UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SILVIA TEIXEIRA DE MELLO

INFLUÊNCIA DO TIPO E DA TÉCNICA DE APLICAÇÃO DE AGENTE INFILTRANTE NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE COMPONENTES PRODUZIDOS POR MANUFATURA ADITIVA (3DP)

Ilha Solteira
2017

SILVIA TEIXEIRA DE MELLO

INFLUÊNCIA DO TIPO E DA TÉCNICA DE APLICAÇÃO DE AGENTE INFILTRANTE NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE COMPONENTES PRODUZIDOS POR MANUFATURA ADITIVA (3DP)

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.
Especialidade: Materiais e processos de fabricação

Prof. Dr. RUIS CAMARGO TOKIMATSU
Orientador

Ilha Solteira
2017

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M527i

Mello, Silvia Teixeira de.
Influência do tipo e da técnica de aplicação de agente infiltrante na resistência mecânica de componentes produzidos por manufatura aditiva (3DP) / Silvia Teixeira de Mello. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
102 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2017

Orientador: Ruis Camargo Tokimatsu
Inclui bibliografia

1. 3DP. 2. Biomodelos. 3. Pós-processamento. 4. Cianocrilato. 5. Epóxi.

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Influência do tipo e da técnica de aplicação de agente infiltrante na resistência mecânica de componentes produzidos por manufatura aditiva (3DP)

AUTORA: SILVIA TEIXEIRA DE MELLO
ORIENTADOR: RUIS CAMARGO TOKIMATSU

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA MECÂNICA, área: MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RUIS CAMARGO TOKIMATSU
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JUNO GALLEGO
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Profa. Dra. CECILIA AMELIA DE CARVALHO ZAVAGLIA
Departamento de Materiais / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Ilha Solteira, 30 de agosto de 2017

AGRADECIMENTOS

À minha família;

Ao meu orientador, professor Dr. Ruís Camargo Tokimatsu;

Aos professores da banca, Dr. Juno Gallego e Dra. Cecília A. de Carvalho Zavaglia;

A todos os professores do PPGEM e ao professor PhD Miguel Ângelo Menezes;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq);

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP);

À FEIS/UNESP;

À UNICAMP;

À TEKBOND;

À Beatriz Xavier e Bruna Santos, da TEKBOND;

Ao INCT – Biofabris;

À minha amiga de mais de uma década, Larissa Minillo;

Aos amigos do PPGEM, Carolina Oliveira, Gabriel Pontin e Nicolas Sales;

Aos doutorandos Daniel Obata e Newton Salvador;

Aos técnicos de laboratórios do DEM/FEIS/UNESP, Carlos Santana, Darci Ribeiro, Diego Alcântara, Edvaldo Araújo e Ronaldo Máscoli;

Ao técnico de laboratório do DFQ/FEIS/UNESP, Elton de Souza;

Ao técnico do LEM/DEMM/UNICAMP, José Lisboa;

Aos bibliotecários da FEIS, João Barbosa, Erika Lomba e Raiane Santos;

“[...] Há apenas 60 milhas ao sul, há uma grande cidade. E aqui, há homens civilizados.

O homem civilizado recusou-se a adaptar-se ao seu meio. Adaptou o seu meio para servi-lo. Assim, ele construiu cidades, estradas, veículos, máquinas e redes elétricas para realizar seus projetos racionais. Mas, não soube quando parar. Quanto mais melhorava o meio para facilitar a vida, mais a complicava. E agora, seus filhos ficam de 10 a 15 anos na escola, para aprender a sobreviver neste perigoso habitat onde nasceram. E o homem civilizado, que se negou a adaptar-se ao seu meio natural, tem agora que se adaptar e readaptar a cada instante, ao meio criado por ele.

Por exemplo, se um dia for segunda-feira e aparecer o número 7:30, você deve desadaptar-se ao meio doméstico e readaptar-se ao um meio totalmente diferente. 8 horas, significa que todos devem parecer muito ocupados [...]”

Trecho do filme
Os deuses devem estar loucos, 1980.

“Rejoice, rejoice, we have no choice but to carry on”

Carry On - Crosby Stills Nash & Young, 1970.

RESUMO

Ao longo das duas últimas décadas, a contribuição da manufatura aditiva passou da confecção de um mero protótipo de um produto, no início de seu desenvolvimento, para a confecção de qualquer produto direto, presente em todos os setores industriais. Com este avanço, diferentes tecnologias da manufatura aditiva surgiram com o intuito de melhorar alguns parâmetros de produção. Neste meio, a tecnologia de impressão tridimensional 3DP, por consequência de suas várias características intrínsecas, se destaca para atender o setor biomédico, através da técnica de biomodelagem, que contribuem imensamente de forma didática e prática para a performance de cirurgias. Porém, há algumas limitações finais nas peças obtidas por esta tecnologia que devem ser contornadas, focando-se no tratamento adicional necessário destas peças, o pós-processamento, de modo a aprimorá-las, conferindo então sucesso ao destino destas. Neste trabalho, 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. Além dos métodos de aplicação dos adesivos, as duas etapas se diferem também pelos *binders* utilizados para constituírem as amostras à base de gesso. Para ambas etapas, obteve-se o melhor resultado com o adesivo de cianocrilato de baixíssima viscosidade, capaz de provocar maiores variações de densidade aparente às amostras, além de maiores acréscimos de resistência.

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

ABSTRACT

Over the past two decades, the contribution of additive manufacturing has shifted from a mere prototype of a product at the beginning of its development to the production of any direct product present in all industrial sectors. With this advance, different technologies of the additive manufacturing appeared with the intention to improve some parameters of production. In this environment, three-dimensional printing 3DP technology, due to its various intrinsic characteristics, stands out to serve the biomedical sector through the biomodelling technique, which contribute immensely in a didactic and practical way for the performance of surgeries. However, there are some final limitations in the parts obtained by this technology that must be improved, focusing on the necessary additional treatment of these parts, the post-processing, in order to upgrade them, thus giving success to their destination. In this study, 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, the 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 ethylcyanocrylate 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 stages, the best result was obtained by the cyanoacrylate adhesive with very low viscosity, capable of causing greater variations of apparent density and additions of strength to the samples.

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema geral de funcionamento de impressoras 3D.. 22

Figura 2 – Aplicações da manufatura aditiva. 23

Figura 3 – Exemplo de biomodelo: (a) Tomografia de paciente com deformidade no crânio, à esquerda e biomodelo do crânio, à direita; (b) Biomodelo com implante de titânio específico para o paciente. 24

Figura 4 – Caso de sucesso brasileiro de biomodelagem. 25

Figura 5 – As tecnologias da Manufatura aditiva de acordo com o estado inicial da matéria-prima utilizada. 26

Figura 6 – Esquema de funcionamento da SLA. 27

Figura 7 – (a) Impressora SLA-5000, marca 3D Systems; (b) Peça produzida por SLA. 27

Figura 8 – Esquema de funcionamento da FDM. 28

Figura 9 – (a) Impressora FDM Titan, marca Stratasys; (b) Peças produzidas por FDM. ... 29

Figura 10 – Esquema de funcionamento da SLS. 30

Figura 11 – (a) Impressora Sinterstation 2500 plus, marca 3D Systems; c) Peça produzida por SLS. 30

Figura 12 – Esquema de funcionamento da 3DP. 31

Figura 13 – (a) Impressora 3DP Zprinter 450, marca 3D Systems; (b) Peça produzida por 3DP. 32

Figura 14 – Escopo do trabalho. 35

Figura 15 – Impressora 3DP ProJet® 160, 3D SYSTEMS (GC3M/DEM/FEIS/UNESP). . 36

Figura 16 – Equipamento universal 810 FlexTest, MTS (LEM/DEMM-FEM/UNICAMP): (a) Ensaio de compressão; (b) Ensaio de tração. 36

Figura 17 – Limpeza: (a) Unidade de pós-processamento, 3D SYSTEMS; (b) Interior da unidade; (c) Amostras antes da limpeza; (d) Amostras depois da limpeza. 37

Figura 18 – Esquema dos pós-processamento da primeira etapa. 39

Figura 19 – Microscópio EVO LS15, Zeiss (DFQ/FEIS/UNESP). 40

Figura 20 – Esquema dos pós-processamento da segunda etapa. 42

Figura 21 – Vista das superfícies dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x..... 43

Figura 22 – Vista das laterais dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x..... 44

Figura 23 – Vista das fraturas dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x..... 45

Figura 24 – Médias das variações de densidades aparentes com desvios padrões das amostras por condição..... 48

Figura 25 – Ganhos de resistências médias com desvios padrões das amostras por condição. 49

Figura 26 – Vista das superfícies dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x..... 50

Figura 27 – Vista das laterais dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x..... 51

Figura 28 – Vista das fraturas dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x..... 52

Figura 29 – Médias das variações de densidades aparentes com desvios padrões das amostras por condição..... 54

Figura 30 – Ganhos de resistências médias com desvios padrões das amostras por condição. 54

Figura 31 – Vista das superfícies dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x..... 55

Figura 32 – Vista das laterais dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x..... 56

Figura 33 – Vista das fraturas dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x..... 57

Figura 34 – Médias das variações de densidades aparentes com desvios padrões das amostras por condição..... 59

Figura 35 – Ganhos de resistências médias com desvios padrões das amostras por condição. 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Adesivos utilizados. 38

Tabela 2 – Médias com desvios padrões das penetrações e da envoltória dos adesivos nos corpos de prova. 46

Tabela 3 – Variações das densidades aparentes e resistências mecânicas médias com os respectivos desvios padrões para as amostras, antes e depois do pós-processamento..... 48

Tabela 4 – Médias com desvios padrões das penetrações e da envoltória dos adesivos nos corpos de prova. 52

Tabela 5 – Variações das densidades aparentes e resistências mecânicas médias com os respectivos desvios padrões para as amostras, antes e depois do pós-processamento..... 53

Tabela 6 – Médias com desvios padrões das penetrações e da envoltória dos adesivos nos corpos de prova. 58

Tabela 7 – Variações das densidades aparentes e resistências mecânicas médias com os respectivos desvios padrões para as amostras, antes e depois do pós-processamento..... 59

Tabela 8 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição verde..... 66

Tabela 9 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição verde..... 67

Tabela 10 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição verde..... 67

Tabela 11 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição verde. 68

Tabela 12 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V5. 68

Tabela 13 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V5..... 69

Tabela 14 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticao na condição V5..... 69

Tabela 15 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V5. 70

Tabela 16 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V60. 70

Tabela 17 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V60..... 71

Tabela 18 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V60. 72

Tabela 19 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V60. 72

Tabela 20 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V120. 73

Tabela 21 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V120..... 73

Tabela 22 – Dados médios com desvios padões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V120. 74

Tabela 23 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V120. 74

Tabela 24 – Dados médios com desvios padões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V1800. 75

Tabela 25 – Dados médios com desvios padões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V1800..... 75

Tabela 26 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V1800. 76

Tabela 27 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V1800. 76

Tabela 28 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V25000. 77

Tabela 29 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V25000..... 77

Tabela 30 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V25000. 78

Tabela 31 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V25000. 78

Tabela 32 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição verde. 79

Tabela 33 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição verde. 80

Tabela 34 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição verde. 81

Tabela 35 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição verde. 81

Tabela 36 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V5. 82

Tabela 37 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V5. 83

Tabela 38 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V5. 84

Tabela 39 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V5. 84

Tabela 40 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V60. 85

Tabela 41 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V60. 85

Tabela 42 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V60. 86

Tabela 43 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V60. 86

Tabela 44 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V120. 87

Tabela 45 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V120. 87

Tabela 46 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V120. 88

Tabela 47 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V120. 88

Tabela 48 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V1800. 89

Tabela 49 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V1800. 89

Tabela 50 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V1800. 90

Tabela 51 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V1800. 90

Tabela 52 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V5. 91

Tabela 53 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V5. 92

Tabela 54 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V5. 92

Tabela 55 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V5. 93

Tabela 56 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V60. 93

Tabela 57 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V60. 94

Tabela 58 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V60. 94

Tabela 59 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V60. 95

Tabela 60 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V120. 95

Tabela 61 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V120..... 96

Tabela 62 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V120. 96

Tabela 63 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V120. 97

Tabela 64 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V1800. 97

Tabela 65 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V1800..... 98

Tabela 66 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos da condição V1800. 98

Tabela 67 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V1800. 99

Tabela 68 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V25000. 99

Tabela 69 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V25000..... 100

Tabela 70 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V25000. 100

Tabela 71 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V25000. 101

Tabela 72 – Detalhes da PROJET 160®. 102

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18
1.1 OBJETIVO GERAL 19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 19
2 REVISÃO DA LITERATURA 20
2.1 MANUFATURA ADITIVA 20
2.1.1 O Nascimento da Manufatura Aditiva: a prototipagem rápida 20
2.1.2 Princípios Genéricos de Funcionamento 21
2.1.3 Aplicações da Manufatura Aditiva 22
2.1.4 Biomodelagem por Manufatura Aditiva 23
2.1.4.1 Um Caso de Sucesso Brasileiro 25
2.1.4.2 Tecnologias de Manufatura Aditiva Requisitadas para a Biomodelagem 26
2.1.4.3 Estereolitografia (SLA) 26
***2.1.4.2.2 Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)* 28**
***2.1.4.2.3 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)* 29**
***2.1.4.2.4 Impressão Tridimensional (3DP)* 30**
***2.1.4.2.5 Características Atribuídas à Tecnologia 3DP* 32**
2.2 ADESIVOS UTILIZADOS NO PÓS-PROCESSAMENTO DA TECNOLOGIA 3DP 32
2.2.1 Adesivos de Cianocrilato 32
2.2.2 Resinas de Epoxi 33
3 MATERIAIS E MÉTODOS 35
3.1 ESCOPO DO TRABALHO 35
3.2 PRIMEIRA ETAPA 35
3.2.1 Pós-processamento 37
3.3 SEGUNDA ETAPA 40
3.3.1 Preparo do Binder Alternativo 40
3.3.2 Pós-processamento 41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 43
4.1 PRIMEIRA ETAPA 43
4.1.1 Análise por imagens MEV 43

4.1.2 Densidades e Resistências Mecânicas 46
4.2 SEGUNDA ETAPA 49
4.2.1 Aplicações por Gotejamento 49
***4.2.1.1 Análise por Imagens MEV*..... 49**
***4.2.1.2 Densidades e Resistências Mecânicas* 53**
4.2.2 Aplicação por Banho de Imersão 55
***4.2.2.1 Análise por Imagens MEV*..... 55**
***4.2.2.2 Densidades e Resistências Mecânicas* 58**
5 CONCLUSÕES 61
REFERÊNCIAS 62
APÊNDICE – DADOS COMPLETOS DAS AMOSTRAS 66
A.1 PRIMEIRA ETAPA 66
A.1.1 CONDIÇÃO VERDE 66
A.1.1.1 Amostras Cilíndricas..... 66
A.1.1.2 Amostras Prismáticas..... 67
A.1.2 CONDIÇÃO V5 68
A.1.2.1 Amostras Cilíndricas..... 68
A.1.2.2 Amostras Prismáticas 69
A.1.3 CONDIÇÃO V60 70
A.1.3.1 Amostras Cilíndricas 70
A.1.3.2 Amostras Prismáticas 72
A.1.4 CONDIÇÃO V120 73
A.1.4.1 Amostras Cilíndricas 73
A.1.4.2 Amostras Prismáticas 74
A.1.5 CONDIÇÃO V1800 75
A.1.5.1 Amostras Cilíndricas 75
A.1.5.2 Amostras Prismáticas 76
A.1.6 CONDIÇÃO V25000 77
A.1.6.1 Amostras Cilíndricas 77
A.1.6.2 Amostras Prismáticas 78
A.2 SEGUNDA ETAPA..... 79
A.2.1 CONDIÇÃO VERDE 79
A.2.1.1 Amostras Cilíndricas 79
A.2.1.2 Amostras Prismáticas..... 81
A.2.2 GOTEJAMENTO 82

A.2.2.1 Condição V5 82
***A.2.2.1.1 Amostras Cilíndricas* 82**
***A.2.2.1.2 Amostras Prismáticas* 84**
A.2.2.2 Condição V60 85
***A.2.2.2.1 Amostras Cilíndricas* 85**
***A.2.2.2.2 Amostras Prismáticas* 86**
A.2.2.3 Condição V120 87
***A.2.2.3.1 Amostras Cilíndricas* 87**
***A.2.2.3.2 Amostras Prismáticas* 88**
A.2.2.4 Condição V1800 89
***A.2.2.4.1 Amostras Cilíndricas* 89**
***A.2.2.4.2 Amostras Prismáticas* 90**
A.2.3 BANHO DE IMERSÃO 91
A.2.3.1 Condição V5 91
***A.2.3.1.1 Amostras Cilíndricas* 91**
***A.2.3.1.2 Amostras Prismáticas* 92**
A.2.3.2 Condição V60 93
***A.2.3.2.1 Amostras Cilíndricas* 93**
***A.2.3.2.2 Amostras Prismáticas* 94**
A.2.3.3 Condição V120 95
A.2.3.3.1 *Amostras Cilíndricas* 95
A.2.3.3.2 *Amostras Prismáticas* 96
A.2.3.4 Condição V1800 97
A.2.3.4.1 *Amostras Cilíndricas* 97
A.2.3.4.2 *Amostras Prismáticas* 98
A.2.4 Condição V25000 99
A.2.4.1 *Amostras Cilíndricas* 99
A.2.4.2 *Amostras Prismáticas* 100
ANEXO – DETALHES DA IMPRESSORA PROJET 160® 102

1 INTRODUÇÃO

A capacidade de transformar matéria-prima em produto acabado para garantir sobrevivência é conhecida pelo homem desde os seus primórdios. Com o passar dos séculos, esta capacidade de transformação aumentou e se automatizou, através da invenção das máquinas, passando a produzir em larga escala e aprimorando a qualidade dos produtos, atendendo a grande demanda de consumo mundial. Esta obtenção de produtos é conhecida como processos de fabricação, os quais abrangem técnicas de fabricação que removem ou até adicionam materiais para a confecção do produto final.

A concepção original dos processos visava uma criação rápida e rentável de protótipos, para otimizar e aperfeiçoar produtos industriais, reduzindo falhas e aumentando qualidades, acarretando a gênese da manufatura aditiva, conhecida popularmente como impressão 3D, uma técnica de fabricação que, há mais de duas décadas, vem ganhando cada vez mais espaço no mercado.

Novas tecnologias dentro da manufatura aditiva foram criadas ao longo desses anos, em decorrência competitividade da indústria em termos de preços, melhorias incrementais, velocidade de impressão, precisão, matéria-prima e propósitos diferentes.

O modo de funcionamento das tecnologias de manufatura aditiva para a fabricação dos produtos se dá pela interação entre o homem, a ajuda por computadores CAD e a própria impressora 3D, na qual é meramente manipulada pelo homem quando é ligada para dar início a produção, ou impressão, dos produtos.

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.

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 passam 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.

1.1 OBJETIVO GERAL

- Investigar como diferentes agentes infiltrantes podem influenciar nas propriedades mecânicas de peças concebidas por impressão tridimensional 3DP;

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar fisicamente e quantitativamente as variações dimensionais e de densidades aparentes 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;

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 MANUFATURA ADITIVA

2.1.1 O nascimento da manufatura aditiva: a prototipagem rápida

Ao longo dos anos, intensificou-se o aumento na concorrência e complexidade na fabricação de produtos industriais, concebidos principalmente por processos de fabricação que incluem fusão, remoção, conformação e adição de materiais. Consequentemente, a indústria se viu obrigada a aperfeiçoar seus processos de desenvolvimento de produtos, reduzindo o tempo total de desenvolvimento, aumentando a qualidade e a competitividade de seus produtos no mercado. (VOLPATO et al., 2007).

Em meados da década de 80, surgiu a prototipagem rápida, termo usado para descrever a abrangência em tecnologias que fabricavam protótipos de produtos em suas fases iniciais de desenvolvimento, de forma rápida e automatizada, isto é, uma rápida produção de peças para materializar as idéias das concepções dos produtos, não impondo necessidades de resistência e precisão. A prototipagem rápida se classifica no processo de fabricação por adição, através da sobreposição de camadas planas. Foi um marco revolucionário na era dos processos de fabricação, pois era um conjunto de tecnologias isentas de moldes e ferramentas, completamente automatizada e com o mínimo de atuação de operadores, que apenas atuavam na concepção da peça a ser produzida através do sistema CAD (*Computer Aided Design*), que enviava as informações dos formatos das peças diretamente à máquina. (VOLPATO et al., 2007)

O intuito das tecnologias englobadas pela prototipagem rápida é um só, construir um objeto tridimensional, através da deposição de camadas planas, indo muito além da criação de protótipos, o que tem tornado o termo prototipagem rápida antiquado. A crescente demanda industrial tem implicado na melhoria destas tecnologias, como a velocidade de produção, precisão das peças obtidas bem como reduções das máquinas e dos custos operacionais, com padrões reconhecidos pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e pela ISO (*International Organization for Standardization*), através da norma ISO/ASTM 52900, de

2015. Por todos estes motivos, o termo que vem substituindo a prototipagem rápida é a manufatura aditiva. (CAMPBELL; BOURELL; GIBSON, 2012; VOLPATO et al., 2017).

2.1.2 Princípios genéricos de funcionamento

De acordo com Karapatis, Griethuysen e Glardon (1998), as tecnologias de manufatura aditiva seguem basicamente os mesmos passos de funcionamento:

1. Elaboração do modelo da peça a ser produzida por auxílio virtual (computadorizado) – O design de qualquer peça, ou objeto desejado, é concebido por algum software CAD, representando-o numa superfície sólida em 3D;

2. Conversão do formato do modelo virtual para um formato reconhecido pelas impressoras. O formato padrão de reconhecido pelas tecnologias de manufatura aditiva é o STL (*Standard Tessellation Language* ou *Standard Triangulation Language*), onde a superfície da futura peça é fatiada, contendo informações para os traçados de cada camada;

3. Todas as máquinas de manufatura aditiva vêm com seu próprio software para manipular a quantidade de peças a construir, bem como ajeitar o tamanho correto, orientação e posicionamento. Então, o arquivo da peça concebido anteriormente em formato STL, é enviado a estes *softwares* próprios;

4. Os parâmetros da impressora de manufatura aditiva, como a espessura das camadas, por exemplo, devem ser configurados antes de produzir a peça;

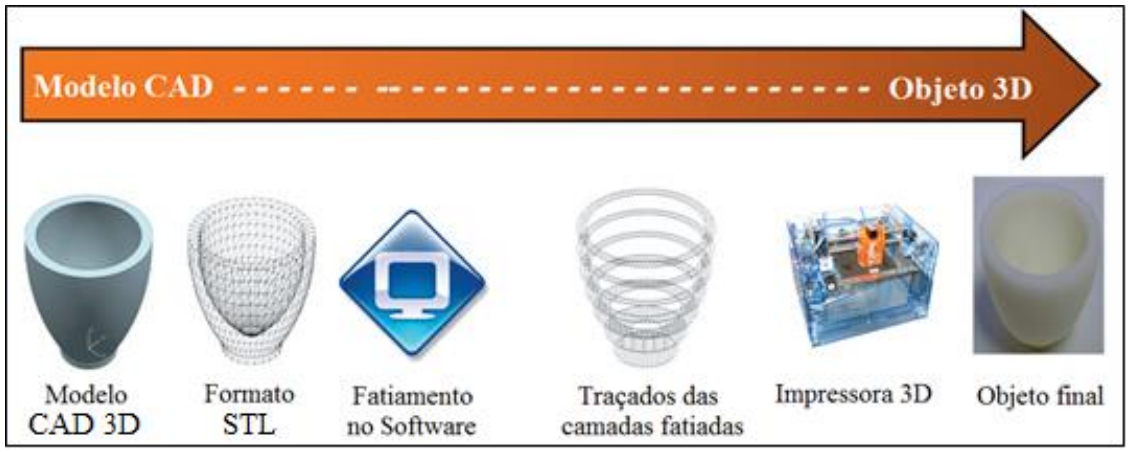
5. O arquivo detalhado é finalmente enviado a impressora, podendo-se dar início a construção da peça;

6. Após a completar construção da peça, esta deve ser removida da máquina cuidadosamente;

7. Dá-se início ao pós-processamento: Remoção de sujeira proveniente do material utilizado para fabricar a peça e em algumas tecnologias, um tratamento adicional é necessário, através da aplicação de substâncias específicas na superfície da peça;

Estes passos podem ser resumidos na figura 1.

Figura 1 – Esquema geral de funcionamento de impressoras 3D.



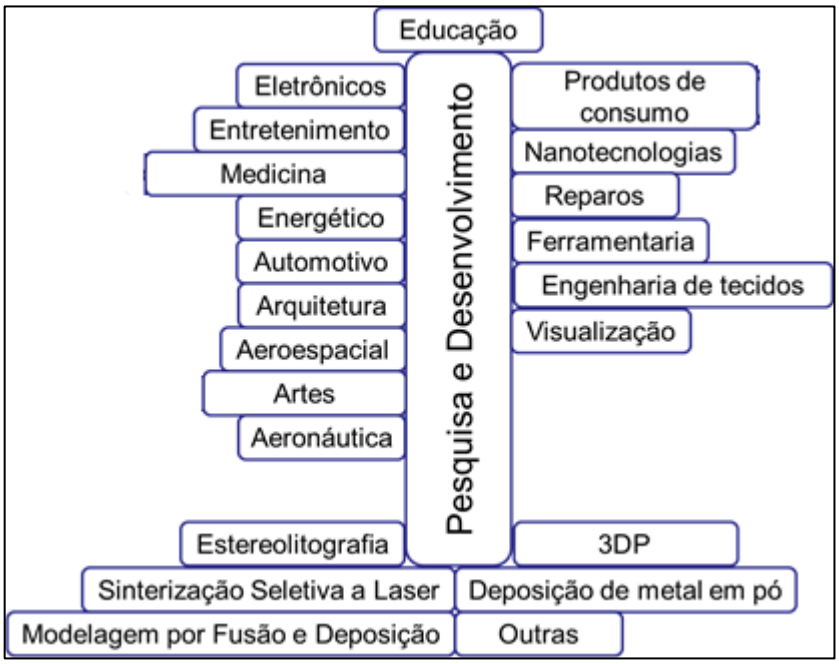
Fonte: Adaptado de Campbell et al. (2011).

2.1.3 Aplicações da manufatura aditiva

A aplicação da manufatura aditiva está presente numa ampla gama de setores industriais, tais como aeroespacial, automotivo, médico/biomédico, produtos de consumo, dentre outros (SRIVATSAN; SUDARSHAN, 2015)

A figura 2 retrata as variadas aplicações da manufatura aditiva, de acordo com a pesquisa e desenvolvimento das tecnologias em voga.

Figura 2 – Aplicações da manufatura aditiva.



Fonte: Adaptado de Srivatsan e Sudarshan (2015).

2.1.4 Biomodelagem por manufatura aditiva

A técnica de biomodelagem se enquadra dentro do setor biomédico, gerando uma interface de áreas como computação, engenharia e medicina (BREITLING et al., 2010). O produto desta técnica é o biomodelo (figura 3), isto é, um modelo físico que reproduz fielmente a anatomia humana (BIBB; WINDER, 2010).

Para obter estes biomodelos, utilizam-se imagens 2D seccionadas, oriundas de exames de tomografia computadorizada, ressonância magnética e até ultrassonografia. Por meio da interação de softwares específicos CAD, estas imagens, originalmente no formato DICOM (*Digital Imaging Communications in Medicine*), são convertidas para o formato STL, gerando uma imagem 3D (BANGA et al., 2014). Esta conversão se dá por meio de *softwares* especializados, como *Mimics*®, *3D DOCTOR*®, *Amira*® (BANGA et al., 2014) e até o brasileiro *Invesalius*® (OLIVEIRA; MARQUES, 2015). Assim, o design do biomodelo é definido e pode ser finalmente enviado a impressora para ser confeccionado.

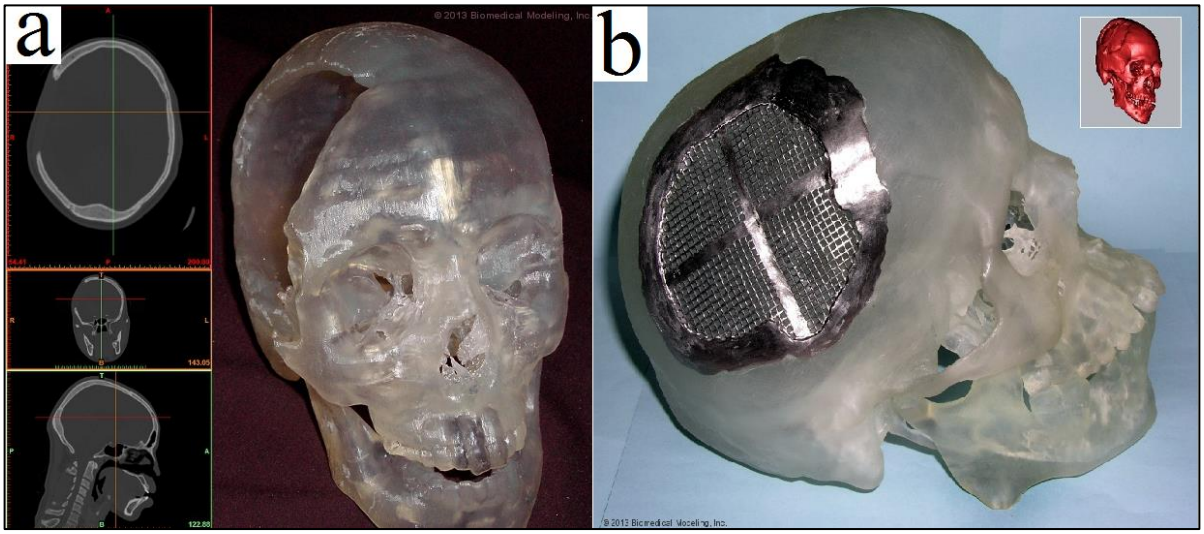
Os biomodelos têm diversas finalidades, dentre elas:

- Planejamento pré-operatório, onde os médicos podem estudar e até adotar novos procedimentos nas cirurgias, antecipando possíveis desafios que poderão surgir (MALIK

et al., 2015), como numa neurocirurgia, por exemplo, que requer manobras delicadas ao redor de delicados vasos, nervos e osso. Biomodelos são capazes de familiarizar as estruturas corporais dos pacientes aos médicos, dando a eles um entendimento melhor do que as imagens 2D (KLEIN; LU; WANG, 2013);

- Redução do tempo de cirurgias e de traumas dos pacientes, como por exemplo numa cirurgia na cavidade abdominal (CONDINO et al., 2011);
- Objetivos didáticos, educando e treinando profissionais ou até mesmo expondo os biomodelos aos pacientes, para explicar possíveis procedimentos cirúrgicos a serem tomados (WINDISCH et al., 2007);
- Simulações de cirurgias, onde os médicos podem treinar técnicas cirúrgicas nos biomodelos, que podem replicar fielmente um coração com raras complicações (SCHMAUSS et al., 2012), por exemplo;

Figura 3 – Exemplo de biomodelo: (a) Tomografia de paciente com deformidade no crânio, à esquerda e biomodelo do crânio, à direita; (b) Biomodelo com implante de titânio específico para o paciente.



Fonte: Adaptado de Biomedical Modeling (2017)

2.1.4.1 Um Caso de Sucesso Brasileiro

Em 2009, uma paciente de 26 anos foi submetida a uma hemi-mandibulectomia esquerda, realizada pelo médico Eduardo Sannomiya, para retirar um tumor avançado (ameloblastoma) da face.

Para executar a cirurgia com sucesso, foram produzidos dois biomodelos pelo CTI – RENATO ARCHER, um para a simulação de osteotomias e outro para a modelagem da haste de titânio, utilizada para fixação de enxerto autólogo ósseo da fíbula. Fotografias do procedimento realizado passo a passo podem ser vistas na figura 4.

Figura 4 – Caso de sucesso brasileiro de biomodelagem.



Fonte: Adaptado de Brasil (2009).

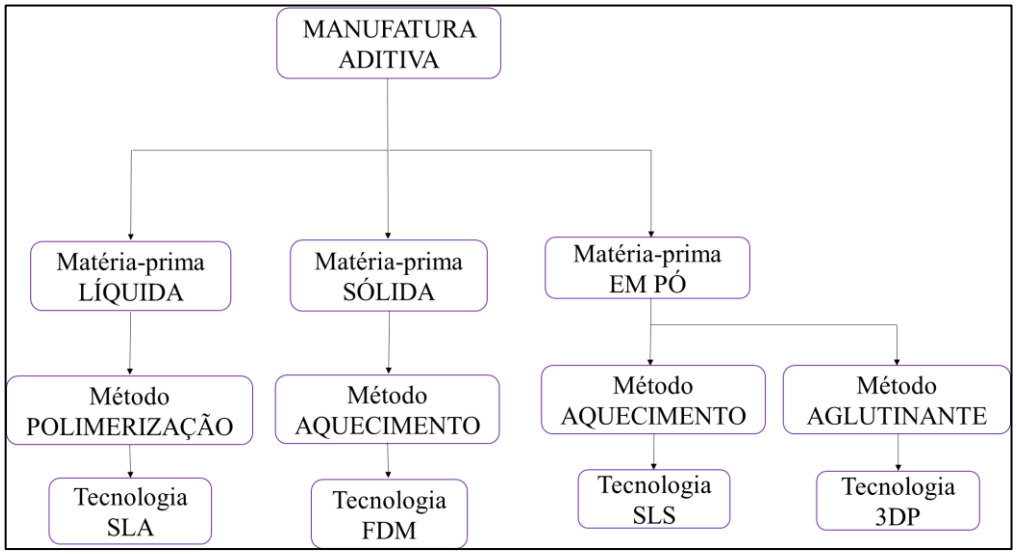
2.1.4.2 Tecnologias de Manufatura Aditiva Requisitadas para a Biomodelagem

Gouveia (2009) informa que as tecnologias de manufatura aditiva mais empregadas para a confecção de biomodelos são:

- Estereolitografia (SLA), para biomodelos translúcidos;
- Sinterização Seletiva a Laser (SLS) e Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), para biomodelos destinados ao planejamento de osteotomias;
- Impressão Tridimensional (3DP), mais viável economicamente, ideal para biomodelos destinados a visualizações e manuseios;

Hopkinson, Hague e Dickens (2006) classifica as tecnologias de manufatura aditiva de acordo com o estado inicial da matéria-prima a ser usada: Sólido, líquido ou em pó. O estado da matéria-prima também influi no método de operação de cada tecnologia (KRUTH, 1991). Na figura 5, estão ilustradas as tecnologias conforme a classificação e o método de operação.

Figura 5 – As tecnologias da Manufatura aditiva de acordo com o estado inicial da matéria-prima utilizada.



Fonte: Adaptado de Kruth (1991) e Hopkinson, Hague e Dickens (2006).

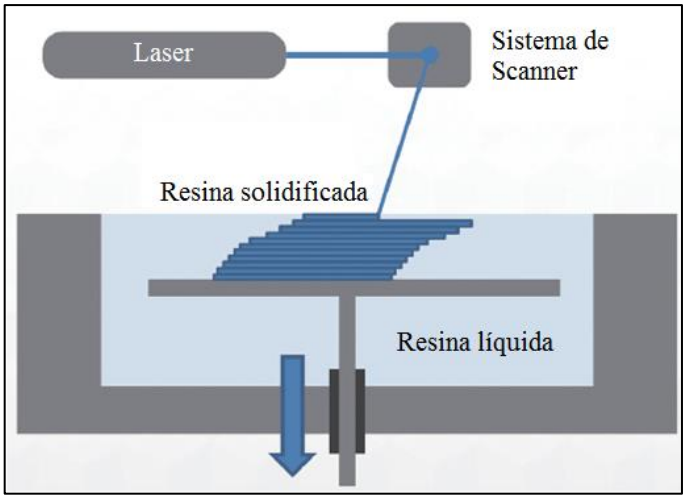
2.1.4.2.1 Estereolitografia (SLA)

A estereolitografia foi a primeira tecnologia disponível comercialmente, estando no mercado desde 1988 (VOLPATO et al., 2007), e seu funcionamento (figura 6) consiste em armazenar num recipiente uma resina líquida fotossensível, que se solidifica quando exposta a

luz ultravioleta. O recipiente se apoia numa plataforma que se desloca para baixo, a cada camada construída, e a delineação de cada camada se dá pela aplicação do feixe de laser ultravioleta na resina, reproduzindo a geometria 2D proveniente do fatiamento da peça virtual e o procedimento é repetido até finalizar a peça (GAO et al., 2015).

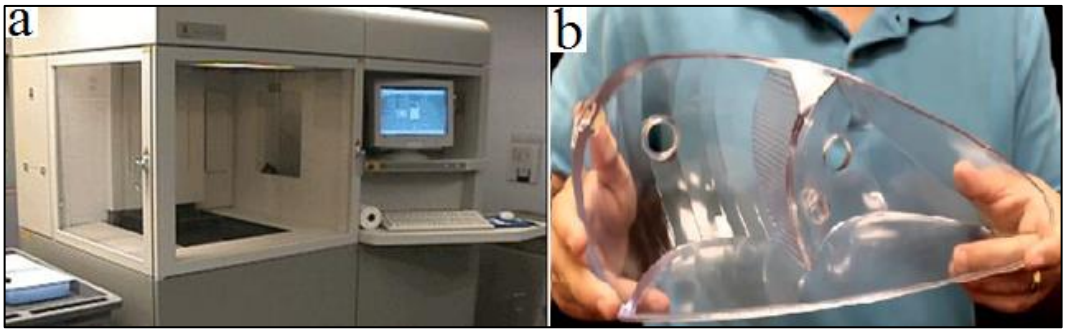
O pós-processamento se inicia ao levar a peça verde a um forno ultravioleta, de modo a obter a cura total da resina, garantindo-lhe um aumento de resistência mecânica. (VOLPATO et al., 2007). São utilizadas como matéria-prima resinas de epóxi e uretano (GATTO, 2011), poliéter(met)acrilato (BENS et al., 2007), dentre outros. Na figura 7, exemplos de uma impressora SLA e uma peça impressa por esta tecnologia.

Figura 6 – Esquema de funcionamento da SLA.



Fonte: Adaptado de Kim et al. (2016).

Figura 7 – (a) Impressora SLA-5000, marca 3D Systems; (b) Peça produzida por SLA.



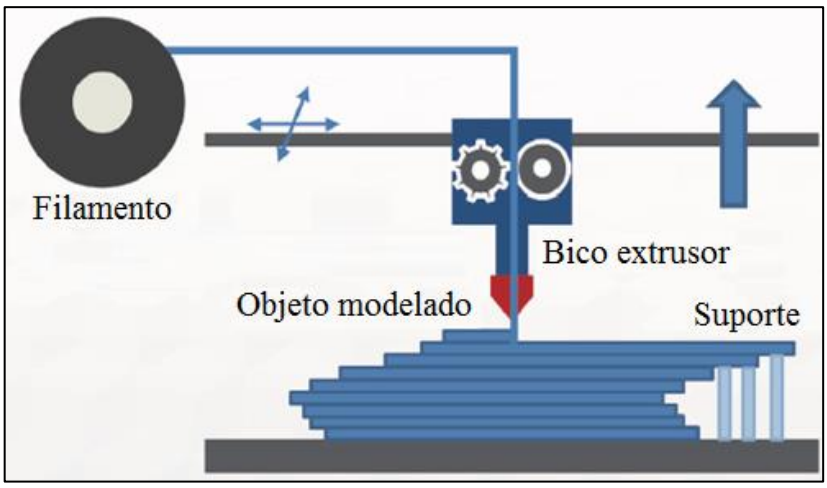
Fonte: (a) Rapid Prototyping Center (2016); (b) Futurum 3d (2016).

2.1.4.2.2 Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)

Esta tecnologia foi desenvolvida em 1988 e comercializada a partir de 1992 (VOLPATO et al., 2007), e aqui, a peça é construída pela deposição de um material extrudado, através de um bico extrusor, que se movimenta horizontalmente e se posiciona sobre uma mesa que se movimenta para baixo, recebendo continuamente o material na forma de um fio, aquecendo-o até o ponto semi-líquido ou pastoso (figura 8). O filamento de material a ser tracionado funciona como um êmbolo no início da extrusão, expulsando o material por um bico calibrado, que se solidifica ao entrar em contato com a superfície da peça, aderindo à camada anterior. Este procedimento é repetido, camada a camada, até a obtenção total da peça.

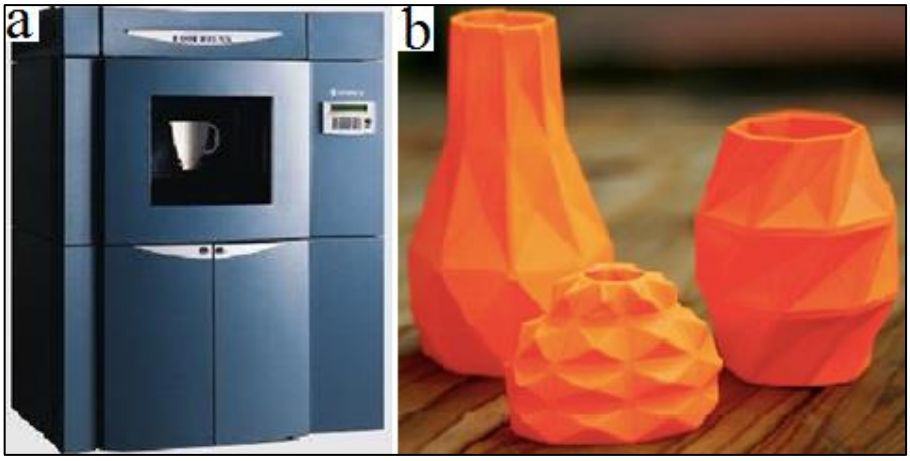
O pós-processamento da FDM inclui a remoção de resíduos provenientes do suporte (VOLPATO et al., 2007). A FDM utiliza matérias-primas termoplásticas, como polímero ABS, policarbonatos e ceras (GATTO, 2011). Exemplos de uma impressora FDM e três peças impressas por esta tecnologia podem ser vistos na figura 9.

Figura 8 – Esquema de funcionamento da FDM.



Fonte: Adaptado de Kim et al. (2016).

Figura 9 – (a) Impressora FDM Titan, marca Stratasys; (b) Peças produzidas por FDM.



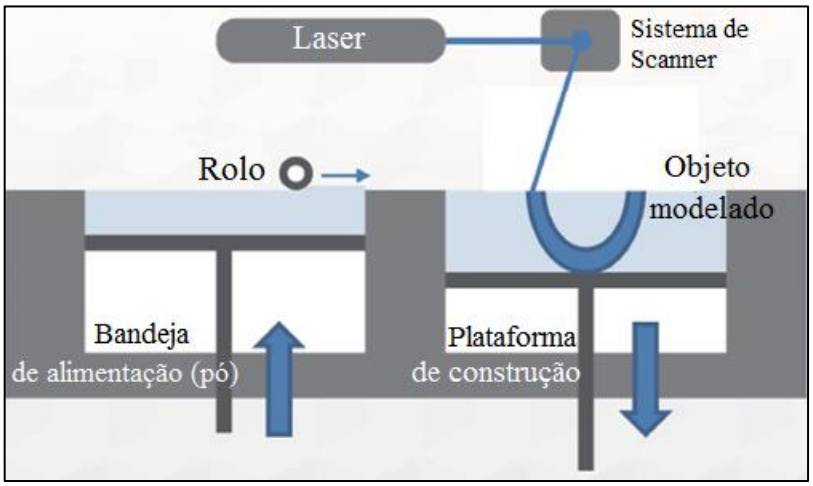
Fonte: (a) Rapid Prototyping Center (2016); (b) Futurum 3d (2016).

2.1.4.2.3 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

Esta tecnologia é comercializada desde 1992 (BEAMAN et al., 1997) e se baseia na sinterização de um material em pó, por meio de um *laser* de CO_2 de média potência. O pó é conduzido ao ponto de fusão pela incidência do *laser*, agregando-se a camada anterior, formando assim o corpo da peça (BEAMAN et al., 1997; KRUTH, 1991). Mas antes, um rolo nivela e espalha o mais pó, contido numa câmara sobre uma plataforma móvel. A câmara então é aquecida a uma temperatura abaixo do ponto de fusão, e o feixe do *laser* delineia a superfície do material, fornecendo energia para "sinterizar" as partículas do pó de acordo com a geometria 2D da peça desejada, que será construída camada a camada através do movimento da plataforma no eixo vertical, como indica a figura 10 (TUKURU et al., 2008)

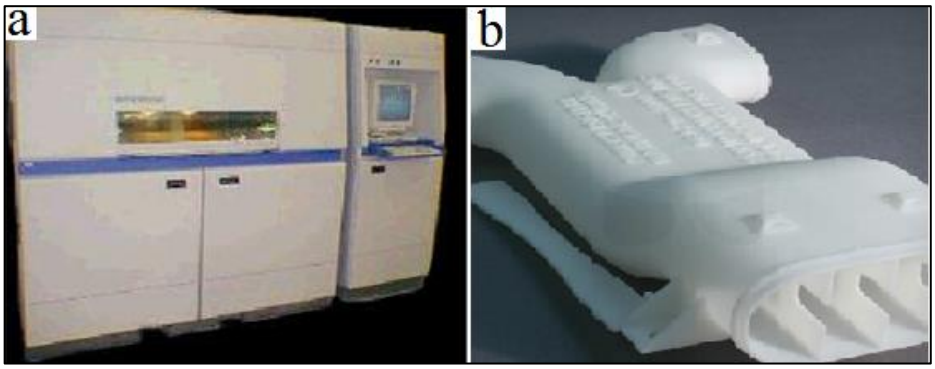
O pós-processamento da SLS inclui a pós-cura em forno de alta temperatura, dependendo do material utilizado. (VOLPATO et al., 2007). As matérias-primas utilizadas na SLS incluem compósitos de *nylon*, vidro, policarbonato e ceras (GATTO, 2011). Na figura 11, exemplos de uma impressora SLS e uma peça impressa por esta tecnologia.

Figura 10 – Esquema de funcionamento da SLS.



Fonte: Adaptado de Kim et al. (2016).

Figura 11 – (a) Impressora Sinterstation 2500 plus, marca 3D Systems; c) Peça produzida por SLS.



Fonte: (a) Rapid Prototyping Center (2016); (b) Futurum 3d (2016).

2.1.4.2.4 Impressão Tridimensional (3DP)

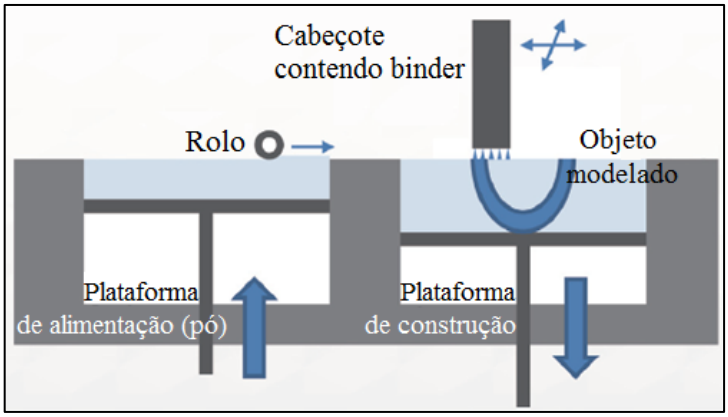
Em meados da década de 90, o MIT (*Massachussetts Institute of Technology*) desenvolveu a tecnologia de impressão tridimensional 3DP. Logo em seguida, a empresa estadunidense *Z Corporation*, hoje *3D SYSTEMS*, adquiriu licença exclusiva para continuar o desenvolvimento e comercializar equipamentos baseados no princípio desta tecnologia (VOLPATO et al., 2007).

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 12). 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 (SILVA et al., 2008).

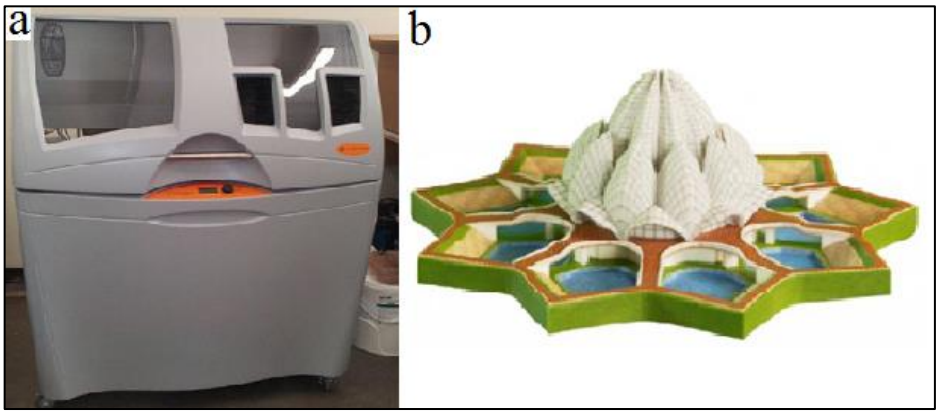
O pós-processamento se inicia com a limpeza e retirada do material em excesso ou ligeiramente fixado a peça. Em seguida, para conferir maior resistência e acabamento a peça, aplica-se uma resina adequada à mesma, que infiltrará na peça através de seus poros (VOLPATO et al., 2007). Estes agentes infiltrantes podem ser cera fundida, verniz, poliuretano, cianocrilato e epóxi (BREDT; ANDERSON; RUSSELL, 2003). Materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos são os materiais utilizados pela tecnologia 3DP (MEIRA et al., 2013). Na figura 13 estão ilustrados exemplos de uma impressora 3DP e uma peça impressa por esta tecnologia.

Figura 12 – Esquema de funcionamento da 3DP.



Fonte: Adaptado de Kim et al. (2016).

Figura 13 – (a) Impressora 3DP Zprinter 450, marca 3D Systems; (b) Peça produzida por 3DP.



Fonte: (a) Global Indo Printing (2016); (b) Inter Active (2016).

2.1.4.2.5 Características Atribuídas à Tecnologia 3DP

A 3DP é caracterizada pela elevada flexibilidade de material e geometria, e merece destaque por ser uma tecnologia relativamente mais rápida em relação as demais (SACHS et al., 1994). A redução de tempo e de custo tornou a 3DP uma tecnologia muito popular no ramo da manufatura aditiva (LAM et al., 2002).

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 (MONKHOUSE et al., 2003; KOEGLER; GRIFFITH, 2004; PFISTER et al., 2004). No entanto, a baixa resistência mecânica e a baixa densificação são os obstáculos a serem superados, no momento, relativos à impressão tridimensional de cerâmicas (MEIRA et al., 2013). Para isto ocorrer, deve-se utilizar os agentes infiltrantes mais adequados.

2.2 ADESIVOS UTILIZADOS NO PÓS-PROCESSAMENTO DA TECNOLOGIA 3DP

2.2.1 Adesivos de Cianocrilato

Durante a Segunda Guerra Mundial, o jovem químico estadunidense Harry Coover Jr. acidentalmente descobriu monômeros de cianocrilato, os quais possuíam alto teor de

aderência. Em 1951 percebeu que a substância grudenta era capaz de unir qualquer tipo de superfície a sua mão, com uma ligação muito forte. Neste dia nascia a brihante idéia de criar adesivos de cianocrilato, ou super cola, ou ainda adesivos instantâneos, como são conhecidos hoje em dia (COOVER, 1980). Em 1958 chegava as prateleiras dos EUA o primeiro adesivo de cianocrilato comercial, o *Eastman* 910® (EDUCATIONAL..., 2004), da *Eastman Kodak*.

A cura dos adesivos se dá por polimerização (EDUCATIONAL..., 2004). As aplicações dos adesivos de cianocrilato englobam artesanato, fabricação de placas de circuitos, montagem de jóias finas, carpintaria, medicina, entre outros (COOVER, 2000).

Shantha, Thennarasu e Krishnamurti (1989) listam algumas propriedades físicas e químicas do cianocrilato:

- Cura rápida à temperatura ambiente;
- Formação de ligações fortes com uma grande variedade de materiais, sem a necessidade de um catalisador;
- Facilmente aplicável, tanto manualmente quanto automaticamente, com considerável segurança;
- Vêm prontos para o uso, dispensando qualquer tipo de misturas;

2.2.2 Resinas de Epoxi

Compostos de epóxi foram sintetizados no final do século XIX, mas em 1936, Pierre Castan, da companhia suíça *De Trey Frères*, usava poliadições para criar materiais para restaurações dentárias, quando descobriu as resinas de epóxi através da reação do éter diglicidílico de bisfenol-A (DGEBA) com anidrido ftálico (CASTON, 1938). As resinas de epóxi estrearam comercialmente nos EUA em 1947, pela *Devoe-Raynolds Company* (EDUCATIONAL..., 2004).

As resinas de epóxi são comumente utilizadas como adesivos, em artesanatos, revestimentos de fibras óticas e pavimentos, nas indústrias aeronáutica, eletroeletrônica, na odontologia, entre outros (BILYEU; BROSTOW; MENARD, 1999)

Ainda segundo Bilyeu, Brostow e Menard (1999), as características básicas das resinas de epóxi consistem em:

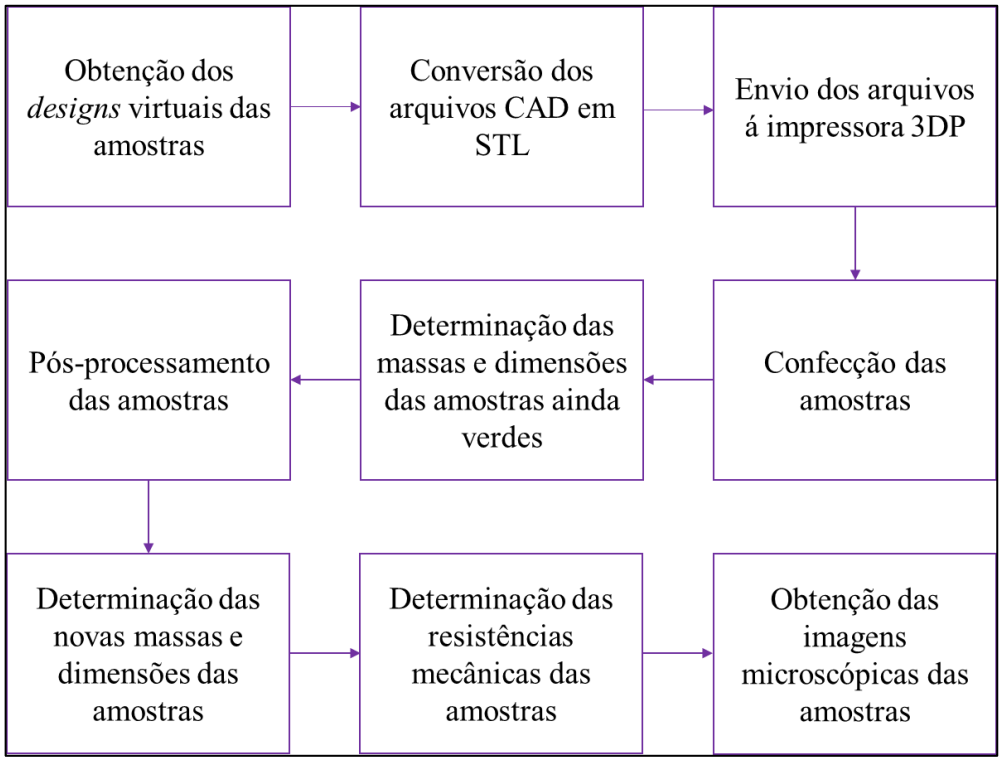
- Alta velocidade de cura;
- Alto poder aderente;
- Boas propriedades mecânicas e elétricas;
- Ótimos isolantes;
- Boa resistência a agentes químicos e a corrosão;
- Facilidade de aplicação;

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ESCOPO DO TRABALHO

A parte experimental deste trabalho foi organizada em duas etapas distintas, as quais diferem entre si, tanto na utilização de um *binder* diferente para cada, quanto nos métodos de aplicação dos adesivos nas amostras. Todavia, as duas etapas seguem a mesma sequência do escopo a seguir (figura 14).

Figura 14 – Escopo do trabalho.

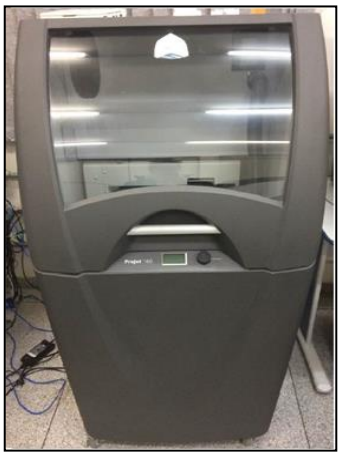


Fonte: Própria autora.

3.2 PRIMEIRA ETAPA

Primeiramente, obteve-se os *designs* virtuais das amostras através do software *SOLIDWORKS*®. Então, foram manufaturadas sessenta amostras pela impressora *ProJet*® 160 (figura 15), 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 citados anteriormente da marca *3D SYSTEMS*.

Figura 15 – Impressora 3DP *ProJet*® 160, *3D SYSTEMS* (GC3M/DEM/FEIS/UNESP).

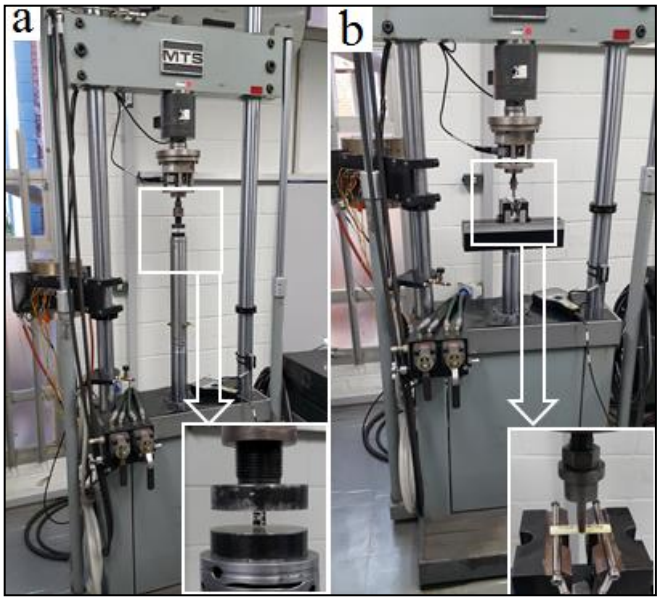


Fonte: Própria autora.

Estas amostras constituem-se de trinta corpos de prova prismáticos (6x4x40mm) e trinta corpos de prova cilíndricos (Ø7x14mm), utilizados para obter as resistências mecânicas médias dos corpos de prova antes (verdes) e depois do pós-processamento, através de ensaios de compressão (ASTM C1424-10, 2010) e flexão três pontos (ASTM C1161-13, 2013), respectivamente, realizados posteriormente pelo equipamento universal de ensaios mecânicos 810 *FlexTest*, com capacidade de 100kN, marca MTS (figura 16), para efeito comparativo do ganho das resistências.

Figura 16 – Equipamento universal 810 *FlexTest*, MTS (LEM/DEMM-FEM/UNICAMP):

(a) Ensaio de compressão; (b) Ensaio de tração;

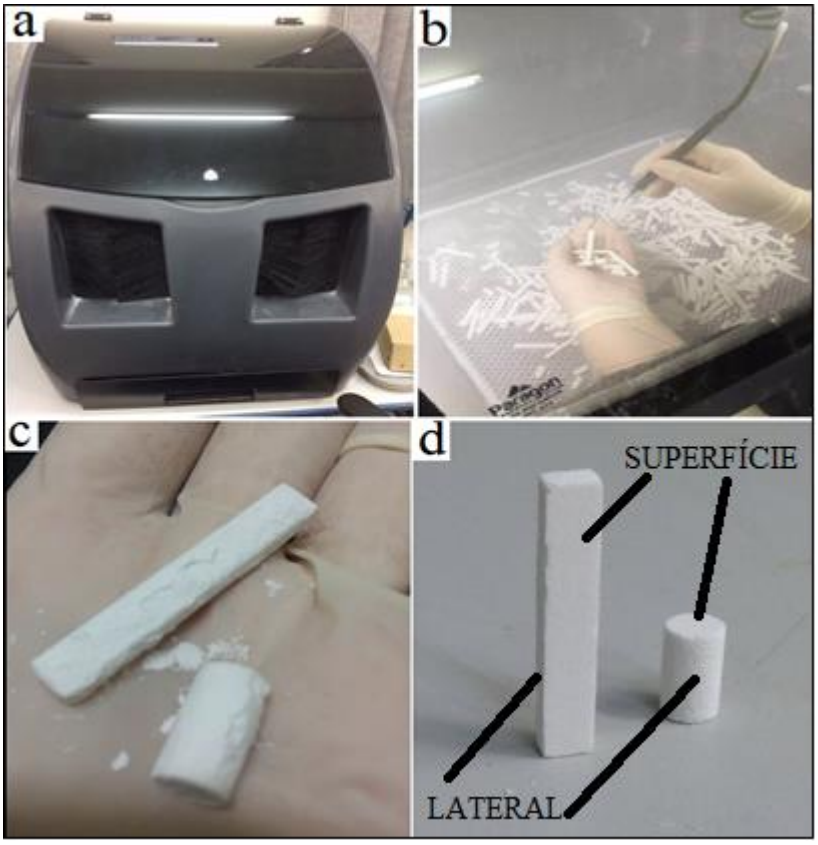


Fonte: Própria autora.

3.2.1 Pós-processamento

Logo após a confecção das amostras, deu-se início ao primeiro passo do pós-processamento, a limpeza (figura 17), 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*.

Figura 17 – Limpeza: (a) Unidade de pós-processamento, *3D SYSTEMS*; (b) Interior da unidade; (c) Amostras antes da limpeza; (d) Amostras depois da limpeza.



Fonte: Própria autora.

As amostras foram organizadas em seis condições, sendo uma condição com corpos de prova cilíndricos e prismáticas verdes, isto é, sem pós-processamento, e as demais condições com corpos de prova cilíndricos e 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 ºC. Na tabela 1, encontram-se descritos todos os adesivos utilizados por condição, com suas respectivas especificações.

Tabela 1 – Adesivos utilizados.

Condição	Nome Comercial	Base	Viscosidade (cP)	Marca
V5	ADESIVO INSTANTÂNEO MULTIUSO 721	Etilcianocrilato	3 a 5	TEKBOND®
V60	ADESIVO INSTANTÂNEO MULTIUSO 725	Etilcianocrilato	40 a 60	TEKBOND®
V120	ADESIVO INSTANTÂNEO MULTIUSO 793	Etilcianocrilato	80 a 120	TEKBOND®
V1800	ADESIVO INSTANTÂNEO MULTIUSO 200	Etilcianocrilato	1400 a 1800	TEKBOND®
V25000	Super Epóxi ADESIVO LÍQUIDO	Epóxi	18000 a 25000	TEKBOND®

Fonte: Tekbond (2016).

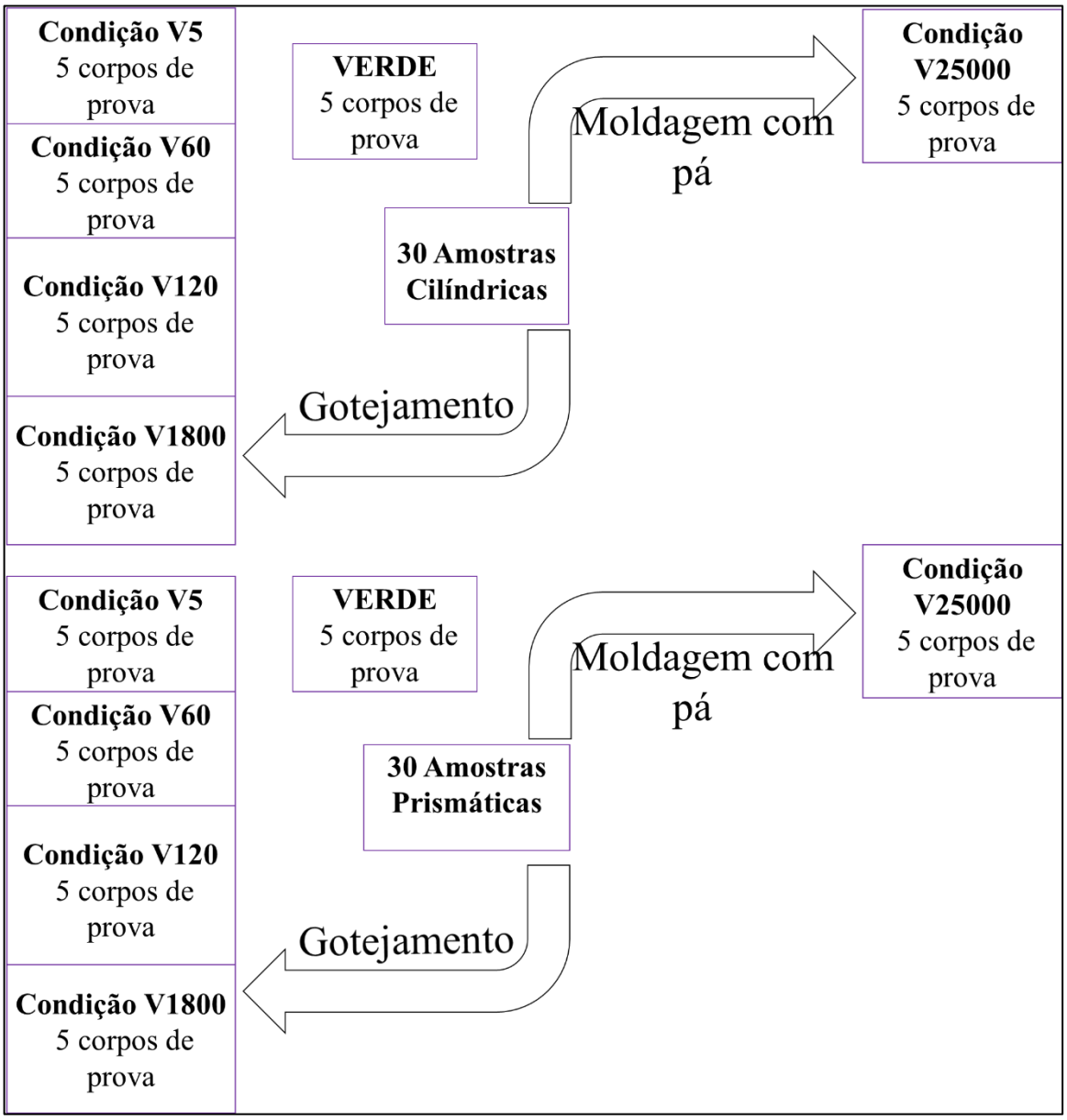
Também foram obtidas as massas e as dimensões de todas as amostras, com a balança eletrônica BD-650, marca *INSTRUTHERM* e com o paquímetro digital 100.170, marca *DIGIMESS*, respectivamente, antes e depois do pós-processamento, para comparação das variações de densidades aparentes.

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.

A Figura 18 descreve o esquema de execução adotado para o pós-processamento das amostras na primeira etapa.

Figura 18 – Esquema dos pós-processamento da primeira etapa.



Fonte: Própria autora.

Por último, foram feitas imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV), por meio do microscópio EVO LS15, marca *Zeiss* (figura 19), para caracterização das amostras.

Figura 19 – Microscópio EVO LS15, *Zeiss* (DFQ/FEIS/UNESP).



Fonte: Própria autora.

3.3 SEGUNDA ETAPA

Para a segunda etapa, foram confeccionadas cem amostras com as mesmas dimensões das amostras da etapa anterior, sendo cinquenta corpos de prova prismáticos (6x4x40mm) e cinquenta corpos de prova cilíndricos (Ø7x14mm). Desta vez, utilizou-se novamente o mesmo material em pó *Visije*t® PXL™ *CORE*, porém, com um *binder* alternativo.

3.3.1 Preparo do Binder Alternativo

Para a obter dois litros de *binder* alternativo, contou-se com o auxílio de pipeta graduada 10 ml HS 785 e béquer graduado 250 ml HS 100, ambos da marca SATELIT®, para realizar uma mistura dos componentes adaptados de (MEIRA et al., 2013), descritos a seguir, na seguinte proporção:

- 90 Vol. % de água deionizada;
- 5 Vol. % de álcool isopropílico P.A. – A.C.S., marca *Synth*;
- 4,5 Vol. % de glicerina líquida P.A. – A.C.S., marca *Synth*;
- 0,5 Vol.% de detergente Extran® MA 02, marca *MERCK*;

As amostras também foram submetidas aos mesmos ensaios de resistência anteriores, com suas dimensões determinadas antes e depois do pós-processamento, através do mesmo equipamento e instrumentos já mencionados.

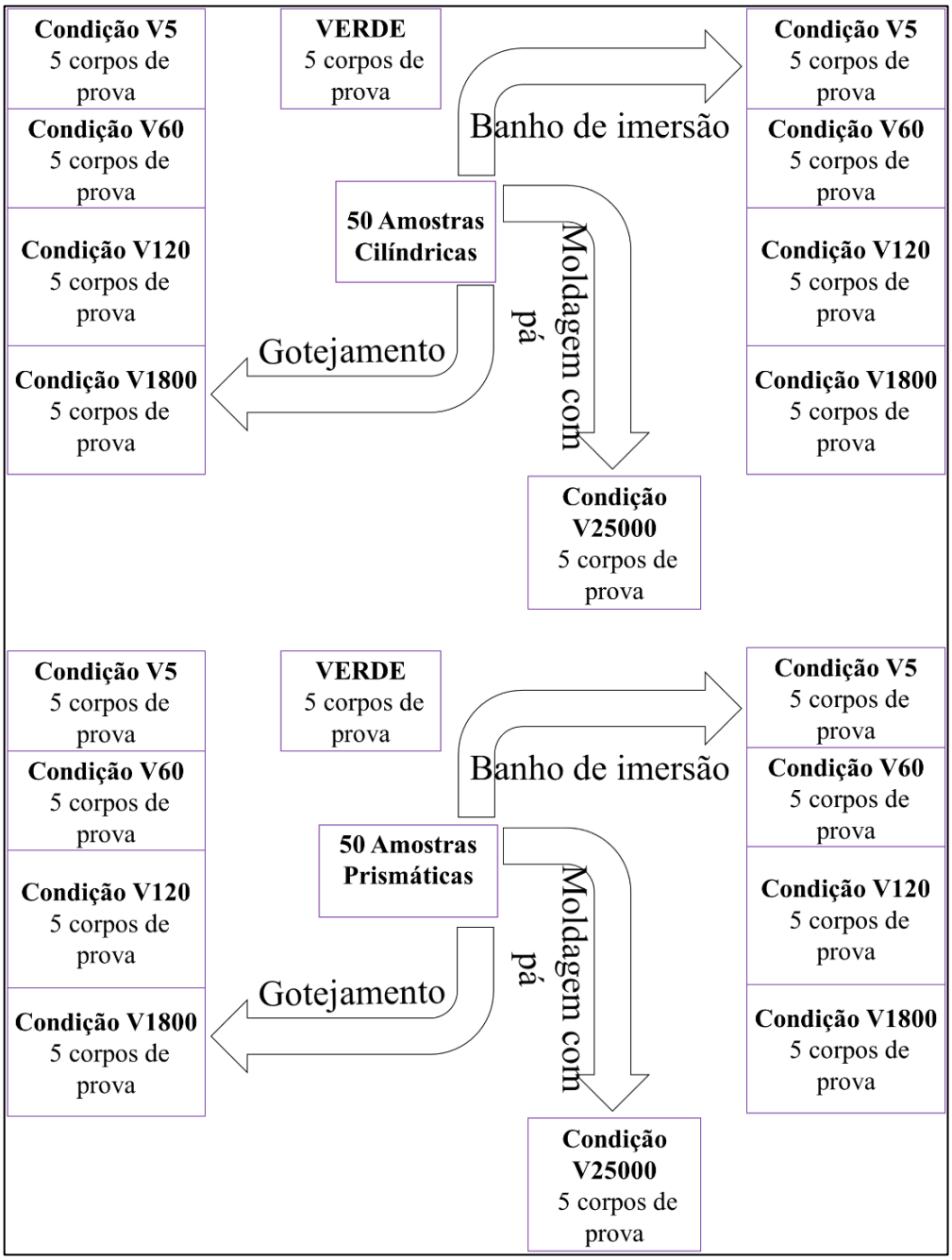
3.3.2 Pós-processamento

O pós-processamento da segunda etapa incluiu todos os adesivos e as duas técnicas de aplicação especificados previamente (gotejamento e moldagem com pá), mais a adição de uma terceira técnica de aplicação para os adesivos de cianocrilato:

- Banho de imersão, onde mergulha-se totalmente o corpo de prova, por cerca de cinco segundos, num recipiente contido com o adesivo desejado.

O esquema de execução adotado para o pós-processamento das amostras na segunda etapa pode ser visto na figura 20.

Figura 20 – Esquema dos pós-processamento da segunda etapa.



Fonte: Própria autora.

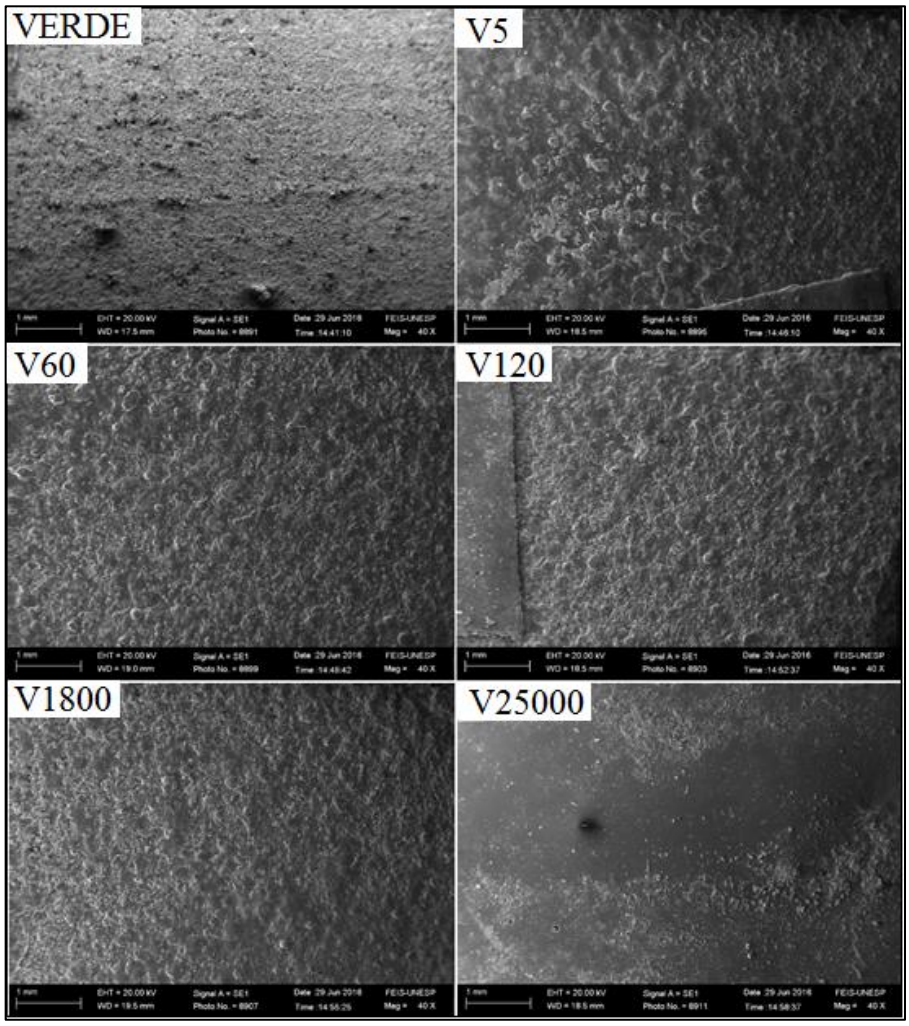
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PRIMEIRA ETAPA

4.1.1 Análise por imagens MEV

Na Figura 21, 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.

Figura 21 – Vista das superfícies dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x.



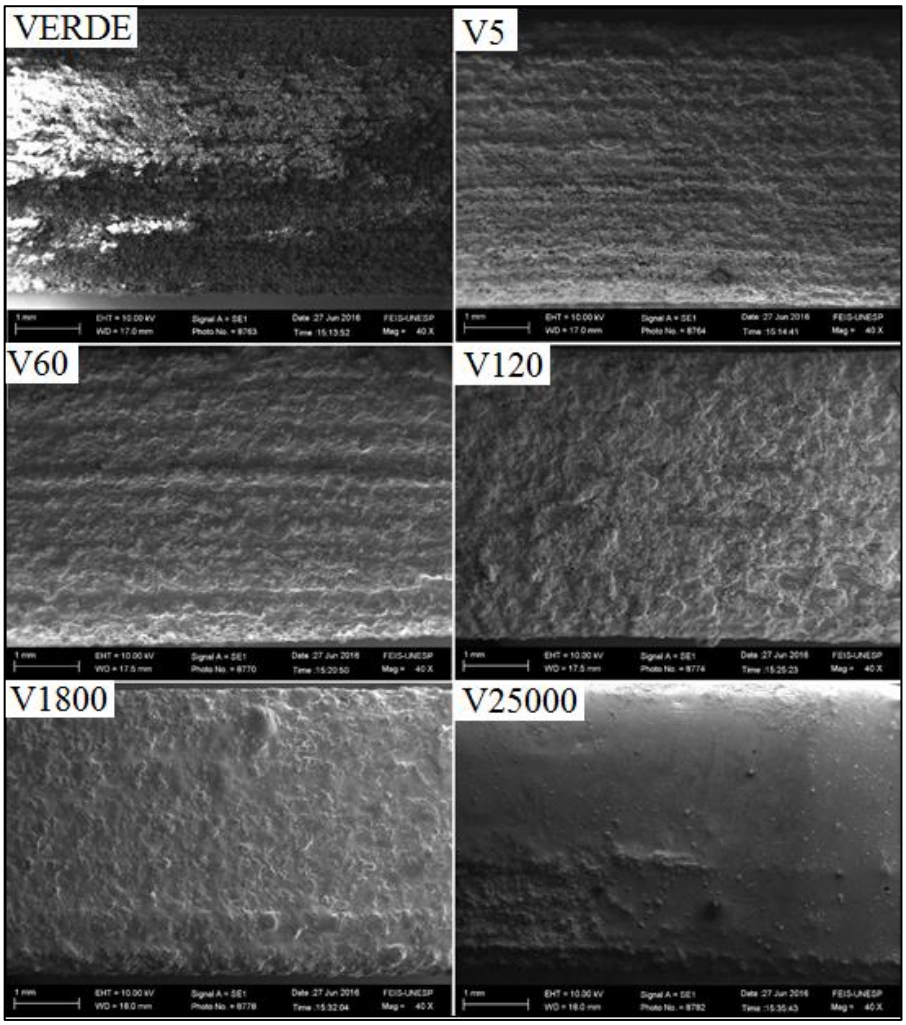
Fonte: Própria autora.

Já na Figura 22, constam imagens das laterais dos corpos de prova. Estas imagens revelaram as camadas justapostas, evidenciando o sentido de construção dos corpos de prova.

O corpo de prova verde realçou a irregularidade nas camadas, onde estas não coincidiram perfeitamente, mais uma particularidade da tecnologia 3DP.

Assim como nas superfícies dos corpos de prova, todos os adesivos foram capazes de envolver completamente suas laterais numa película, agregando-lhes uma textura microscopicamente mais estável.

Figura 22 – Vista das laterais dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x.



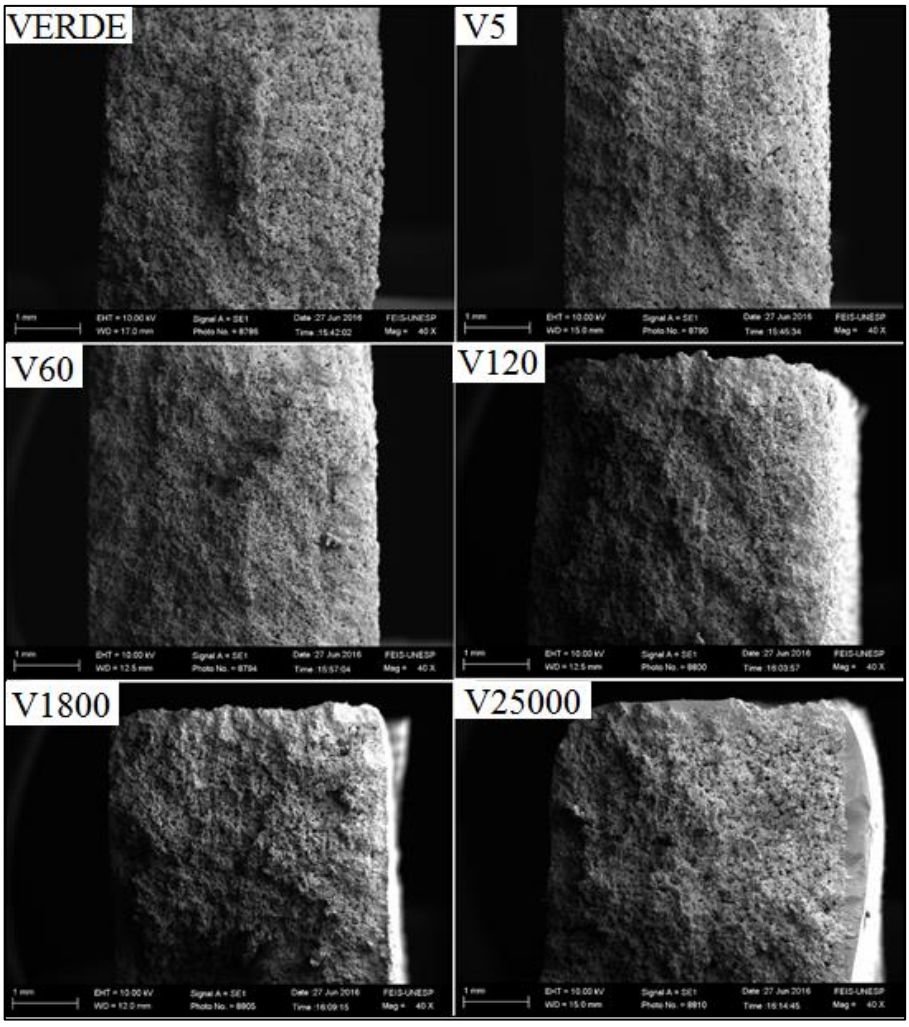
Fonte: Própria autora.

Na Figura 23, estão agrupadas imagens das seções transversais fraturadas dos corpos de prova, obtidas após os ensaios de flexão. A cor clara representa o alcance de penetração dos adesivos 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.

Figura 23 – Vista das fraturas dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x.



Fonte: Própria autora.

Tabela 2 – Médias com desvios padrões das penetrações e da envoltória dos adesivos nos corpos de prova

Condição	Penetração (mm)	Envoltória (mm)
V5	1,4 ± 0,2	-
V60	0,7 ± 0,0	-
V120	0,7 ± 0,0	-
V1800	0,4 ± 0,0	-
V25000	0,2 ± 0,0	0,2 ± 0,0

Fonte: Própria autora.

4.1.2 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. Estes dados são as massas, volumes e densidades aparentes das amostras, obtidos antes e depois do pós-processamento, onde:

$V = c \times l \times e$, para amostras prismáticas (1)

$V = \frac{\pi \times d^2}{4} \times h$, para amostras cilíndricas (2)

$D_s = \frac{m}{V}$, para ambas amostras (3)

Sendo c o comprimento [cm], l a largura [cm], e a espessura [cm], d o diâmetro [cm], h a altura [cm], m a massa [g], V o volume [cm^3] e D_s a densidade aparente [g/cm^3].

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 (2007), 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 consequentemente, 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 estudo.

De volta ao presente estudo, em termos de variações dimensionais, observou-se que as condições com viscosidades elevadas tendem a ganhar mais volume do que as condições de viscosidades mais baixas, devido à baixa penetração e consequente concentração dos adesivos nas superfícies e laterais das amostras.

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 (2007) 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 maneira diferente a deste estudo, e, em alguns casos, as peças foram colocadas no forno para maior absorção do adesivo. Quanto aos adesivos de cianocrilato, o autor não deixou claro qual método de aplicação foi adotado.

Já Grande Neto (2016) 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.

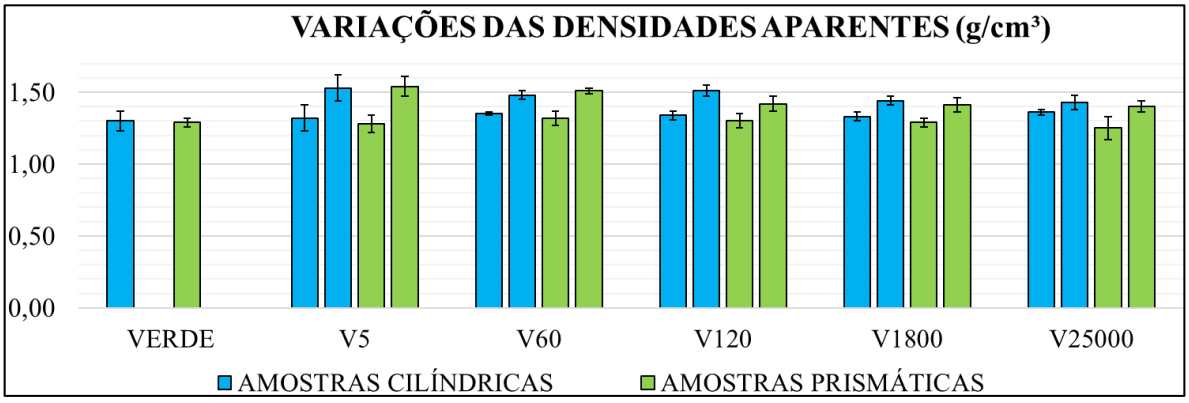
As figuras 24 e 25 proporcionam uma leitura mais compreensiva das variações de densidades aparentes médias e dos ganhos de resistências médias, com seus respectivos desvios padrões, que o pós-processamento proporcionou às amostras por condição.

Tabela 3 – Variações das densidades aparentes e resistências mecânicas médias com os respectivos desvios padrões para as amostras, antes e depois do pós-processamento.

Condição	AMOSTRAS CILÍNDRICAS						
	MASSA (g)		VOLUME (cm³)		DENSIDADE (g/cm³)		COMPR. MÁXIMA
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	(MPa)
VERDE	0,7 ± 0,0	-	0,52 ± 0,01	-	1,30 ± 0,07	-	2,78 ± 0,85
V5	0,7 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,51 ± 0,01	0,55 ± 0,01	1,32 ± 0,09	1,53 ± 0,09	28,01 ± 1,25
V60	0,7 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,52 ± 0,00	0,54 ± 0,01	1,35 ± 0,01	1,48 ± 0,03	19,91 ± 0,86
V120	0,7 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,52 ± 0,01	0,53 ± 0,01	1,34 ± 0,03	1,51 ± 0,04	16,09 ± 1,21
V1800	0,7 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,51 ± 0,02	0,56 ± 0,01	1,33 ± 0,03	1,44 ± 0,03	9,92 ± 1,44
V25000	0,7 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,52 ± 0,01	0,56 ± 0,02	1,36 ± 0,02	1,43 ± 0,05	4,57 ± 0,61
Condição	**AMOSTRAS PRISMÁTICAS**						
	MASSA (g)		VOLUME (cm³)		DENSIDADE (g/cm³)		FLEXÃO MÁXIMA
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	(MPa)
VERDE	1,2 ± 0,0	-	0,96 ± 0,02	-	1,29 ± 0,03	-	0,36 ± 0,05
V5	1,2 ± 0,0	1,5 ± 0,0	0,97 ± 0,01	1,00 ± 0,02	1,28 ± 0,06	1,54 ± 0,07	1,68 ± 0,23
V60	1,3 ± 0,0	1,5 ± 0,0	0,96 ± 0,01	0,99 ± 0,02	1,32 ± 0,05	1,51 ± 0,02	1,35 ± 0,12
V120	1,3 ± 0,0	1,5 ± 0,0	0,97 ± 0,01	1,03 ± 0,02	1,30 ± 0,05	1,42 ± 0,05	1,15 ± 0,09
V1800	1,2 ± 0,0	1,4 ± 0,1	0,96 ± 0,02	1,01 ± 0,03	1,29 ± 0,03	1,41 ± 0,05	0,96 ± 0,10
V25000	1,2 ± 0,0	1,4 ± 0,0	0,98 ± 0,06	1,02 ± 0,02	1,25 ± 0,08	1,40 ± 0,04	0,52 ± 0,17

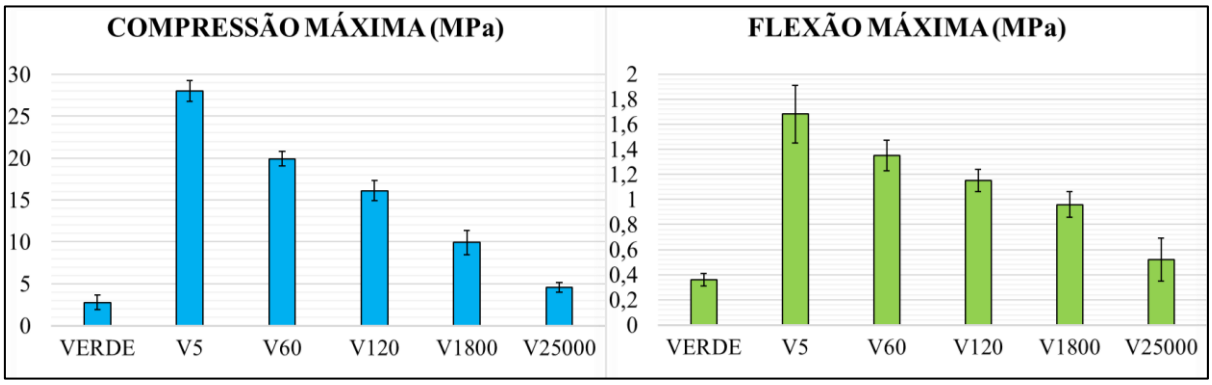
Fonte: Própria autora.

Figura 24 – Médias das variações de densidades aparentes com desvios padrões das amostras por condição.



Fonte: Própria autora.

Figura 25 – Ganhos de resistências médias com desvios padrões das amostras por condição.



Fonte: Própria autora.

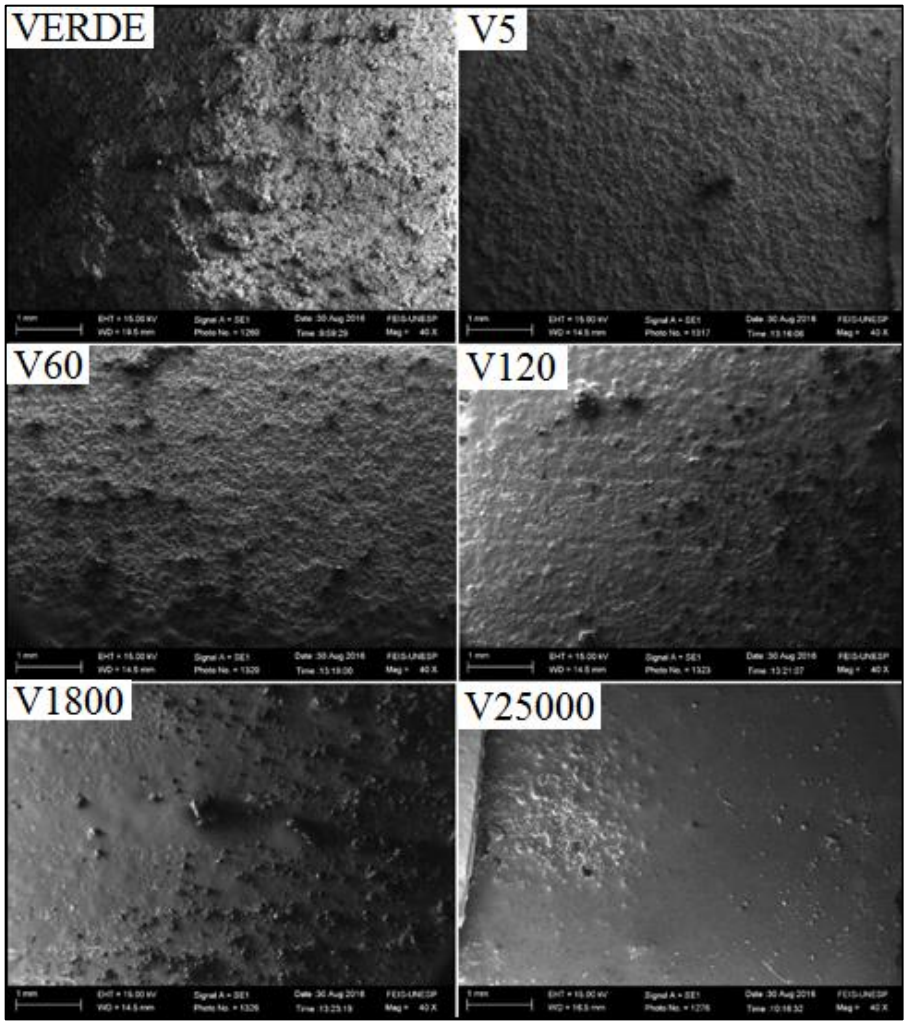
4.2 SEGUNDA ETAPA

4.2.1 Aplicações por Gotejamento

4.2.1.1 Análise por Imagens MEV

A utilização do *binder* alternativo cumpriu o mesmo propósito do *binder* da primeira etapa, produzindo amostras semelhantes as anteriores a olho nu. Porém, as imagens MEV da figura 26 revelam que a nova combinação proporcionou uma superfície mais enxuta do que as superfícies dos corpos de prova da primeira etapa, evidenciadas pelas ranhuras aparentes, mesmo depois de cobertas com os adesivos, resultando em maiores absorções gerais destes. No entanto, todos os adesivos conseguiram formar películas ao redor dos corpos de prova, melhorando suas aparências superficiais.

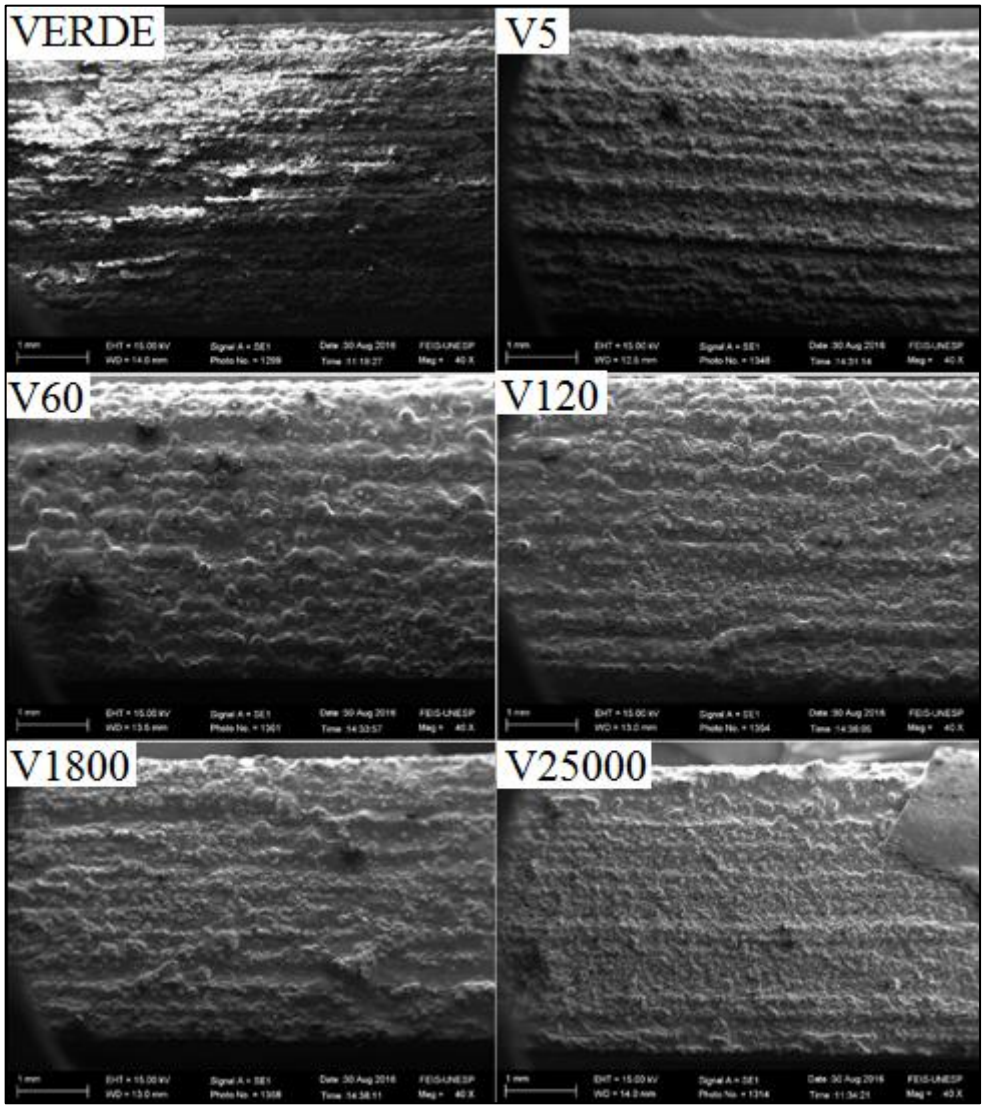
Figura 26 – Vista das superfícies dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x.



Fonte: Própria autora.

A figura 27 retrata as laterais do corpo de prova, com as camadas bem definidas e mais evidentes, mesmo após as aplicações dos adesivos, principalmente quando comparadas as laterais dos corpos de prova da primeira etapa, pela maior penetração dos adesivos, inclusive para a condição V25000.

Figura 27 – Vista das laterais dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x.

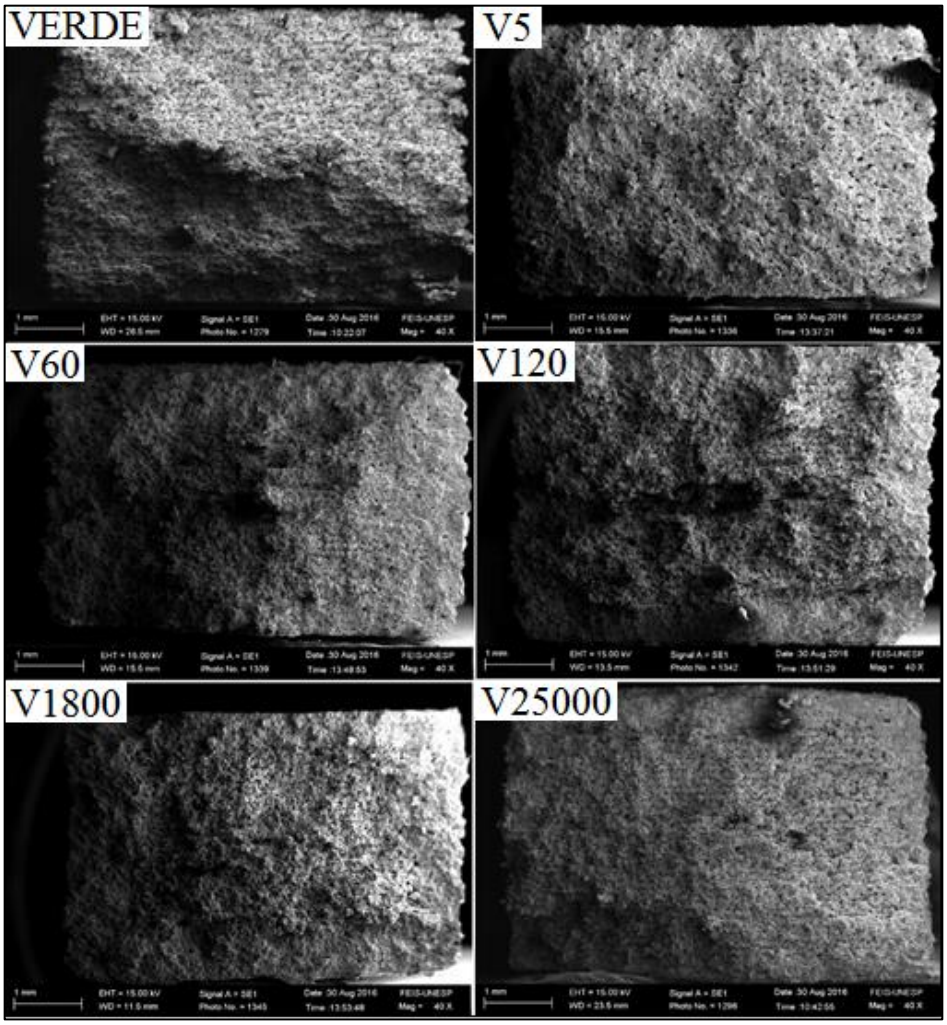


Fonte: Própria autora.

Na figura 28, encontram-se as fraturas dos corpos de prova, onde notou-se no corpo de prova verde camadas mais lineares e maior quantidade de vazios do que no corpo de prova da etapa anterior. Constatou-se ainda um ligeiro aumento no alcance dos adesivos em relação aos centros dos corpos de prova, sobretudo à condição V5. Também houve uma maior penetração do adesivo epóxi, resultando numa envoltória mais fina ao longo do corpo de prova.

As médias das penetrações e da envoltória dos adesivos nos corpos de prova podem ser vistas na tabela 4.

Figura 28 – Vista das fraturas dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x.



Fonte: Própria autora.

Tabela 4 – Médias com desvios padrões das penetrações e da envoltória dos adesivos nos corpos de prova.

Condição	Penetração (mm)	Envoltória (mm)
V5	1,7 ± 0,2	-
V60	1,0 ± 0,3	-
V120	0,5 ± 0,0	-
V1800	0,4 ± 0,0	-
V25000	0,3 ± 0,0	0,1 ± 0,0

Fonte: Própria autora.

4.2.1.2 Densidades Aparentes e Resistências Mecânicas

A tabela 5 indica que as amostras da presente etapa por gotejamento se tornaram mais densas do que as da primeira etapa, possivelmente em virtude do aumento da porosidade, ocasionando um acúmulo maior dos adesivos no interior das amostras. Como esperado, atribuiu-se as maiores variações de densidades aos adesivos de viscosidades mais baixas, onde o adesivo da condição V5 se sobressaiu novamente.

Observou-se novamente que as condições com viscosidades elevadas tendem a ganhar ligeiramente mais volume do que as condições de viscosidades mais baixas, por causa das concentrações dos adesivos próximos as superfícies. Entretanto, as variações gerais de volumes da segunda etapa por gotejamento obtiveram valores menores do que as variações da primeira etapa, por causa do espalhamento mais profundo dos adesivos.

Com respeito às resistências médias à compressão e à flexão das amostras, notou-se acréscimos altos de resistências conforme as viscosidades dos adesivos aplicados diminuem, sendo ainda no geral mais satisfatórios que os da etapa anterior.

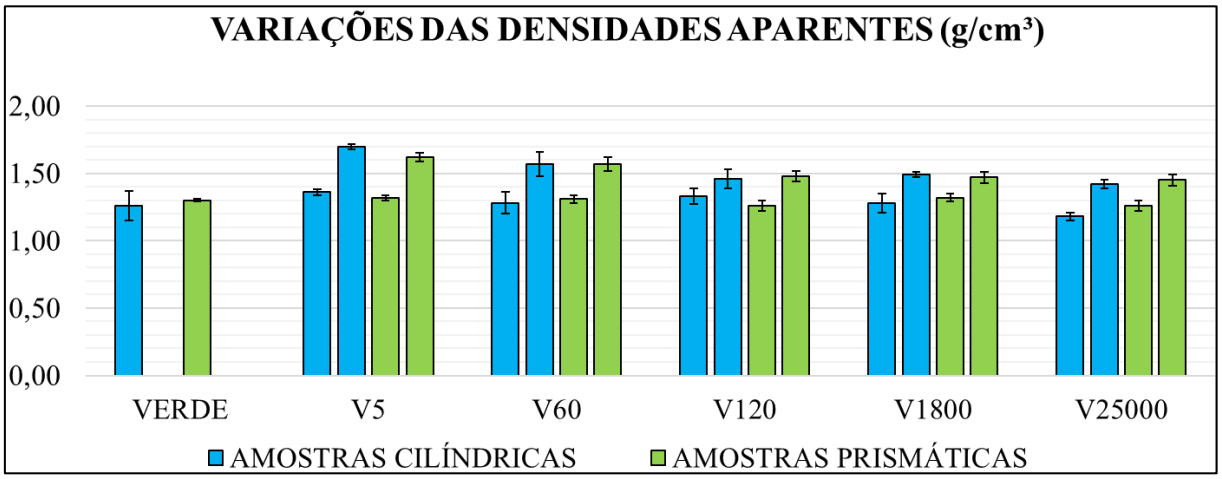
Nas figuras 29 e 30 podem ser vistos os gráficos com as variações de densidades médias e dos ganhos de resistências médias com seus respectivos desvios das amostras por condição.

Tabela 5 – Variações das densidades aparentes e resistências mecânicas médias com os respectivos desvios padrões para as amostras, antes e depois do pós-processamento.

Condição	AMOSTRAS CILÍNDRICAS						
	MASSA (g)		VOLUME (cm^3)		DENSIDADE (g/cm^3)		COMPR. MÁXIMA
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	(MPa)
VERDE	0,6 ± 0,0	-	0,51 ± 0,01	-	1,26 ± 0,11	-	2,81 ± 0,34
V5	0,7 ± 0,0	0,9 ± 0,0	0,51 ± 0,01	0,53 ± 0,01	1,36 ± 0,02	1,70 ± 0,02	33,74 ± 0,74
V60	0,6 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,52 ± 0,01	0,52 ± 0,02	1,28 ± 0,08	1,57 ± 0,09	20,16 ± 1,75
V120	0,7 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,51 ± 0,01	0,53 ± 0,01	1,33 ± 0,06	1,46 ± 0,07	13,54 ± 1,72
V1800	0,7 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,52 ± 0,01	0,54 ± 0,01	1,28 ± 0,07	1,49 ± 0,02	14,10 ± 1,80
V25000	0,6 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,51 ± 0,01	0,56 ± 0,01	1,18 ± 0,03	1,42 ± 0,03	4,42 ± 1,56
Condição	AMOSTRAS RETANGULARES						
	MASSA (g)		VOLUME (cm^3)		DENSIDADE (g/cm^3)		FLEXÃO MÁXIMA
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	(MPa)
VERDE	1,2 ± 0,0	-	0,94 ± 0,03	-	1,30 ± 0,01	-	0,30 ± 0,03
V5	1,2 ± 0,0	1,6 ± 0,1	0,94 ± 0,04	0,96 ± 0,04	1,32 ± 0,02	1,62 ± 0,03	1,66 ± 0,18
V60	1,2 ± 0,0	1,5 ± 0,1	0,93 ± 0,01	0,96 ± 0,01	1,31 ± 0,03	1,57 ± 0,05	1,66 ± 0,11
V120	1,2 ± 0,0	1,4 ± 0,0	0,93 ± 0,03	0,97 ± 0,02	1,26 ± 0,04	1,48 ± 0,04	1,17 ± 0,14
V1800	1,2 ± 0,0	1,4 ± 0,0	0,93 ± 0,01	0,98 ± 0,01	1,32 ± 0,03	1,47 ± 0,04	1,32 ± 0,05
V25000	1,2 ± 0,1	1,5 ± 0,1	0,94 ± 0,05	1,03 ± 0,06	1,26 ± 0,04	1,45 ± 0,04	0,59 ± 0,24

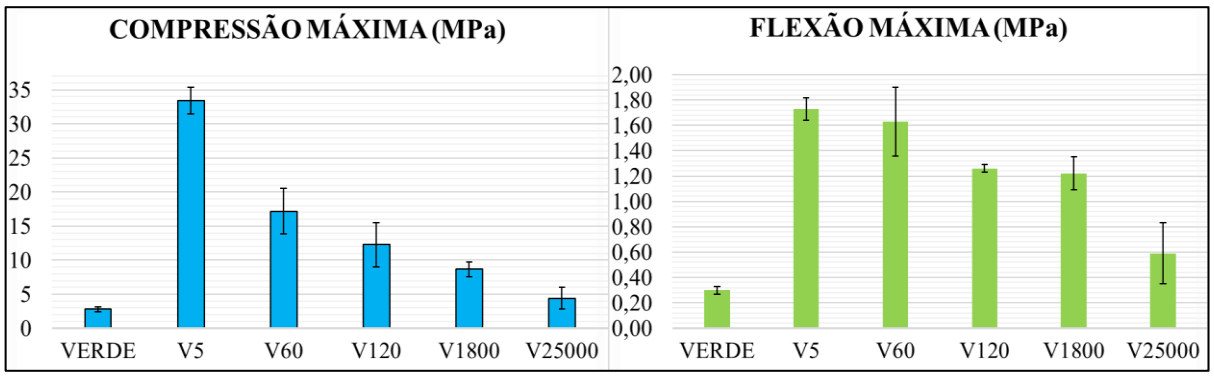
Fonte: Própria autora.

Figura 29 – Médias das variações de densidades aparentes com desvios padrões das amostras por condição.



Fonte: Própria autora.

Figura 30 – Ganhos de resistências médias com desvios padrões das amostras por condição.



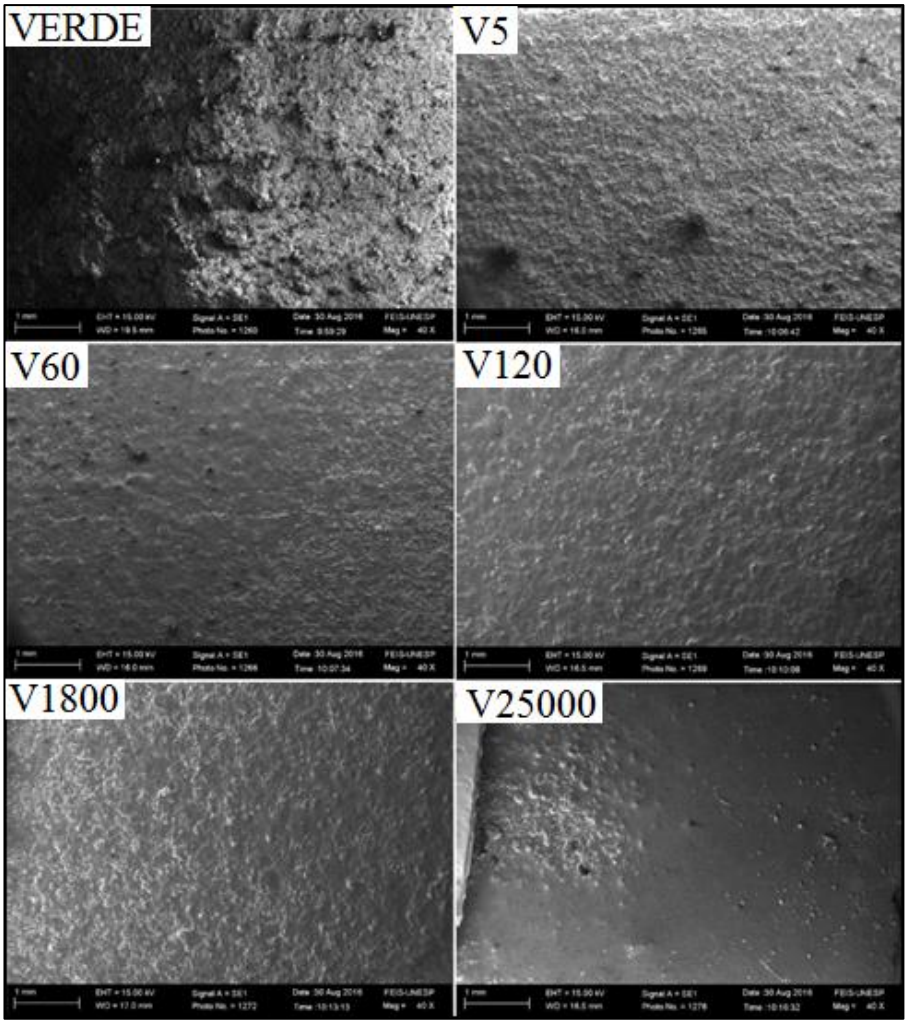
Fonte: Própria autora.

4.2.2 Aplicação por Banho de Imersão

4.2.2.1 Análise por Imagens MEV

A figura 31 expõe superfícies dos corpos de prova envolvidas pelas películas dos adesivos, onde estas películas aparentam ser mais espessas do que as películas das superfícies dos corpos de prova cobertos por gotejamento nesta mesma etapa. Isto ocorreu pois, ao mergulhar as amostras nos recipientes contendo os adesivos, moléculas de ar são aprisionadas entre os substratos das amostras e os adesivos, praticamente impossibilitando-os de penetrar mais profundamente as amostras.

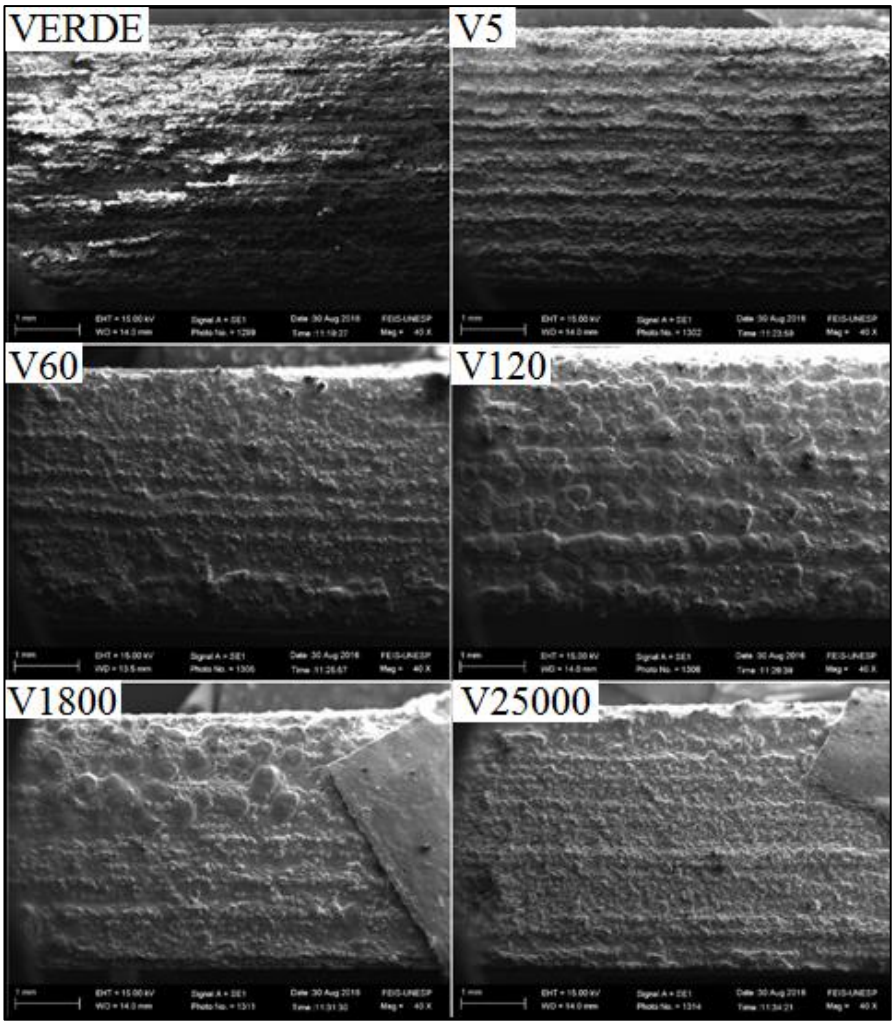
Figura 31 – Vista das superfícies dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x.



Fonte: Própria autora.

A figura 32 retrata as laterais do corpo de prova, semelhantes as laterais dos corpos de prova cobertos pelos adesivos por gotejamento desta etapa. Em relação a primeira etapa, as camadas ficaram mais aparentes, insinuando que, mesmo mergulhando os corpos de prova nos adesivos e aprisionando ar, houve uma absorção maior dos adesivos, pela maior quantidade de poros.

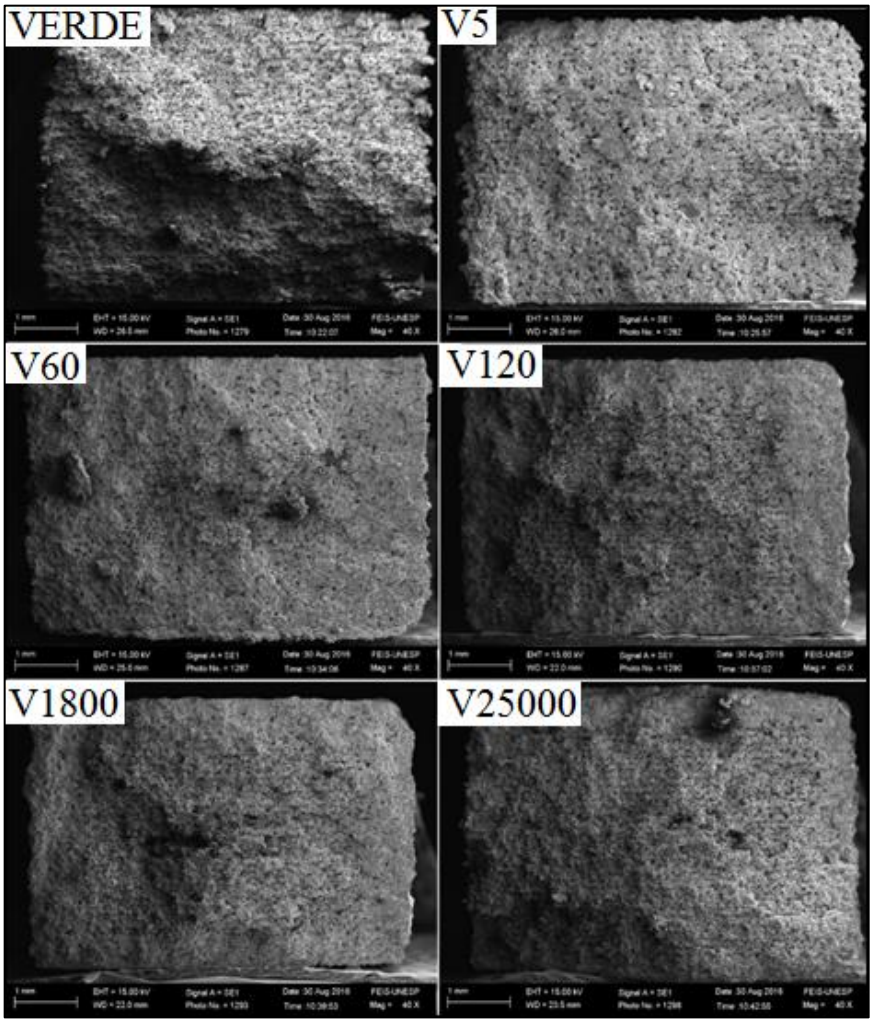
Figura 32 – Vista das laterais dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x.



Fonte: Própria autora.

Na figura 33, encontram-se as fraturas dos corpos de prova. É evidente que o banho de imersão tornou as bordas dos corpos de prova mais lineares e espessas em relação as situações anteriores. As penetrações estimadas e os desvios dos adesivos estão presentes na tabela 6.

Figura 33 – Vista das fraturas dos corpos de prova por condição no MEV, com aumento nominal de 40x.



Fonte: Própria autora.

Tabela 6 – Médias com desvios padrões das penetrações e da envoltória dos adesivos nos corpos de prova.

Condição	Penetração (mm)	Envoltória (mm)
V5	1,6 ± 0,1	-
V60	0,6 ± 0,0	-
V120	0,5 ± 0,1	-
V1800	0,4 ± 0,0	-
V25000	0,3 ± 0,0	0,1 ± 0,0

Fonte: Própria autora.

4.2.2.2 Densidades Aparentes e Resistências Mecânicas

A tabela 7 aponta que, as variações de densidades aparentes por banho de imersão, em relação as situações por gotejamento da primeira e da segunda etapas, foram maiores e menores, respectivamente, para todas as condições, alcançando as variações máximas com os adesivos de menores viscosidades. No entanto, as variações dimensionais atingiram valores moderadamente mais altos, conforme a diminuição das viscosidades dos adesivos.

Às resistências médias à compressão e à flexão das amostras, notou-se acréscimos altos conforme as viscosidades dos adesivos aplicados diminuem, sendo ainda no geral mais satisfatórios que o da etapa anterior, mas não desta mesma etapa por gotejamento.

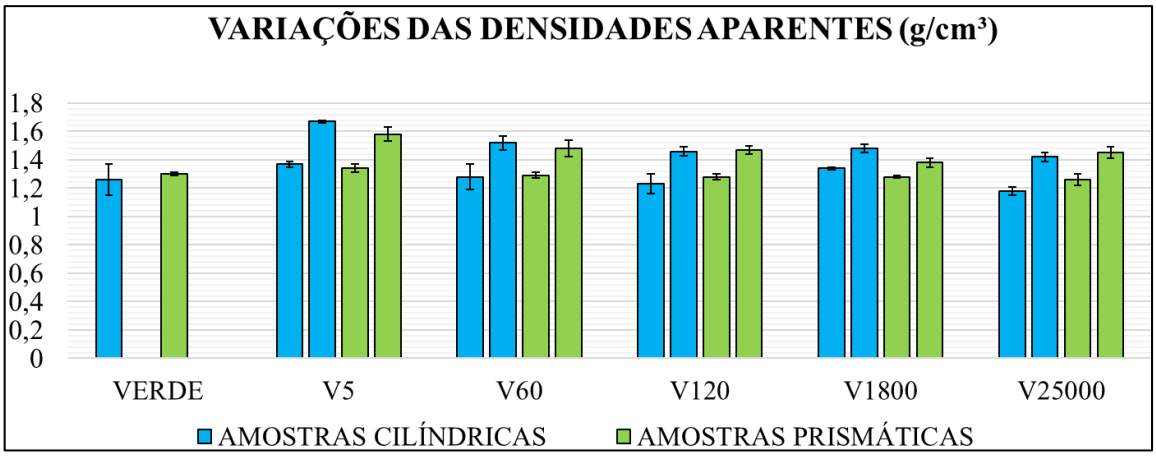
Nas figuras 34 e 35 podem ser vistos os gráficos com as variações de densidades médias e dos ganhos de resistências médias das amostras por condição.

Tabela 7 – Variações das densidades aparentes e resistências mecânicas médias com os respectivos desvios padrões para as amostras, antes e depois do pós-processamento.

Condição	AMOSTRAS CILÍNDRICAS						
	MASSA (g)		VOLUME (cm³)		DENSIDADE (g/cm³)		COMPR. MÁXIMA
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	(MPa)
VERDE	0,6 ± 0,0	-	0,51 ± 0,01	-	1,26 ± 0,11	-	2,81 ± 0,34
V5	0,7 ± 0,0	0,9 ± 0,0	0,51 ± 0,01	0,54 ± 0,00	1,37 ± 0,02	1,67 ± 0,01	33,45 ± 1,95
V60	0,7 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,53 ± 0,01	0,54 ± 0,01	1,28 ± 0,09	1,52 ± 0,05	17,17 ± 3,37
V120	0,6 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,50 ± 0,01	0,55 ± 0,01	1,23 ± 0,07	1,46 ± 0,03	12,29 ± 3,25
V1800	0,7 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,52 ± 0,01	0,54 ± 0,01	1,34 ± 0,01	1,48 ± 0,03	8,66 ± 1,09
V25000	0,6 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,51 ± 0,01	0,56 ± 0,01	1,18 ± 0,03	1,42 ± 0,03	4,42 ± 1,56
Condição	AMOSTRAS PRISMÁTICAS						
	MASSA (g)		VOLUME (cm³)		DENSIDADE (g/cm³)		FLEXÃO MÁXIMA
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	(MPa)
VERDE	1,2 ± 0,0	-	0,94 ± 0,03	-	1,30 ± 0,01	-	0,30 ± 0,03
V5	1,3 ± 0,0	1,6 ± 0,0	0,94 ± 0,03	0,99 ± 0,03	1,34 ± 0,03	1,58 ± 0,05	1,73 ± 0,09
V60	1,2 ± 0,0	1,5 ± 0,1	0,95 ± 0,05	1,00 ± 0,05	1,29 ± 0,02	1,48 ± 0,06	1,63 ± 0,27
V120	1,2 ± 0,0	1,5 ± 0,0	0,94 ± 0,01	1,02 ± 0,02	1,28 ± 0,02	1,47 ± 0,03	1,26 ± 0,03
V1800	1,2 ± 0,0	1,4 ± 0,0	0,97 ± 0,04	1,05 ± 0,04	1,28 ± 0,01	1,38 ± 0,03	1,22 ± 0,13
V25000	1,2 ± 0,1	1,5 ± 0,1	0,94 ± 0,05	1,03 ± 0,06	1,26 ± 0,04	1,45 ± 0,04	0,59 ± 0,24

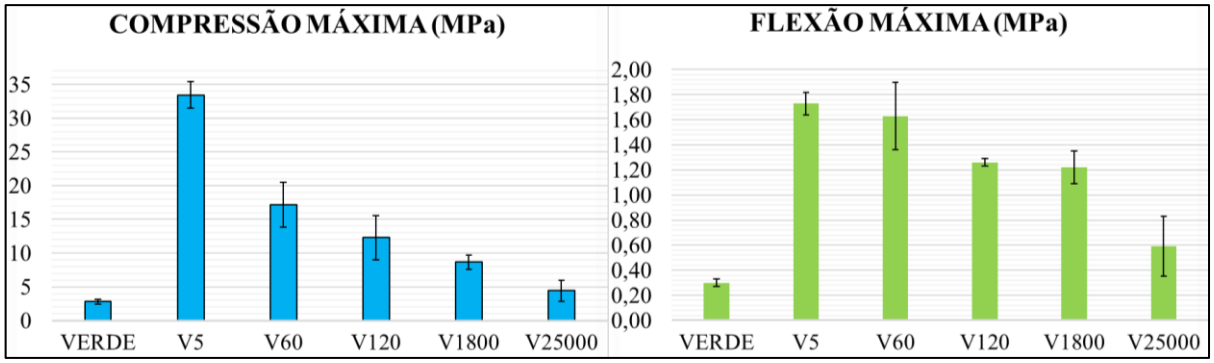
Fonte: Própria autora.

Figura 34 – Médias das variações de densidades aparentes com desvios das amostras por condição.



Fonte: Própria autora.

Figura 35 – Ganhos de resistências médias com desvios padrões das amostras por condição.



Fonte: Própria autora.

5 CONCLUSÕES

Através das análises das imagens MEV, observou-se que todos os adesivos pertencentes as condições de ambas as etapas conferiram um acabamento razoável às amostras, melhorando a textura dos corpos de prova e possibilitando então uma manipulação sem o desprendimento de resíduos. Além disto, as imagens das fraturas e as tabelas com estimação de penetrações confirmaram a capacidade de penetração e preenchimento de vazios para cada condição, onde a condição V5 leva maior vantagem, para ambas etapas.

Quanto às variações de densidades aparentes por condição, constatou-se que, as duas situações de aplicação da segunda etapa, gotejamento e banho de imersão, obtiveram maiores densidades aparentes do que as condições da primeira etapa. O adesivo da condição V5 tornou as amostras mais densas, com aumentos de 16% para amostras cilíndricas e 20% para as amostras prismáticas da primeira etapa. Já na segunda etapa, por gotejamento, obteve-se aumentos de 25% para amostras cilíndricas e 23% para amostras prismáticas. Por banho de imersão, os aumentos foram de 22% para amostras cilíndricas e 18% para amostras prismáticas. De forma generalizada, as menores variações dimensionais das amostras por condição ocorreram para as condições aplicadas por gotejamento da segunda etapa. Já as maiores, ocorreram para as condições aplicadas por banho de imersão, pois as aplicações dos adesivos concentraram-se nas superfícies e laterais das amostras, aumentando seus volumes.

Em termos de ganhos de resistências mecânicas à compressão e à flexão, as duas situações da segunda etapa se sobressaíram em relação a primeira etapa, com valores médios superiores para cada condição. Mais uma vez, a condição V5 se destacou, com ganhos de resistência mecânica de 908% para amostras cilíndricas e 367% para as amostras prismáticas da primeira etapa. Já na segunda etapa, por gotejamento, obteve-se aumentos de 1101% para amostras cilíndricas e 453% para amostras prismáticas. Por banho de imersão, os aumentos foram de 1090% para amostras cilíndricas e 477% para amostras prismáticas.

Portanto, conclui-se que o adesivo de cianocrilato pertencente a condição V5, de baixíssima viscosidade, aplicado pela técnica de gotejamento, confere maior resistência e aumento de densidade às amostras, com uma variação interna de volume, o que torna o produto final bem mais próximo de suas dimensões pré-determinadas, diferentemente dos adesivos de viscosidade elevada, e, por estes motivos, torna-se o agente infiltrante ideal para conceber o pós-processamento de um biomodelo feito à base gesso pela tecnologia 3DP.

REFERÊNCIAS

ASTM C1161-13. **Standard test method for flexural strength of advanced ceramics at ambient temperature.** West Conshohocken: ASTM International, 2013.

ASTM C1424-10. **Standard test method for monotonic compressive strength of advanced ceramics at ambient temperature.** West Conshohocken: ASTM International, 2010.

BANGA, K.et al. Rapid Prototyping Apllications in Medical Sciences. **IJETCAS**, v. 5, n. 8, p. 416-420, 2014.

BEAMAN, J. J. et al. Solid freeform fabrication: a new direction in manufacturing. **Kluwer Academic Publishers,** Norwell, v. 2061, p. 25-49, 1997.

BENS, A. et al. Non-toxic flexible photopolymers for medical stereolithography technology. **Rapid Prototyping Journal**, Bingley, v. 13, n. 1, p. 38-47, 2007.

BIBB, R.; WINDER, J. A review of the issues surrounding three-dimensional computed tomography for medical modelling using rapid prototyping techniques. **Radiography**, Canterbury, v. 16, n. 1, p. 78-83, 2010.

BILYEU, B.; BROSTOW, W.; MENARD, K. P. Epoxy thermosets and their applications I: chemical structures and applications. **Journal of Materials Education**, Denton, v. 21, n. 5/6, p. 281-286, 1999.

BIOMEDICAL MODELING. **Image gallery.** Boston, 2017. Disponível em: <http://www.biomodel.com/gallery.html>. Acesso em: 05 jul. 2017.

BRASIL. Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer. **Relatório anual 2009.** Brasília, DF, 2009.

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.

BREITLING, R.et al. Biomodel Engineering – from Structure to Behavior. **Transactions on Computational Systems Biology XII**, New York, v. 5945, p. 1-12, 2010.

CAMPBELL, R.I., BOURELL, D. and GIBSON, I., 2012. Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. **Rapid Prototyping Journal**, Bingley, v. 18, n. 4, p. 255-258, 2012.

CAMPBELL, T. et al. Could 3D Printing Change the World? **Technologies, Potential, and Implicaions of Additive Manufacturing, Atlantic Council.** Washington, [s. n.], 2011.

CASTON, P. **European Patents CH 211116 (1938).** 1938.

CONDINO, S. et al. How to build patient-specific synthetic abdominal anatomies. An innovative approach from physical toward hybrid surgical simulators. **The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery**, Chichester, v. 7, n. 2, p. 202-213, 2011.

COOVER, H. W. IRI Achievement Award Address: Discovery of Superglue Shows Power of Pursuing the Unexplained. **Research-Technology Management**, Lancaster, v. 43, n. 5, p. 36-39, 2000.

COOVER, H. W. Living Case Histories of Innovation: Cyanoacrylate Adhesives - A Day of Serendipity, A Decade of Hard Work. **Research Management**, Philadelphia, v. 23, n. 6, p. 37-40, 1980.

EDUCATIONAL materials: bonding/adhesives. Dusseldorf: Association of European Adhesives Manufacturers (FEICA), 2004.

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.

FUTURUM 3D. **Stereolitografia w technologii SLA.** Poznań, 2016. Disponível em: <https://futurum3d.pl/technologie/technologia-sla/>. Acesso em: 25 jun. 2016.

GAO, W. et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. **Computer-Aided Design**, Kidlington, v. 69, p. 65-89, 2015.

GATTO, M. **Investigation of 3DP technology for fabrication of surgical simulation phantoms**. 2011. 327 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Loughborough University, Loughborough, 2011.

GLOBAL INDO PRINTING. *Site.* Surabaya, 2016. Disponível em: <http://globalindoprinting.com/product/z-corp-450-3d-printer-color-rapid-prototyping/>. Acesso em: 05 jul. 2016.

GOUVEIA, M. F. **Aplicação da prototipagem rápida no planejamento de cirurgias craniofaciais**. 2009. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

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.

HOPKINSON, N., HAGUE, R., DICKENS, P. **Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age**. New York: John Wiley & Sons, 2006. 304 p.

INTER ACTIVE. **ProJet 160.** Houston, 2016. Disponível em: <https://www.icu3d.com/product/projet-160/>. Acesso em: 25 jun. 2016.

KARAPATIS, N P. GRIETHUYSEN, J., GLARDON, R. Direct rapid tooling: a review of current research. **Rapido Prototyping Journal**, Bingley, v. 4, n. 2, p. 77-89, 1998;

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.

KLEIN, G. T.,; LU, Y.; WANG, M. Y. 3D printing and neurosurgery: ready for prime time? **World Neurosurgery**, Philadelphia, v. 80, n. 3, p. 233-235, 2013.

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.

KRUTH, P. P. Material incress manufacturing by rapid prototyping techniques. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Amsterdam, v. 40, n. 2, p. 603–614, 1991.
LAM, C. X. F. et al. Scaffold development using 3D printing with a starch-based polymer. **Materials Science and Engineering: C**, Amsterdam, v. 20, n. 1, p. 49-56, 2002.

MALIK, H. H. et al. Three-dimensional printing in surgery: a review of current surgical applications. **Journal of Surgical Research**, Maryland Heights, v. 199, n. 2, p. 512-522, 2015.

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.

MONKHOUSE, D. C. et al. **Rapid prototyping and manufacturing process**. U.S. Patent n. 6,547,994, 15 abr. 2003.

OLIVEIRA, G. S., MARQUES, J. A. M. Uso da tecnologia de impressão tridimensional na rugoscopia palatina. **RBOL-Revista Brasileira de Odontologia Legal**, v. 2, n. 2, 2015.

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.

PROJET x60 Series 3D Printers. [S. l.], 2013.

RAPID PROTOTYPING CENTER. *Site.* Milwaukee, 2016. Disponível em: <http://rpc.msoe.edu/machines_sla.php>. Acesso em: 25 jun. 2016.

SACHS, E. M. et al. **Three dimensional printing techniques, United States Patent No**. U.S. Patent n. 005,340,656, 1994.

SAFETY DATA SHEET VISIJET® PXL Core. **3D SYSTEMS**. [S. l.], 2017. Disponívem em: <http://infocenter.3dsystems.com/materials/sites/default/files/sds-files/professional/22-83100-s12-01-asds_ghsenglishvisijet_pxl_core.pdf>. Acesso em 05 jul. 2017.

SCHMAUSS, D. et al. Three-dimensional printing of models for preoperative planning and simulation of transcatheter valve replacement. **The Annals of thoracic surgery**, Philadelphia, v. 93, n. 2, p. 31-33, 2012.

SHANTHA, K. L., THENNARASU, S., KRISHNAMURTI, N. Developments and applications of cyanoacrylate adhesives. **Journal of adhesion science and technology**, Abingdon, v. 3, n. 1, p. 237-260, 1989.

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.

SRIVATSAN, T. S.; SUDARSHAN, T. S. (Ed.). **Additive manufacturing: innovations, advances, and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2015.

TEKBOND. *Site.* Embu das Artes, 2016. Disponível em: < http://tekbond.com.br/produtos/>. Acesso em: 25 jun. 2016.

TUKURU, N. et al. Rapid prototype technique in medical field. **Research J. Pharm. And Tech.**, Mumbai, v. 1, n. 4, p. 341-344, 2008.

WINDISCH, G. et al. A model for clubfoot based on micro-CT data. **Journal of Anatomy**, New Delhi, v. 210, n.6, p. 761-766, 2007.

VOLPATO, N. et al. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da Impressão 3D**. São Paulo: Edgard Blücher, 2017. 400 p.

VOLPATO, N. et al. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 2007. 244 p.

APÊNDICE – DADOS COMPLETOS DAS AMOSTRAS

A.1 PRIMEIRA ETAPA

A.1.1 CONDIÇÃO VERDE

A.1.1.1 Amostras Cilíndricas

Tabela 8 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição verde.

Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm^3)	Dens.(g/cm^3)
1	0,7	6,87	14,15	0,52	1,34
2	0,7	6,85	14,08	0,52	1,35
3	0,7	6,93	14,13	0,53	1,31
4	0,7	6,91	14,13	0,53	1,32
5	0,6	6,78	14,27	0,51	1,17
MÉDIA	0,7	6,87	14,15	0,52	1,30
DESV. P	0,0	0,05	0,06	0,01	0,07

Fonte: Própria autora.

Tabela 9 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição verde.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00003707	122,17	3,30
2	0,00003685	132,63	3,60
3	0,00003772	132,61	3,52
4	0,00003750	66,35	1,77
5	0,00003610	62,62	1,73
MÉDIA	0,00003705	103,28	2,78
DESV. P	0,00000056	31,92	0,85

Fonte: Própria autora.

A.1.1.2 Amostras Prismáticas

Tabela 10 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição verde.

Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	1,2	40,03	5,96	3,96	0,95	1,27
2	1,2	40,08	5,92	4,04	0,96	1,25
3	1,2	40,01	5,92	4,00	0,95	1,27
4	1,3	40,10	6,07	4,00	0,97	1,34
5	1,3	40,17	6,01	4,12	0,99	1,31
MÉDIA	1,2	40,08	5,98	4,02	0,96	1,29
DESV. P	0,0	0,06	0,06	0,05	0,02	0,03

Fonte: Própria autora.

Tabela 11 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição verde.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00002360	7,62	0,32
2	0,00002392	8,36	0,35
3	0,00002368	7,87	0,33
4	0,00002428	11,15	0,46
5	0,00002476	7,83	0,32
MÉDIA	0,00002405	8,57	0,36
DESV. P	0,00000043	1,31	0,05

Fonte: Própria autora.

A.1.2 CONDIÇÃO V5

A.1.2.1 Amostras Cilíndricas

Tabela 12 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V5.

ANTES						ANTES					
Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	0,7	6,80	14,11	0,51	1,37	1	0,9	7,04	14,28	0,56	1,62
2	0,7	6,71	14,13	0,50	1,40	2	0,9	6,98	14,20	0,54	1,66
3	0,7	6,85	14,11	0,52	1,35	3	0,8	7,03	14,39	0,56	1,43
4	0,7	6,82	14,12	0,52	1,36	4	0,8	6,98	14,10	0,54	1,48
5	0,6	6,86	14,15	0,52	1,15	5	0,8	6,96	14,21	0,54	1,48
MÉDIA	0,7	6,81	14,12	0,51	1,32	MÉDIA	0,8	7,00	14,24	0,55	1,53
DESV. P	0,0	0,05	0,01	0,01	0,09	DESV. P	0,0	0,03	0,10	0,01	0,09

Fonte: Própria autora.

Tabela 13 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V5.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00003893	1.163,62	29,89
2	0,00003827	1.004,28	26,25
3	0,00003882	1.052,54	27,12
4	0,00003827	1.087,82	28,43
5	0,00003805	1.078,89	28,36
MÉDIA	0,00003846	1077,43	28,01
DESV. P	0,00000034	51,98	1,25

Fonte: Própria autora.

A.1.2.2 Amostras Prismáticas

Tabela 14 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticao na condição V5.

ANTES							DEPOIS						
Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	1,3	40,04	6,04	3,97	0,96	1,36	1	1,5	40,08	6,14	4,01	0,99	1,52
2	1,2	40,15	5,92	4,07	0,97	1,24	2	1,5	40,20	6,07	4,15	1,01	1,48
3	1,3	40,03	5,98	3,98	0,95	1,36	3	1,6	40,08	6,03	4,03	0,97	1,64
4	1,2	40,11	5,95	4,09	0,98	1,23	4	1,6	40,11	5,00	4,15	1,00	1,61
5	1,2	40,14	5,98	4,08	0,98	1,22	5	1,5	40,20	6,12	4,18	1,03	1,46
MÉDIA	1,2	40,09	5,97	4,04	0,97	1,28	MÉDIA	1,5	40,13	5,87	4,10	1,00	1,54
DESV. P	0,0	0,05	0,04	0,05	0,01	0,06	DESV. P	0,0	0,05	0,44	0,07	0,02	0,07

Fonte: Própria autora.

Tabela 15 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V5

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00002462	37,77	1,53
2	0,00002519	34,20	1,36
3	0,00002430	47,53	1,96
4	0,00002075	39,73	1,91
5	0,00002558	41,96	1,64
MÉDIA	0,00002409	40,24	1,68
DESV. P	0,00000173	4,45	0,23

Fonte: Própria autora.

A.1.3 CONDIÇÃO V60

A.1.3.1 Amostras Cilíndricas

Tabela 16 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V60.

ANTES						ANTES					
Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	0,7	6,79	14,13	0,51	1,37	1	0,8	7,01	14,32	0,55	1,45
2	0,7	6,87	14,17	0,52	1,33	2	0,8	6,92	14,21	0,53	1,50
3	0,7	6,86	14,15	0,52	1,34	3	0,8	6,95	14,52	0,55	1,45
4	0,7	6,85	14,10	0,52	1,35	4	0,8	6,93	14,08	0,53	1,51
5	0,7	6,87	14,07	0,52	1,34	5	0,8	6,89	14,23	0,53	1,51
MÉDIA	0,7	6,85	14,12	0,52	1,35	MÉDIA	0,8	6,94	14,27	0,54	1,48
DESV. P	0,0	0,03	0,04	0,00	0,01	DESV. P	0,0	0,04	0,15	0,01	0,03

Fonte: Própria autora.

Tabela 17 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V60.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00003859	756,72	19,61
2	0,00003761	760,51	20,22
3	0,00003794	711,50	18,75
4	0,00003772	740,32	19,63
5	0,00003728	795,93	21,35
MÉDIA	0,00003783	753,00	19,91
DESV. P	0,00000044	27,55	0,86

Fonte: Própria autora.

A.1.3.2 Amostras Prismáticas

Tabela 18 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V60.

ANTES							DEPOIS						
Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	1,2	40,03	5,92	4,07	0,96	1,24	1	1,5	40,19	6,03	4,14	1,00	1,50
2	1,3	40,15	5,95	4,09	0,98	1,33	2	1,5	40,20	6,06	4,18	1,02	1,47
3	1,3	40,12	5,98	3,97	0,95	1,37	3	1,5	40,17	6,08	4,04	0,99	1,52
4	1,2	39,99	5,90	3,96	0,93	1,28	4	1,5	40,10	5,97	4,06	0,97	1,54
5	1,3	40,06	5,99	3,98	0,96	1,36	5	1,5	40,23	6,07	4,05	0,99	1,52
MÉDIA	1,3	40,07	5,95	4,01	0,96	1,32	MÉDIA	1,5	40,18	6,04	4,09	0,99	1,51
DESV. P	0,0	0,06	0,03	0,05	0,01	0,05	DESV. P	0,0	0,04	0,04	0,06	0,02	0,02

Fonte: Própria autora.

Tabela 19 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V60.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00002496	33,64	1,35
2	0,00002533	29,30	1,16
3	0,00002456	36,23	1,47
4	0,00002424	36,16	1,49
5	0,00002458	31,53	1,28
MÉDIA	0,00002474	33,37	1,35
DESV. P	0,00000038	2,68	0,12

Fonte: Própria autora.

A.1.4 CONDIÇÃO V120

A.1.4.1 Amostras Cilíndricas

Tabela 20 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V120.

ANTES						ANTES					
Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	0,7	6,92	14,13	0,53	1,32	1	0,8	6,92	14,41	0,54	1,48
2	0,7	6,88	14,15	0,53	1,33	2	0,8	6,88	14,43	0,54	1,49
3	0,7	6,92	14,09	0,53	1,32	3	0,8	6,92	14,23	0,53	1,50
4	0,7	6,75	14,10	0,50	1,39	4	0,8	6,75	14,18	0,51	1,58
5	0,7	6,90	14,10	0,53	1,33	5	0,8	6,90	14,38	0,54	1,49
MÉDIA	0,7	6,87	14,11	0,52	1,34	MÉDIA	0,8	6,87	14,33	0,53	1,51
DESV. P	0,0	0,06	0,02	0,01	0,03	DESV. P	0,0	0,06	0,10	0,01	0,04

Fonte: Própria autora.

Tabela 21 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V120.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00003761	611,47	16,26
2	0,00003718	532,85	14,33
3	0,00003761	666,67	17,73
4	0,00003578	606,05	16,94
5	0,00003739	568,64	15,21
MÉDIA	0,00003711	597,14	16,09
DESV. P	0,00000068	44,87	1,21

Fonte: Própria autora.

A.1.4.2 Amostras Prismáticas

Tabela 22 – Dados médios com desvios padões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V120.

ANTES							DEPOIS						
Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	1,3	40,10	6,03	3,98	0,96	1,35	1	1,5	40,55	6,03	4,08	1,00	1,50
2	1,3	40,09	5,93	4,04	0,96	1,35	2	1,5	40,34	6,10	4,21	1,04	1,45
3	1,3	40,18	5,98	4,12	0,99	1,31	3	1,5	40,47	6,11	4,31	1,06	1,41
4	1,2	40,09	5,90	4,07	0,96	1,25	4	1,4	40,26	6,08	4,20	1,03	1,36
5	1,2	40,08	5,92	4,03	0,96	1,25	5	1,4	40,32	6,09	4,16	1,02	1,37
MÉDIA	1,3	40,11	5,95	4,05	0,97	1,30	MÉDIA	1,5	40,39	6,08	4,19	1,03	1,42
DESV. P	0,0	0,04	0,05	0,05	0,01	0,05	DESV. P	0,0	0,11	0,03	0,07	0,02	0,05

Fonte: Própria autora.

Tabela 23 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V120.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00002460	24,18	0,98
2	0,00002568	30,06	1,17
3	0,00002633	29,93	1,14
4	0,00002554	30,80	1,21
5	0,00002533	31,70	1,25
MÉDIA	0,00002550	29,33	1,15
DESV. P	0,00000056	2,65	0,09

Fonte: Própria autora.

A.1.5 CONDIÇÃO V1800

A.1.5.1 Amostras Cilíndricas

Tabela 24 – Dados médios com desvios padões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V1800.

ANTES						ANTES					
Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	0,6	6,54	14,08	0,47	1,27	1	0,8	7,10	14,27	0,56	1,42
2	0,7	6,90	14,05	0,53	1,33	2	0,8	7,05	14,29	0,56	1,43
3	0,7	6,85	14,10	0,52	1,35	3	0,8	7,04	14,45	0,56	1,42
4	0,7	6,81	14,11	0,51	1,36	4	0,8	6,90	14,26	0,53	1,50
5	0,7	6,90	14,13	0,53	1,33	5	0,8	7,06	14,34	0,56	1,43
MÉDIA	0,7	6,80	14,09	0,51	1,33	MÉDIA	0,8	7,03	14,32	0,56	1,44
DESV. P	0,0	0,13	0,03	0,02	0,03	DESV. P	0,0	0,07	0,07	0,01	0,03

Fonte: Própria autora.

Tabela 25 – Dados médios com desvios padões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V1800.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00003959	460,88	11,64
2	0,00003904	455,44	11,67
3	0,00003893	350,88	9,01
4	0,00003739	312,75	8,36
5	0,00003915	348,05	8,89
MÉDIA	0,00003882	385,60	9,92
DESV. P	0,00000075	60,77	1,44

Fonte: Própria autora.

A.1.5.2 Amostras Prismáticas

Tabela 26 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V1800.

ANTES							DEPOIS						
Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	1,2	40,04	5,88	3,99	0,94	1,28	1	1,3	40,02	5,97	4,05	0,97	1,34
2	1,2	40,11	5,98	3,95	0,95	1,27	2	1,4	40,25	6,05	4,06	0,99	1,42
3	1,3	40,11	5,96	4,06	0,97	1,34	3	1,5	40,20	6,05	4,19	1,02	1,47
4	1,2	40,07	5,93	4,04	0,96	1,25	4	1,4	40,29	6,01	4,20	1,02	1,38
5	1,3	40,17	6,02	4,11	1,00	1,31	5	1,5	40,15	6,14	4,22	1,04	1,44
MÉDIA	1,2	40,10	5,95	4,03	0,96	1,29	MÉDIA	1,4	40,18	6,04	4,14	1,01	1,41
DESV. P	0,0	0,04	0,05	0,06	0,02	0,03	DESV. P	0,1	0,09	0,06	0,07	0,03	0,05

Fonte: Própria autora.

Tabela 27 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V1800.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00002418	20,99	0,87
2	0,00002456	21,66	0,88
3	0,00002535	27,27	1,08
4	0,00002524	27,65	1,10
5	0,00002591	22,88	0,88
MÉDIA	0,00002505	24,09	0,96
DESV. P	0,00000061	2,82	0,10

Fonte: Própria autora.

A.1.6 CONDIÇÃO V25000

A.1.6.1 Amostras Cilíndricas

Tabela 28 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V25000.

ANTES						ANTES					
Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	0,7	6,90	14,09	0,53	1,33	1	0,8	7,23	14,44	0,59	1,35
2	0,7	6,87	14,07	0,52	1,34	2	0,8	6,99	14,39	0,55	1,45
3	0,7	6,87	14,06	0,52	1,34	3	0,8	7,08	14,59	0,57	1,39
4	0,7	6,75	14,20	0,51	1,38	4	0,8	6,97	14,35	0,55	1,46
5	0,7	6,76	14,07	0,50	1,39	5	0,8	6,87	14,45	0,54	1,49
MÉDIA	0,7	6,83	14,10	0,52	1,36	MÉDIA	0,8	7,03	14,44	0,56	1,43
DESV. P	0,0	0,06	0,05	0,01	0,02	DESV. P	0,0	0,12	0,08	0,02	0,05

Fonte: Própria autora.

Tabela 29 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V25000.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00004106	171,70	4,18
2	0,00003837	218,30	5,69
3	0,00003937	161,58	4,10
4	0,00003816	181,43	4,76
5	0,00003707	153,43	4,14
MÉDIA	0,00003880	177,29	4,57
DESV. P	0,00000134	22,57	0,61

Fonte: Própria autora.

A.1.6.2 Amostras Prismáticas

Tabela 30 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V25000

ANTES							DEPOIS						
Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	1,2	40,02	5,90	4,01	0,95	1,27	1	1,4	40,16	6,09	4,16	1,02	1,38
2	1,2	40,05	5,96	3,94	0,94	1,27	2	1,4	40,27	6,15	4,09	1,01	1,38
3	1,2	39,96	5,87	4,92	0,92	1,30	3	1,4	40,10	5,92	4,16	0,99	1,42
4	1,2	40,06	5,89	4,64	1,09	1,10	4	1,4	40,55	6,04	4,23	1,04	1,35
5	1,3	40,12	5,96	4,10	0,98	1,33	5	1,5	40,27	6,03	4,24	1,03	1,46
MÉDIA	1,2	40,04	5,92	4,32	0,98	1,25	MÉDIA	1,4	40,27	6,05	4,18	1,02	1,40
DESV. P	0,0	0,05	0,04	0,39	0,06	0,08	DESV. P	0,0	0,15	0,08	0,05	0,02	0,04

Fonte: Própria autora.

Tabela 31 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V25000

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00002533	10,75	0,42
2	0,00002515	10,03	0,40
3	0,00002463	8,16	0,33
4	0,00002555	19,86	0,78
5	0,00002557	16,94	0,66
MÉDIA	0,00002525	13,15	0,52
DESV. P	0,00000034	4,47	0,17

Fonte: Própria autora.

A.2 SEGUNDA ETAPA

A.2.1 CONDIÇÃO VERDE

A.2.1.1 Amostras Cilíndricas

Tabela 32 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição verde.

Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm^3)	Dens.(g/cm^3)
1	0,6	6,85	14,08	0,52	1,16
2	0,7	6,70	14,10	0,50	1,41
3	0,6	6,81	14,18	0,52	1,16
4	0,7	6,72	14,33	0,51	1,38
5	0,6	6,74	14,27	0,51	1,18
MÉDIA	0,6	6,76	14,19	0,51	1,26
DESV. P	0,0	0,06	0,10	0,01	0,11

Fonte: Própria autora.

Tabela 33 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição verde.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00003685	101,57	2,76
2	0,00003526	118,41	3,36
3	0,00003642	92,61	2,54
4	0,00003547	85,38	2,41
5	0,00003568	106,66	2,99
MÉDIA	0,00003594	100,93	2,81
DESV. P	0,00000060	11,40	0,34

Fonte: Própria autora.

A.2.1.2 Amostras Prismáticas

Tabela 34 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição verde.

Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm^3)	Dens.(g/cm^3)
1	1,2	40,00	5,80	4,01	0,93	1,29
2	1,2	39,95	5,76	4,01	0,92	1,30
3	1,2	39,90	5,76	4,00	0,92	1,30
4	1,3	40,01	5,82	4,32	1,00	1,29
5	1,2	39,98	5,79	3,95	0,91	1,31
MÉDIA	1,2	39,97	5,79	4,06	0,94	1,30
DESV. P	0,0	0,04	0,02	0,13	0,03	0,01

Fonte: Própria autora.

Tabela 35 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição verde

Corpo de prova	Área (m^2)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00002326	7,09	0,30
2	0,00002310	6,98	0,30
3	0,00002304	6,57	0,29
4	0,00002514	6,62	0,26
5	0,00002287	8,03	0,35
MÉDIA	0,00002348	7,06	0,30
DESV. P	0,00000084	0,53	0,03

Fonte: Própria autora.

A.2.2 GOTEJAMENTO

A.2.2.1 Condição V5

A.2.2.1.1 Amostras cilíndricas

Tabela 36 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V5.

ANTES						ANTES					
Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	0,7	6,88	14,11	0,52	1,34	1	0,9	6,91	14,17	0,53	1,69
2	0,7	6,74	14,16	0,50	1,39	2	0,9	6,97	14,18	0,54	1,66
3	0,7	6,84	14,19	0,52	1,34	3	0,9	6,81	14,23	0,52	1,74
4	0,7	6,78	14,17	0,51	1,37	4	0,9	6,89	14,20	0,53	1,70
5	0,7	6,78	14,14	0,51	1,37	5	0,9	6,94	14,17	0,54	1,68
MÉDIA	0,7	6,80	14,15	0,51	1,36	MÉDIA	0,9	6,90	14,19	0,53	1,70
DESV. P	0,0	0,05	0,03	0,01	0,02	DESV. P	0,0	0,05	0,02	0,01	0,02

Fonte: Própria autora.

Tabela 37 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V5.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00003750	1.294,35	34,51
2	0,00003816	1.264,06	33,13
3	0,00003642	1.212,30	33,28
4	0,00003728	1.230,92	33,01
5	0,00003783	1.314,62	34,75
MÉDIA	0,00003744	1263,25	33,74
DESV. P	0,00000059	38,07	0,74

Fonte: Própria autora.

A.2.2.1.2 Amostras Prismáticas

Tabela 38 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V5.

ANTES							DEPOIS						
Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	1,2	40,02	5,82	3,99000000	0,93	1,29	1	1,5	40,01	5,88	4,04	0,95	1,58
2	1,3	40,00	5,83	4,19000000	0,98	1,33	2	1,6	39,97	5,91	4,23	1,00	1,60
3	1,2	40,00	5,73	3,95000000	0,90	1,33	3	1,5	40,05	5,81	3,99	0,93	1,62
4	1,2	39,94	5,81	3,87000000	0,90	1,34	4	1,5	39,93	5,86	3,91	0,91	1,64
5	1,3	39,99	5,78	4,31000000	1,00	1,30	5	1,7	40,01	5,84	4,38	1,02	1,66
MÉDIA	1,2	39,99	5,79	4,06200000	0,94	1,32	MÉDIA	1,6	39,99	5,86	4,11	0,96	1,62
DESV. P	0,0	0,03	0,04	0,16277592	0,04	0,02	DESV. P	0,1	0,04	0,03	0,17	0,04	0,03

Fonte: Própria autora.

Tabela 39 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V5.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00002376	32,31	1,36
2	0,00002500	43,45	1,74
3	0,00002318	41,19	1,78
4	0,00002291	35,97	1,57
5	0,00002558	47,58	1,86
MÉDIA	0,00002409	40,10	1,66
DESV. P	0,00000104	5,41	0,18

Fonte: Própria autora.

A.2.2.2 Condição V60

A.2.2.2.1 Amostras Cilíndricas

Tabela 40 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V60

ANTES						ANTES					
Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	0,7	6,85	14,17	0,52	1,34	1	0,9	6,81	14,25	0,52	1,73
2	0,7	6,90	14,28	0,53	1,31	2	0,8	6,95	14,39	0,55	1,47
3	0,6	6,80	14,24	0,52	1,16	3	0,8	6,83	14,43	0,53	1,51
4	0,6	6,68	14,10	0,49	1,21	4	0,8	6,70	14,18	0,50	1,60
5	0,7	6,77	14,15	0,51	1,37	5	0,8	6,80	14,20	0,52	1,55
MÉDIA	0,7	6,80	14,19	0,52	1,28	MÉDIA	0,8	6,82	14,29	0,52	1,57
DESV. P	0,0	0,07	0,06	0,01	0,08	DESV. P	0,0	0,08	0,10	0,02	0,09

Fonte: Própria autora.

Tabela 41 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V60

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00003642	678,24	18,62
2	0,00003794	706,78	18,63
3	0,00003664	702,89	19,18
4	0,00003526	750,82	21,30
5	0,00003632	837,12	23,05
MÉDIA	0,00003651	735,17	20,16
DESV. P	0,00000086	56,09	1,75

Fonte: Própria autora.

A.2.2.2.2 Amostras Prismáticas

Tabela 42 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V60.

ANTES							DEPOIS						
Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	1,3	39,96	5,86	4,08	0,96	1,36	1	1,6	40,12	5,90	4,14	0,98	1,63
2	1,2	39,99	5,84	3,98	0,93	1,29	2	1,5	40,00	5,87	4,03	0,95	1,58
3	1,2	40,00	5,83	3,96	0,92	1,30	3	1,5	40,00	5,92	4,07	0,96	1,56
4	1,2	39,99	5,84	3,90	0,91	1,32	4	1,4	40,02	5,93	3,96	0,94	1,49
5	1,2	39,93	5,82	3,99	0,93	1,29	5	1,5	39,97	5,89	4,07	0,96	1,57
MÉDIA	1,2	39,97	5,84	3,98	0,93	1,31	MÉDIA	1,5	40,02	5,90	4,05	0,96	1,57
DESV. P	0,0	0,03	0,01	0,06	0,01	0,03	DESV. P	0,1	0,05	0,02	0,06	0,01	0,05

Fonte: Própria autora.

Tabela 43 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V60.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00002443	38,07	1,56
2	0,00002366	37,42	1,58
3	0,00002409	44,98	1,87
4	0,00002348	37,78	1,61
5	0,00002397	39,83	1,66
MÉDIA	0,00002393	39,62	1,66
DESV. P	0,00000033	2,81	0,11

Fonte: Própria autora.

A.2.2.3 Condição V120

A.2.2.3.1 Amostras Cilíndricas

Tabela 44 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V120.

ANTES						ANTES					
Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	0,7	6,86	14,29	0,53	1,33	1	0,8	6,83	14,49	0,53	1,51
2	0,7	6,83	14,16	0,52	1,35	2	0,8	6,95	14,37	0,54	1,47
3	0,6	6,66	14,13	0,49	1,22	3	0,7	6,83	14,49	0,53	1,32
4	0,7	6,73	14,20	0,50	1,39	4	0,8	6,77	14,47	0,52	1,54
5	0,7	6,86	14,10	0,52	1,34	5	0,8	6,94	14,40	0,54	1,47

Fonte: Própria autora.

Tabela 45 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V120.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00003664	578,15	15,78
2	0,00003794	444,21	11,71
3	0,00003664	491,49	13,41
4	0,00003600	418,53	11,63
5	0,00003783	574,67	15,19
MÉDIA	0,00003701	501,41	13,54
DESV. P	0,00000075	65,57	1,72

Fonte: Própria autora.

A.2.2.3.2 Amostras Prismáticas

Tabela 46 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V120.

ANTES							DEPOIS						
Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	1,2	40,01	5,79	3,96	0,92	1,31	1	1,4	40,32	5,99	4,06	0,98	1,43
2	1,2	43,00	5,79	3,99	0,99	1,21	2	1,4	40,17	5,92	4,09	0,97	1,44
3	1,2	39,99	5,77	4,05	0,93	1,29	3	1,5	40,30	5,85	4,15	0,98	1,53
4	1,2	40,00	5,81	4,02	0,93	1,28	4	1,5	40,32	5,96	4,14	0,99	1,51
5	1,1	40,02	5,72	3,90	0,89	1,23	5	1,4	40,30	5,83	4,03	0,95	1,48
MÉDIA	1,2	40,60	5,78	3,98	0,93	1,26	MÉDIA	1,4	40,28	5,91	4,09	0,97	1,48
DESV. P	0,0	1,20	0,03	0,05	0,03	0,04	DESV. P	0,0	0,06	0,06	0,05	0,02	0,04

Fonte: Própria autora.

Tabela 47 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V120.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00002432	29,84	1,23
2	0,00002421	30,30	1,25
3	0,00002428	31,39	1,29
4	0,00002467	22,40	0,91
5	0,00002349	27,93	1,19
MÉDIA	0,00002420	28,37	1,17
DESV. P	0,00000039	3,19	0,14

Fonte: Própria autora.

A.2.2.4 Condição V1800

A.2.2.4.1 Amostras Cilíndricas

Tabela 48 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V1800.

ANTES						ANTES					
Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	0,7	6,91	14,13	0,53	1,32	1	0,8	6,93	14,28	0,54	1,49
2	0,7	6,86	14,10	0,52	1,34	2	0,8	6,98	14,15	0,54	1,48
3	0,7	6,82	14,22	0,52	1,35	3	0,8	6,94	14,43	0,55	1,47
4	0,6	6,66	14,21	0,49	1,21	4	0,8	6,87	14,41	0,53	1,50
5	0,6	6,78	14,16	0,51	1,17	5	0,8	6,88	14,24	0,53	1,51
MÉDIA	0,7	6,81	14,16	0,52	1,28	MÉDIA	0,8	6,92	14,30	0,54	1,49
DESV. P	0,0	0,08	0,05	0,01	0,07	DESV. P	0,0	0,04	0,11	0,01	0,02

Fonte: Própria autora.

Tabela 49 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V1800.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00003772	515,29	13,66
2	0,00003827	605,69	15,83
3	0,00003783	408,53	10,80
4	0,00003707	556,40	15,01
5	0,00003718	565,43	15,21
MÉDIA	0,00003761	530,27	14,10
DESV. P	0,00000044	67,31	1,80

Fonte: Própria autora.

A.2.2.4.2 Amostras Prismáticas

Tabela 50 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V1800.

ANTES							DEPOIS						
Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	1,2	40,02	5,77	4,01	0,93	1,30	1	1,4	40,17	5,96	4,09	0,98	1,43
2	1,2	39,92	5,82	3,99	0,93	1,29	2	1,4	40,42	6,06	4,04	0,99	1,41
3	1,2	39,65	5,86	3,92	0,91	1,32	3	1,4	40,13	5,95	4,01	0,96	1,46
4	1,3	40,00	5,87	4,04	0,95	1,37	4	1,5	40,14	5,93	4,13	0,98	1,53
5	1,2	39,98	5,82	3,92	0,91	1,32	5	1,5	40,30	5,96	4,12	0,99	1,51
MÉDIA	1,2	39,91	5,83	3,98	0,93	1,32	MÉDIA	1,4	40,23	5,97	4,08	0,98	1,47
DESV. P	0,0	0,14	0,04	0,05	0,01	0,03	DESV. P	0,0	0,11	0,05	0,05	0,01	0,04

Fonte: Própria autora.

Tabela 51 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V1800.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00002438	32,62	1,34
2	0,00002448	32,27	1,32
3	0,00002386	33,45	1,40
4	0,00002449	31,78	1,30
5	0,00002456	30,46	1,24
MÉDIA	0,00002435	32,12	1,32
DESV. P	0,00000025	0,99	0,05

Fonte: Própria autora.

A.2.3 BANHO DE IMERSÃO

A.2.3.1 Condição V5

A.2.3.1.1 Amostras Cilíndricas

Tabela 52 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V5.

ANTES						ANTES					
Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	0,7	6,74	14,10	0,50	1,39	1	0,9	6,91	14,31	0,54	1,68
2	0,7	6,73	14,18	0,50	1,39	2	0,9	6,90	14,39	0,54	1,67
3	0,7	6,76	14,19	0,51	1,38	3	0,9	6,98	14,27	0,55	1,65
4	0,7	6,82	14,27	0,52	1,34	4	0,9	6,90	14,39	0,54	1,67
5	0,7	6,82	14,17	0,52	1,35	5	0,9	6,91	14,22	0,53	1,69
MÉDIA	0,7	6,77	14,18	0,51	1,37	MÉDIA	0,9	6,92	14,32	0,54	1,67
DESV. P	0,0	0,04	0,05	0,01	0,02	DESV. P	0,0	0,03	0,07	0,00	0,01

Fonte: Própria autora.

Tabela 53 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V5.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00003750	1.361,87	36,32
2	0,00003739	1.282,26	34,29
3	0,00003827	1.302,39	34,04
4	0,00003739	1.149,62	30,74
5	0,00003750	1.195,63	31,88
MÉDIA	0,00003761	1258,35	33,45
DESV. P	0,00000033	76,14	1,95

Fonte: Própria autora.

A.2.3.1.2 Amostras Prismáticas

Tabela 54 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V5.

ANTES							DEPOIS						
Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	1,3	39,91	5,82	3,97	0,92	1,41	1	1,6	40,53	5,91	4,01	0,96	1,67
2	1,3	39,89	5,77	4,27	0,98	1,32	2	1,6	40,62	5,83	4,37	1,03	1,55
3	1,2	39,94	5,71	3,97	0,90	1,33	3	1,5	40,41	5,80	4,03	0,95	1,59
4	1,2	39,92	5,78	3,92	0,90	1,33	4	1,5	40,57	6,02	4,00	0,98	1,54
5	1,3	39,93	5,76	4,23	0,97	1,34	5	1,6	40,69	5,85	4,27	1,02	1,58
MÉDIA	1,3	39,92	5,77	4,07	0,94	1,34	MÉDIA	1,6	40,56	5,88	4,14	0,99	1,58
DESV. P	0,0	0,02	0,04	0,15	0,03	0,03	DESV. P	0,0	0,09	0,08	0,15	0,03	0,05

Fonte: Própria autora.

Tabela 55 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V5.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00002370	40,13	1,69
2	0,00002548	44,00	1,73
3	0,00002337	40,07	1,71
4	0,00002408	38,95	1,62
5	0,00002498	47,18	1,89
MÉDIA	0,0000243	42,07	1,73
DESV. P	0,0000008	3,08	0,09

Fonte: Própria autora.

A.2.3.2 Condição V60

A.2.3.2.1 Amostras cilíndricas

Tabela 56 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V60.

ANTES						ANTES					
Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	0,7	6,91	14,26	0,53	1,31	1	0,8	6,87	14,33	0,53	1,51
2	0,7	6,79	14,34	0,52	1,35	2	0,8	6,85	14,52	0,53	1,50
3	0,7	6,88	14,11	0,52	1,34	3	0,9	6,97	14,57	0,56	1,62
4	0,6	6,97	14,37	0,55	1,09	4	0,8	6,82	14,73	0,54	1,49
5	0,7	6,86	14,31	0,53	1,32	5	0,8	6,85	14,41	0,53	1,51
MÉDIA	0,7	6,88	14,28	0,53	1,28	MÉDIA	0,8	6,87	14,51	0,54	1,52
DESV. P	0,0	0,06	0,09	0,01	0,09	DESV. P	0,0	0,05	0,14	0,01	0,05

Fonte: Própria autora.

Tabela 57 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V60.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00003707	703,71	18,98
2	0,00003685	653,60	17,74
3	0,00003816	843,45	22,11
4	0,00003653	530,41	14,52
5	0,00003685	460,96	12,51
MÉDIA	0,00003709	638,43	17,17
DESV. P	0,00000056	133,93	3,37

Fonte: Própria autora.

A.2.3.2.2 Amostras Prismáticas

Tabela 58 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V60.

ANTES							DEPOIS						
Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	1,2	39,98	5,83	4,00	0,93	1,29	1	1,5	40,73	5,90	4,16	1,00	1,50
2	1,2	39,95	5,73	4,04	0,92	1,30	2	1,4	40,71	5,80	4,17	0,98	1,42
3	1,2	39,93	5,82	3,91	0,91	1,32	3	1,4	40,35	5,92	4,07	0,97	1,44
4	1,2	39,93	5,84	3,99	0,93	1,29	4	1,5	40,17	5,89	4,03	0,95	1,57
5	1,3	39,96	5,82	4,49	1,04	1,24	5	1,6	40,59	5,91	4,62	1,11	1,44
MÉDIA	1,2	39,95	5,81	4,09	0,95	1,29	MÉDIA	1,5	40,51	5,88	4,21	1,00	1,48
DESV. P	0,0	0,02	0,04	0,21	0,05	0,02	DESV. P	0,1	0,22	0,04	0,21	0,05	0,06

Fonte: Própria autora.

Tabela 59 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V60.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00002454	39,70	1,62
2	0,00002419	33,36	1,38
3	0,00002409	33,50	1,39
4	0,00002374	39,15	1,65
5	0,00002730	57,94	2,12
MÉDIA	0,00002477	40,73	1,63
DESV. P	0,00000129	9,01	0,27

Fonte: Própria autora.

A.2.3.3 Condição V120

A.2.3.3.1 Amostras cilíndricas

Tabela 60 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V120.

ANTES						ANTES					
Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	0,6	6,78	14,18	0,51	1,17	1	0,8	6,99	14,47	0,55	1,44
2	0,6	6,69	14,17	0,50	1,21	2	0,8	6,89	14,53	0,54	1,48
3	0,7	6,82	14,12	0,52	1,36	3	0,8	6,92	14,51	0,55	1,47
4	0,6	6,68	14,41	0,50	1,19	4	0,8	7,00	14,76	0,57	1,41
5	0,6	6,63	14,31	0,49	1,22	5	0,8	6,88	14,37	0,53	1,50
MÉDIA	0,6	6,72	14,24	0,50	1,23	MÉDIA	0,8	6,94	14,53	0,55	1,46
DESV. P	0,0	0,07	0,11	0,01	0,07	DESV. P	0,0	0,05	0,13	0,01	0,03

Fonte: Própria autora.

Tabela 61 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V120.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00003837	438,36	11,42
2	0,00003728	327,06	8,77
3	0,00003761	601,47	15,99
4	0,00003848	347,73	9,04
5	0,00003718	602,61	16,21
MÉDIA	0,00003779	463,45	12,29
DESV. P	0,00000055	119,20	3,25

Fonte: Própria autora.

A.2.3.3.2 Amostras Prismáticas

Tabela 62 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V120.

ANTES							DEPOIS						
Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	1,2	39,97	5,83	4,10	0,96	1,26	1	1,5	41,53	5,95	4,23	1,05	1,43
2	1,2	39,97	5,81	3,97	0,92	1,30	2	1,5	40,30	6,04	4,16	1,01	1,48
3	1,2	40,04	5,85	4,03	0,94	1,27	3	1,5	40,77	6,04	4,15	1,02	1,47
4	1,2	39,94	5,75	4,04	0,93	1,29	4	1,5	40,65	5,86	4,12	0,98	1,53
5	1,2	40,03	5,85	4,03	0,95	1,27	5	1,5	40,67	6,00	4,21	1,03	1,46
MÉDIA	1,2	39,99	5,82	4,03	0,94	1,28	MÉDIA	1,5	40,78	5,98	4,17	1,02	1,47
DESV. P	0,0	0,04	0,04	0,04	0,01	0,02	DESV. P	0,0	0,41	0,07	0,04	0,02	0,03

Fonte: Própria autora.

Tabela 63 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V120.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00002517	31,93	1,27
2	0,00002513	30,98	1,23
3	0,00002507	30,93	1,23
4	0,00002414	30,02	1,24
5	0,00002526	33,27	1,32
MÉDIA	0,00002495	31,43	1,26
DESV. P	0,00000041	1,10	0,03

Fonte: Própria autora.

A.2.3.4 Condição V1800

A.2.3.4.1 Amostras cilíndricas

Tabela 64 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V1800.

ANTES						ANTES					
Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	0,7	6,86	14,05	0,52	1,35	1	0,8	6,91	14,57	0,55	1,46
2	0,7	6,83	14,17	0,52	1,35	2	0,8	6,79	14,59	0,53	1,52
3	0,7	6,94	14,11	0,53	1,31	3	0,8	6,88	14,87	0,55	1,45
4	0,7	6,85	14,12	0,52	1,35	4	0,8	6,97	14,45	0,55	1,45
5	0,7	6,83	14,14	0,52	1,35	5	0,8	6,86	14,36	0,53	1,51
MÉDIA	0,7	6,86	14,12	0,52	1,34	MÉDIA	0,8	6,88	14,57	0,54	1,48
DESV. P	0,0	0,04	0,04	0,01	0,01	DESV. P	0,0	0,06	0,17	0,01	0,03

Fonte: Própria autora.

Tabela 65 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V1800.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00003750	329,64	8,79
2	0,00003621	383,96	10,60
3	0,00003718	322,40	8,67
4	0,00003816	285,42	7,48
5	0,00003696	286,84	7,76
MÉDIA	0,00003720	321,65	8,66
DESV. P	0,00000064	35,98	1,09

Fonte: Própria autora.

A.2.3.4.2 Amostras Prismáticas

Tabela 66 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos da condição V1800.

ANTES							DEPOIS						
Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	1,2	39,90	5,72	4,02	0,92	1,31	1	1,4	40,61	5,87	4,26	1,02	1,38
2	1,2	39,94	5,84	4,05	0,95	1,27	2	1,5	40,88	5,99	4,38	1,07	1,40
3	1,2	39,95	5,82	4,02	0,94	1,28	3	1,4	40,94	6,04	4,23	1,05	1,34
4	1,3	39,90	5,83	4,35	1,01	1,28	4	1,5	41,05	6,02	4,50	1,11	1,35
5	1,3	39,95	5,73	4,47	1,02	1,27	5	1,4	40,35	5,93	4,12	0,98	1,42
MÉDIA	1,2	39,93	5,79	4,18	0,97	1,28	MÉDIA	1,4	40,77	5,97	4,30	1,05	1,38
DESV. P	0,0	0,02	0,05	0,19	0,04	0,01	DESV. P	0,0	0,25	0,06	0,13	0,04	0,03

Fonte: Própria autora.

Tabela 67 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V1800.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00002501	32,41	1,30
2	0,00002624	34,59	1,32
3	0,00002555	30,58	1,20
4	0,00002709	35,23	1,30
5	0,00002443	23,62	0,97
MÉDIA	0,00002566	31,29	1,22
DESV. P	0,00000093	4,17	0,13

Fonte: Própria autora.

A.2.4 Condição V25000

A.2.4.1 Amostras cilíndricas

Tabela 68 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova cilíndricos na condição V25000.

ANTES						ANTES					
Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Diâm.(mm)	Altura(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	0,6	6,64	14,13	0,49	1,23	1	0,8	6,95	14,53	0,55	1,45
2	0,6	6,78	14,10	0,51	1,18	2	0,8	7,04	14,65	0,57	1,40
3	0,6	6,84	14,15	0,52	1,15	3	0,8	7,06	14,68	0,57	1,39
4	0,6	6,84	14,07	0,52	1,16	4	0,8	7,04	14,65	0,57	1,40
5	0,6	6,74	14,28	0,51	1,18	5	0,8	6,93	14,55	0,55	1,46
MÉDIA	0,6	6,77	14,15	0,51	1,18	MÉDIA	0,8	7,00	14,61	0,56	1,42
DESV. P	0,0	0,07	0,07	0,01	0,03	DESV. P	0,0	0,05	0,06	0,01	0,03

Fonte: Própria autora.

Tabela 69 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova cilíndricos na condição V25000.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00003794	192,48	5,07
2	0,00003893	104,69	2,69
3	0,00003915	143,48	3,67
4	0,00003893	278,16	7,15
5	0,00003772	133,24	3,53
MÉDIA	0,00003853	170,41	4,42
DESV. P	0,00000058	60,87	1,56

Fonte: Própria autora.

A.2.4.2 Amostras Prismáticas

Tabela 70 – Dados médios com desvios padrões das massas e dimensões dos corpos de prova prismáticos na condição V25000.

ANTES							DEPOIS						
Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)	Corpo de prova	Massa(g)	Compr.(mm)	Larg.(mm)	Espess.(mm)	Vol.(cm³)	Dens.(g/cm³)
1	1,2	39,99	5,81	3,97	0,92	1,30	1	1,5	40,17	5,97	4,27	1,02	1,46
2	1,2	39,95	5,85	3,98	0,93	1,29	2	1,5	40,04	5,91	4,21	1,00	1,51
3	1,3	39,89	5,82	4,43	1,03	1,26	3	1,7	40,34	5,95	4,77	1,14	1,49
4	1,1	39,97	5,79	3,95	0,91	1,20	4	1,4	40,08	5,92	4,24	1,00	1,39
5	1,1	39,99	5,83	3,87	0,90	1,22	5	1,4	40,31	5,94	4,13	0,99	1,42
MÉDIA	1,2	39,96	5,82	4,04	0,94	1,26	MÉDIA	1,5	40,19	5,94	4,32	1,03	1,45
DESV. P	0,1	0,04	0,02	0,20	0,05	0,04	DESV. P	0,1	0,12	0,02	0,23	0,06	0,04

Fonte: Própria autora.

Tabela 71 – Dados médios com desvios padrões das resistências dos corpos de prova prismáticos na condição V25000.

Corpo de prova	Área (m²)	Carga máx. (N)	Tensão máx. (MPa)
1	0,00002549	18,32	0,72
2	0,00002488	8,48	0,34
3	0,00002838	28,24	1,00
4	0,00002510	9,65	0,38
5	0,00002453	12,68	0,52
MÉDIA	0,00002568	15,47	0,59
DESV. P	0,00000139	7,23	0,24

Fonte: Própria autora.

ANEXO – DETALHES DA IMPRESSORA PROJET 160®

Tabela 72 – Detalhes da PROJET 160®.

COR	Monocromática
RESOLUÇÃO	300 x 450 dpi
LIMPEZA	Unidade separada
VOLUME DE CONSTRUÇÃO	185 x 236 x 132 mm
VELOCIDADE DE CONSTRUÇÃO	2 a 4 camadas/minuto
ESPESSURA DA CAMADA	0.102 mm

Fonte: Adaptado de Projet... (2013).