou tanto na resistência compressão como na resistência a flexão.

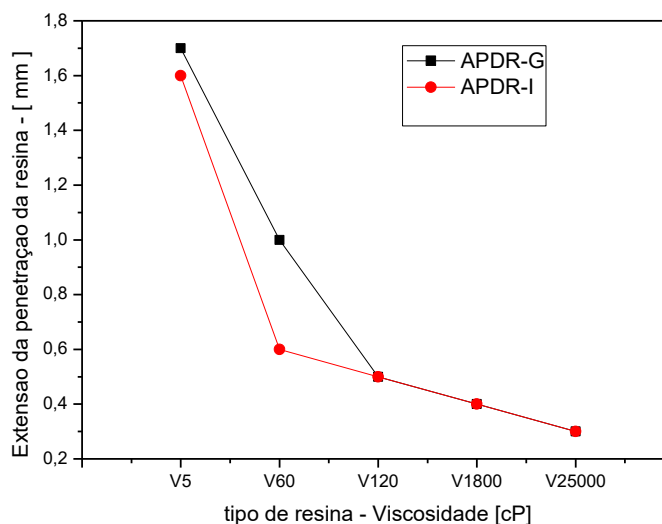


Figura 6 – Influência da viscosidade e da técnica de aplicação da resina na extensão da penetração do agente infiltrante.

Tabela 3 – Influência da viscosidade e da técnica de aplicação da resina na densidade e na resistência a compressão de amostras cilíndricas(corpos de prova).

Amostras cilíndricas(AC) – Ensaio de compressão						
Condição		COMO MANUFATURADO (CM)				
Tipo de resina	Código de identificação da amostra	Densidade – [g/cm <sup>3</sup> ]			Resistência à compressão - [MPa]	
Sem resina (Verde)	ACCM-V	1,26±0,11			2,81±0,34	
Tipo de resina	Pós-processamento Aplicação de resina por gotejamento			Pós-processamento Aplicação de resina por imersão		
	Densidade – [g/cm <sup>3</sup> ]		Resistência à compressão [MPa]	Densidade – [g/cm <sup>3</sup> ]		Resistência à compressão [MPa]
	Como manufaturado	Pós processamento Resinado		Como manufaturado	Pós processamento Resinado	
	Antes de resinar (AR)	Depois de Resinado por Gotejamento (DRG)		Antes de Resinar (AR)	Depois de Resinado por Gotejamento( DRG)	
V5	1,36±0,02	1,70±0,02	33,74±0,74	1,37±0,02	1,670±0,01	33,45±1,95
V60	1,28±0,08	1,57±0,09	20,16±1,75	1,28±0,09	1,52±0,05	17,17±3,37
V120	1,33±0,06	1,46±0,07	13,54±1,72	1,23±0,07	1,46±0,03	12,29±3,25
V1800	1,28±0,07	1,49±0,02	14,10±1,80	1,34±0,01	1,48±0,03	8,66,10±1,09
Tipo de resina	Pós-processamento Aplicação de resina por gotejamento			Pós-processamento Aplicação de resina por imersão		
	Densidade – [g/cm <sup>3</sup> ]		Resistência à compressão [MPa]	Densidade – [g/cm <sup>3</sup> ]		Resistência à compressão [MPa]
	Como manufaturado	Pós processamento Resinado		Como manufaturado	Pós processamento Resinado	
	Antes de resinar (AR)	Depois de Resinado com Espátula (DRE)		Antes de Resinar (AR)	Depois de Resinado com Espátula (DRE)	
V1800	1,18±0,03	1,42±0,03	4,42±1,56	1,18±0,03	1,42±0,03	4,42±1,56

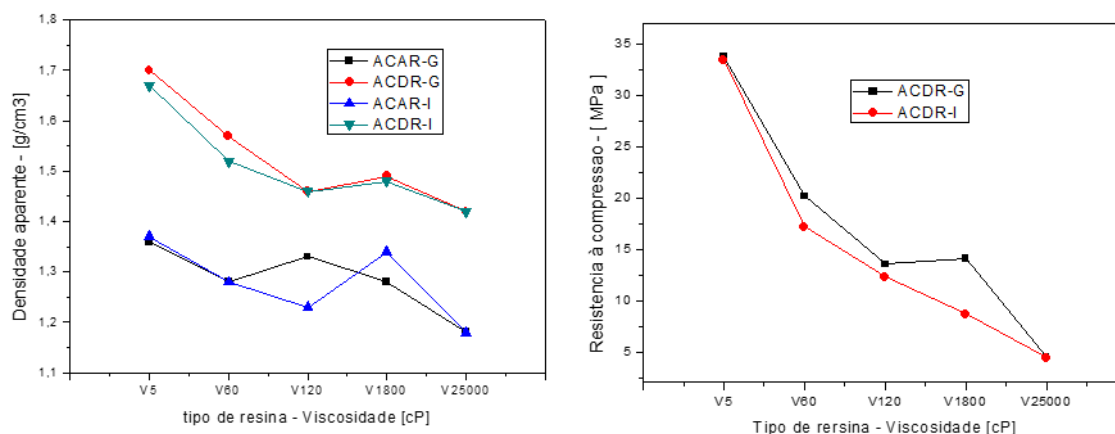


Figura 7– Influência da viscosidade e da técnica de aplicação da resina na densidade e na resistência a compressão de amostras cilíndricas(corpos de prova).



Tabela 4 – Influência da viscosidade e da técnica de aplicação da resina na densidade e na resitencia à flexão de amostras prismáticas(corpos de prova).

Amostras Prismáticas(AP) – Ensaio de Flexão						
Condição		COMO MANUFATURADO (çM)				
Tipo de resina	Código de identificação da amostra	Densidade – [g/cm <sup>3</sup> ]			Resitencia à compressão - [MPa]	
Sem resina (Verde)	APCM-V	1,30 ± 0,01			3,3 ± 0,5	
Tipo de resina	Pós-processamento Aplicação de resina por gotejamento			Pós-processamento Aplicação de resina por imersão		
	Densidade – [g/cm <sup>3</sup> ]		Resitencia à Flexão [MPa]	Densidade – [g/cm <sup>3</sup> ]		Resitencia à Flexão [MPa]
	Como manufaturado	Pós processamento Resinado		Como manufaturado	Pós processamento Resinado	
	Antes de resinar (AR)	Depois de Resinado por Gotejamento (DRG)		Antes de Resinar (AR)	Depois de Resinado por Gotejamento( DRG)	
V5	1,32 ± 0,02	1,62 ± 0,03	17,9 ± 1,9	1,34 ± 0,03	1,58 ± 0,05	19,1 ± 0,9
V60	1,31 ± 0,03	1,56 ± 0,05	17,8 ± 2,1	1,29 ± 0,02	1,48 ± 0,06	17,6 ± 2,3
V120	1,26 ± 0,04	1,48 ± 0,04	13,1 ± 1,9	1,28 ± 0,02	1,47 ± 0,03	14,3 ± 0,7
V1800	1,32 ± 0,03	1,47 ± 0,04	14,8 ± 0,8	1,28 ± 0,01	1,38 ± 0,03	13,4 ± 1,7
Tipo de resina	Pós-processamento Aplicação de resina por gotejamento			Pós-processamento Aplicação de resina por imersão		
	Densidade – [g/cm <sup>3</sup> ]		Resitencia à Flexão [MPa]	Densidade – [g/cm <sup>3</sup> ]		Resitencia à Flexão [MPa]
	Como manufaturado	Pós processamento Resinado		Como manufaturado	Pós processamento Resinado	
	Antes de resinar (AR)	Depois de Resinado com Espatula (DRE)		Antes de Resinar (AR)	Depois de Resinado com Espatula (DRE)	
V1800	1,26±0,04	1,45±0,04	5,3 ± 2,2	1,26±0,04	1,45±0,04	5,3 ± 2,2

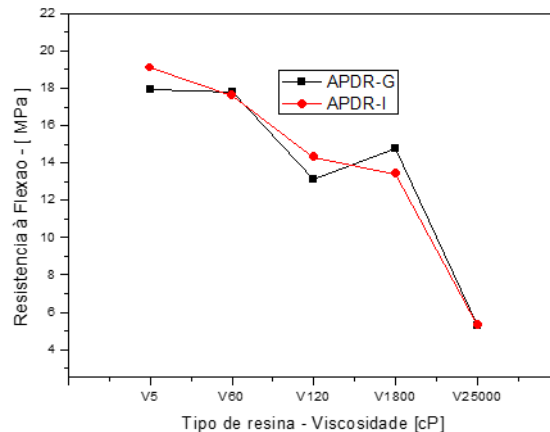
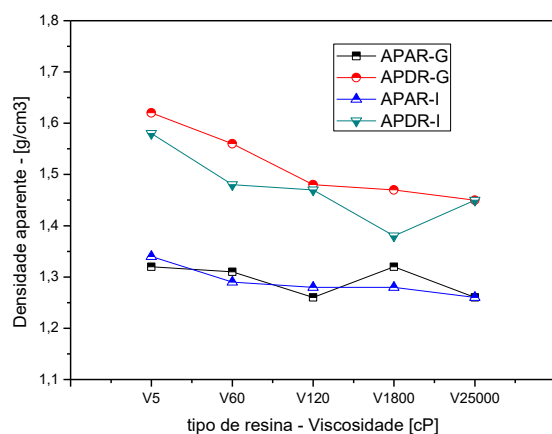


Figura 8 – Influência da viscosidade e da técnica de aplicação da resina na densidade e na resitencia a compressão de amostras cilíndricas(corpos de prova).

## CONCLUSÕES

A aplicação de resina, independentemente do método, produziu um melhor acabamento superficial, melhorando a textura dos corpos de prova e possibilitando então uma manipulação sem o desprendimento de resíduos. Observou-se também que a penetração e preenchimento de vazios aumentou com a diminuição da viscosidade da resina.

A densidade aparente, a resitencia à compressão e a resistência à flexão seguiram a mesma tendência, sempre aumentaram com a redução da viscosidade. Não foi observado influencia significativa da técnica de aplicação da resina, por gotejamento ou por imersão, na densidade e na resitencia mecânica.

## REFERÊNCIAS

- [1] VOLPATO, N. et al. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 2007. 244 p.
- [2] SILVA, D. N. et al. Dimensional error in selective laser sintering and 3D-printing of models for craniomaxillary anatomy reconstruction. **Journal of cranio-maxillofacial surgery**, London, v. 36, n. 8, p. 443-449, 2008.
- [3] KIM, G. B. et al. Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology. **Korean J Radiol**, v. 17, n.2, p.182-197, 2016.
- [4] BREDT, J. F.; ANDERSON, T. C.; RUSSELL, D. B. **Three dimensional printing material system and method**. U.S. Patent n. 6,610,429, 26 ago. 2003.
- [5] MEIRA, C. R. et al. A. Desenvolvimento de pó à base de gesso e binder para prototipagem rápida. **Cerâmica**, São Paulo, v. 59, n. 351, p. 401-408, 2013.
- [6] MONKHOUSE, D. C. et al. **Rapid prototyping and manufacturing process**. U.S. Patent n. 6,547,994, 15 abr. 2003.
- [7] KOEGLER, W. S.; GRIFFITH, L. G. Osteoblast response to PLGA tissue engineering scaffolds with PEO modified surface chemistries and demonstration of patterned cell response. **Biomaterials**, Amsterdam, v. 25, n. 14, p. 2819-2830, 2004.
- [8] PFISTER, A. et al. Biofunctional rapid prototyping for tissue-engineering applications: 3D bioplotting versus 3D printing. **Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry**, Hoboken, v. 42, n. 3, p. 624-638, 2004.
- [9] ASTM C1424-10. **Standard test method for monotonic compressive strength of advanced ceramics at ambient temperature**. West Conshohocken: ASTM International, 2010.
- [10] ASTM C1161-13. **Standard test method for flexural strength of advanced ceramics at ambient temperature**. West Conshohocken: ASTM International, 2013.
- [11] FRASCATI, J. **Effects of position, orientation, and infiltrating material on three dimensional printing models**. 2007. 64 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – College of Engineering and Computer Science, University of Central Florida, Orlando, 2007.
- [12] GRANDE NETO, N. **Utilização de material alternativo para a obtenção e caracterização de biomodelos, por meio da técnica de impressão 3DPRINTER**. 2016. 53 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016.