

INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS

Gabriel Costa Silva Sales

**ESTUDO E ANÁLISE DO TRATAMENTO SUPERFICIAL
DE PEÇAS FABRICADAS VIA IMPRESSÃO 3D POR MEIO DE
VAPOR PROPANONA (ACETONA)**

Betim

2021

Gabriel Costa Silva Sales

**ESTUDO E ANÁLISE DO TRATAMENTO SUPERFICIAL
DE PEÇAS FABRICADAS VIA IMPRESSÃO 3D POR MEIO DE
VAPOR PROPANONA (ACETONA)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Minas Gerais, como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Wanderson de Oliveira Leite.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Silvéria Neves de Paula e Souza.

Betim

2021

S163e

Sales, Gabriel Costa Silva.

Estudo e análise do tratamento superficial de peças fabricadas via impressão 3D por meio de vapor propanona (acetona). [manuscrito] / Gabriel Costa Silva Sales. – Betim: Instituto Federal de Minas Gerais, 2021.

77 f.; il., color.

Orientador: Prof. Wanderson de Oliveira Leite.

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* Betim, Bacharelado em Engenharia Mecânica.

1. Engenharia mecânica. 2. Imagem tridimensional. 3. Processos de fabricação. 4. Acetona. I. Leite, Wanderson de Oliveira. II. Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* Betim. III. Título

CDU 658.51

Catálogo: Luciana Batista Neves - CRB-6/2000



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Betim
Diretoria de Ensino
Docentes Mecânica

Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135976360 - www.ifmg.edu.br

Ata da Reunião da Apresentação e Defesa
Oral Pública de TCC do Discente Gabriel
Costa Silva Sales, realizada em 20 de
Dezembro de 2021

ANEXO III – PARTE 1

DOCUMENTO ÚNICO DE DEFESA DE TCC

ATA DA DEFESA DE TCC

No dia 20/12/2021, às 19:00 horas, o aluno Gabriel Costa Silva Sales, Registro Acadêmico 0024825, do curso de Engenharia Mecânica turma 2021/2 do IFMG – Campus Betim, orientado pelo Prof. Dr. Wanderson de Oliveira Leite e Coorientado pela Profa. Dra. Silvéria Neves de Paula e Souza, defendeu o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) e foi **aprovado** com a **nota 69**, que está condicionada ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa do TCC.

Caso seja aprovado, deverá apresentar o trabalho com as devidas modificações em 10/01/2022 (21 dias corridos após a data da defesa) e, feitas as correções, tem mais 10 dias corridos para entregar as cópias em meio eletrônico, em 30/12/2021.

O aluno está ciente de que, caso não cumpra os procedimentos pós-defesa de TCC até a data estipulada, sua nota será considerada zero e a sua defesa de estágio, caso ocorra, será considerada nula. Também está ciente de que o trabalho de conclusão de seu curso poderá ser divulgado pela Instituição através dos seus meios de comunicação.

Alterações sugeridas pela banca examinadora e outras observações pertinentes à defesa: As sugestões de alterações/melhorias serão enviadas via e-mail institucional do discente.

Betim, 20 de dezembro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Wanderson de Oliveira Leite, Professor**, em 20/12/2021, às 21:26, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Norimar de Melo Verticchio, Professor**, em 21/12/2021, às 09:36, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Vinicius Maia de Sa, Professor**, em 21/12/2021, às 12:09, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Silveria Neves de Paula e Souza, Professora**, em 21/12/2021, às 16:16, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **1044390** e o código CRC **3E6BD57E**.

23792.001869/2021-31

1044390v1

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao IFMG Betim por disponibilizar o laboratório, máquinas e produtos utilizados neste trabalho; aos meus orientadores, professor Dr. Wanderson e à professora Dr. Silvéria pela dedicação; à pedagoga Cláudia Naves pelo apoio; aos professores Norimar Melo e Vinicius Maia pela participação na banca; aos meus pais por me apoiarem.

RESUMO

A manufatura aditiva ou impressão tridimensional (3D) é o processo de fabricação mais emergente na última década. É caracterizado pela adição de materiais por camadas e também pela deposição de material em segmentos de linhas ou varreduras lineares, métodos estes que originam a presença peculiar de interfaces entre camadas e texturas superficiais caracterizadas tecnicamente como a rugosidade superficial. O que se observa nesse contexto é que o controle dessa rugosidade é complexo e de baixa previsibilidade ou onera significativamente o tempo e o custo do produto. Em alguns casos, em peças de conjuntos mecânicos a rugosidade é um dos fatores que interferem diretamente na interação entre os corpos, escoamento dos lubrificantes e na vida útil, sendo uma das características de componentes de elevada importância para o adequado funcionamento. Assim, diante desse paradigma foi proposto neste trabalho desenvolver e testar uma metodologia para realizar o tratamento superficial de corpos de prova via vapor de propanona (acetona) e posteriormente analisar como os parâmetros desse procedimento afetam o acabamento superficial, espessura e massa dessas peças produzidas em acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) por impressão 3D com a tecnologia de deposição de material fundido (FDM). Para tal, utilizou-se um planejamento experimental fatorial para estabelecer a quantidade, níveis e sequência de testes. Após realização dos ensaios, foram avaliadas as características das peças *versus* os parâmetros utilizados por meio de avaliações numéricas, estatísticas e gráficas. De forma geral, verificou-se que a metodologia proporcionou o tratamento superficial e os procedimentos permitiram realizar as análises propostas, validando, assim, a metodologia proposta. Concluiu-se que as alterações dos níveis dos parâmetros de tratamento nos níveis estudados não produzem impactos relevantes no acabamento superficial do produto, sendo os níveis mínimos de tempo de exposição de 20 minutos e quantidade de solvente de 200 mL suficientes e otimizados para as características estudadas. A principal contribuição deste trabalho foi propor e executar um método controlado que conseguiu produzir reduções médias da rugosidade Ra na ordem de 83,2%.

Palavras-chave: Impressão 3D. Tratamento superficial de peças fabricadas por impressão 3D. Estado de Superfícies. Tratamento químico com propanona/acetona. Vapor de propanona/acetona.

ABSTRACT

Additive Manufacturing or 3D printing is the most emerging manufacturing process in the last decade. However, the method is characterized by the addition of materials by layers, and also by the deposition of material in line segments or linear scans, therefore these methods originate the peculiar presence of interfaces between layers and surface textures technically characterized as surface roughness. In this context, what is observed in these processes is that the control of roughness is complex and of low predictability, or it significantly burdens the time and cost of the product. Although, for several authors in mechanical assembly parts, roughness is one of the factors that directly interfere in the interaction between the bodies, lubricant flow and useful life, being one of the characteristics of components of high importance for proper operation. Thus, in view of this paradigm in this work, to develop and test a methodology to perform the surface treatment of specimens using propanone (acetone) vapor, and later, analyze how the parameters of this procedure affect the surface finish, thickness, and mass of these produced parts in Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS), by 3D printing with Fused Material Deposition (FDM) technology, was proposed. For this, a factorial experimental design was used to establish the quantity, levels, and sequence of tests. After carrying out the tests, the characteristics of the pieces versus the parameters used were evaluated through numerical, statistical, and graphical evaluations. In general, it was found that the methodology provided the superficial treatment and the procedures allowed to carry out the proposed analyses, thus validating the proposed methodology. Furthermore, it was concluded that changes in the levels of treatment parameters, at the levels studied, did not produce relevant impacts on the surface finish of the product, with the minimum levels of exposure time being 20 minutes and amount of solvent of 200 ml are sufficient and optimized for the studied characteristics. Finally, the main contribution of this work was to propose and execute a controlled method that managed to produce mean reductions in roughness RA in the order of 83.2%.

Keywords: 3D Printing. Surface treatment of parts manufactured by 3D Printing. Surface State. Chemical treatment with propanone / acetone. Propanone / Acetone Vapor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figuras

Figura 1 - Pistões modelados em sistema CAE.....	14
Figura 2 - Desenho em sistema CAD.....	15
Figura 3 - Peça usinada a partir de assistência pelo sistema CAM.....	15
Figura 4 - Previsão da WWF para consumo de plástico no ano de 2050.....	17
Figura 5 - Ventilador de refrigeração de motor feito em molde impresso em 3D.....	18
Figura 6 - Método de Blather “Curvas de nível”.....	19
Figura 7 - Representação das principais etapas do processo de AM.....	19
Figura 8 - Fluxograma do processo de AM.....	20
Figura 9 - Classificação das tecnologias de AM de acordo com o princípio de processamento das camadas.....	21
Figura 10 - Superfície apresentando ocorrência de <i>staircase</i> pelo microscópio óptico.	23
Figura 11 - Ilustração do processo de deposição de material fundido (FDM).....	24
Figura 12 - Influência dos monômeros nas propriedades do ABS.....	26
Figura 13 - Painéis internos de automóveis em ABS.....	27
Figura 14 - Revestimento de capacete em ABS.....	27
Figura 15 - Bobina com filamento de diâmetro de 3 mm.....	28
Figura 16 - Relação da espessura com o modelo em CAD.....	31
Figura 17 - Defeito por <i>overhang</i>	32
Figura 18 - Presença de "ventoinhas" para refrigeração das peças.....	33

Figura 19 - Fórmula estrutural da propanona.....	34
Figura 20 - Fórmula estrutural do ABS.....	35
Figura 21 - Detalhe do corpo de prova da pesquisa.....	36
Figura 22 - Representação dos componentes do desvio médio aritmético para a <i>Ra</i>	36
Figura 23 - Representação do processo de medição da rugosidade superficial.....	38
Figura 24 - Impressora 3D da marca Da Vinci 1.0 Pro utilizada na pesquisa.....	41
Figura 25 - <i>Display</i> digital para <i>set up</i> das configurações de impressão.....	41
Figura 26 - Interior da impressora.....	41
Figura 27 - Recipiente de contenção devidamente fechado.....	42
Figura 28 - Máquina da CIENLAB para banho-maria e recipiente para contenção do vapor de acetona.....	43
Figura 29 - Água aquecida em contato com a câmara.....	43
Figura 30 - Parâmetros de impressão dos corpos de prova.....	44
Figura 31 - Posicionamento do corpo de prova sob a mesa de impressão.....	45
Figura 32 - Norma ASTM D638.....	46
Figura 33 - Utilização dos talhos nos corpos de prova de forma a fixar no suporte.....	46
Figura 34 - Acréscimo no corpo de prova para fixação no suporte.....	46
Figura 35 - ABS natural utilizado.....	47
Figura 36 - Propanona da marca Synth.....	48
Figura 37 - Indicação de líquido inflamável no frasco.....	48
Figura 38 - Indicação de teor mínimo e lote de fabricação.....	49

Figura 39 - Coleta da massa do corpo de prova por meio da balança eletrônica.....	49
Figura 40 - Rugosímetro utilizado para medir a rugosidade superficial dos corpos de prova.....	50
Figura 41 - Resfriamento dos corpos de prova sob placa de vidro.....	52
Figura 42 - Programação do “banho-maria”.....	52
Figura 43 - “Contrapesos” no suporte para estabilizar o conjunto.....	53
Figura 44 - Conjunto inserido na cuba de vácuo.....	54
Figura 45 - Fechamento da cuba e utilização de grampos.....	54
Figura 46 - Cuba parcialmente imersa na água aquecida.....	55
Figura 47 - Cálculos da análise das médias para espessura.....	59
Figura 48 - Detalhes de corpos de prova antes e após tratamento superficial.....	68
Figura 49 - Relação entre processo de fabricação e o parâmetro de rugosidade Ra	69
Figura 50 - Valores máximos da rugosidade Ra (μm) compatíveis com as qualidades de trabalho/tolerância da Norma ABNT/ISO (NBR 6158).....	69
Figura 51 - Otimização e cálculos da solução de otimização das três variáveis.....	70
Gráficos	
Gráfico 1 - Cálculos da análise das médias para espessura.....	58
Gráfico 2 - Efeito do tempo de exposição na média da espessura dos corpos de prova..	59
Gráfico 3 - Efeito da quantidade de solvente na média da espessura dos corpos de prova.....	59
Gráfico 4 - Variação de espessura em função do tempo e quantidade de solvente.....	60
Gráfico 5 - Efeito do tempo de exposição na média da massa dos corpos de prova.....	61

Gráfico 6 - Efeito da quantidade de solvente na média da massa dos corpos de prova...	61
Gráfico 7 - Variação de massa em função do tempo e quantidade de solvente.....	62
Gráfico 8 - Variação de densidade em função do tempo e quantidade de solvente.....	62
Gráfico 9 - Efeito da quantidade de solvente na média da massa dos corpos de prova...	63
Gráfico 10 - Efeito da quantidade de solvente na média da massa dos corpos de prova.	64
Gráfico 11 - Variação parâmetro de rugosidade Ra em função do tempo e quantidade de solvente.....	64
Gráfico 12 - Comparativo dos valores médios de rugosidade Ra antes e após tratamento vs grupo de ensaios.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variação dos parâmetros utilizados por Villamil (2016).....	29
Tabela 2 - Configurações de impressão segundo Villamil (2016).....	29
Tabela 3 - Configurações de melhor desempenho para impressão segundo Villamil (2016).....	29
Tabela 4 - Melhor configuração de espessura de camada presentes nas referências.....	30
Tabela 5 - Planejamento experimental fatorial: variação dos fatores vs ensaios.....	53
Tabela 6 - Massa, espessura e rugosidade iniciais das amostras por ensaio.....	56
Tabela 7 - Massa, espessura e rugosidade finais das amostras por ensaio.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
ANOVA	Análise de variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
FDM	deposição de material fundido
HIPS	<i>High impact polystyrene</i>
IC	Intervalo de confiança
IFMG	Instituto Federal de Minas Gerais
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LASER	<i>Light amplification by stimulated emission of radiation</i>
NBR	Norma Brasileira de Referência
PDP	Projeto de Desenvolvimento de Produtos
PLA	Poliácido láctico

<i>Ra</i>	Desvio aritmético médio do perfil avaliado
RT	<i>Rapid Tooling</i>
STL	<i>Stereolithography</i>
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerai
USB	<i>Universal serial bus</i>
WIFI	<i>Wireless Fidelity</i>
WWF	<i>World Wildlife Fund</i>

SUMÁRIO¹

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Tecnologias assistivas	14
2.2 Prototipagem e a indústria de plástico	15
2.3 Manufatura aditiva: impressão 3D	18
2.4 Deposição de material fundido (FDM)	23
<i>2.4.1 Características técnicas de peças fabricadas por FDM</i>	28
<i>2.4.2 Fatores de acabamento em modelos impressos em FDM</i>	30
<i>2.4.2.1 Melhorias de acabamento de peças impressas</i>	32
<i>2.4.2.2 Acabamento superficial de produtos impressos em FDM</i>	33
<i>2.4.2.2.1 Reação química entre o vapor de propanona e o ABS</i>	34
2.5 Rugosidade	35
2.6 Técnicas Estatística aplicadas em Engenharia	38
3 OBJETIVOS	38
3.1 Objetivo geral	38

¹ Este trabalho foi revisado com base nas novas regras ortográficas aprovadas pelo Acordo Ortográfico assinado entre os países que integram a Comunidade de Países de Língua Portuguesa (CPLP), em vigor no Brasil desde 2009. E foi formatado de acordo com o Manual de Normalização do IFMG, 2020.

3.2 Objetivo específico.....	38
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	40
4.1 Equipamentos e materiais.....	40
<i>4.1.1 Impressora 3D.....</i>	<i>40</i>
<i>4.1.2 Câmara de vedação e banho Maria.....</i>	<i>42</i>
<i>4.1.3 Parâmetros de impressão.....</i>	<i>43</i>
<i>4.1.4 Corpos de prova.....</i>	<i>45</i>
<i>4.1.5 Materiais.....</i>	<i>47</i>
<i>4.1.6 Medições.....</i>	<i>49</i>
<i>4.1.7 Métodos de análises.....</i>	<i>50</i>
4.2 Procedimento.....	51
4.3 Dados iniciais.....	55
4.4 Dados finais.....	57
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
5.1 Variação da espessura.....	58
5.2 Variação da massa.....	62
5.3 Variação da rugosidade superficial <i>Ra</i>.....	64
5.4 Avaliação conjunta das variações dos parâmetros.....	70

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.....	71
6.1 Considerações Finais.....	71
6.2 Trabalhos Futuros.....	72
REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

Com o advento da alta competitividade no mercado, os produtos manufaturados precisam ser fabricados cada vez mais rápido e com menor custo. Para isso, mudanças e alterações devem ser feitas de forma veloz e eficaz para se adaptar ao mercado consumidor.

Partindo dessa demanda, foram desenvolvidas ferramentas que auxiliam esse trabalho, como a utilização de *softwares* de desenho e a manufatura aditiva. A manufatura aditiva é um processo de fabricação caracterizado pela adição de materiais, diferentemente dos processos convencionais caracterizados pela remoção de material como fresamento, tornearia, furação, entre outros. (VOLPATO, 2017)

A partir desse processo é possível a criação de geometrias e protótipos que os processos convencionais de fabricação inviabilizam por diversos fatores, seja pelo formato geométrico ou por limitação de ferramental ou até mesmo limitação financeira. Para tornar possível esse processo criativo, a manufatura aditiva tem por característica o método de empilhamento de camadas na fabricação do produto. Em contrapartida a essa liberdade geométrica ocorre o defeito decorrente dos empilhamentos, o *Staircase*(LIMA, 2015). Esse efeito gera uma rugosidade que influencia diretamente no acabamento dimensional e na estética do produto. Essa rugosidade é devida às aproximações matemáticas do modelo dadas pela conversão de *softwares* de *Stereolithography* (STL) e do processo de deposição de material fundido (FDM). Essa rugosidade superficial intrínseca, por sua vez, acaba por se tornar um problema para o mercado, uma vez que os produtos devem abranger acabamento superficial adequado e funcionalidade, sendo esses elementos fatores fundamentais para seu desempenho (ASHBY; JOHNSON, 2013). Além disso, quanto mais rápido a fabricação e mais complexa for a geometria, mais intenso é a presença do *staircase*. (LIMA, 2015).

Cabe ressaltar que, na Engenharia Mecânica, as propriedades físicas e a precisão dimensional possuem grande relevância e são características indispensáveis na avaliação dos resultados de novas tecnologias e produtos. Portanto, cabem medidas de pós-tratamento, visando corrigir ou reduzir esses efeitos superficiais. Essas ações de após tratamento podem ser realizadas de forma mecânica como, por exemplo, a utilização de lixas e polimento ou tratamento químico baseado no uso de material reagente ao material para suavização das camadas. Contudo, o ataque químico deve ser feito de maneira muito bem controlada, pois pode afetar diretamente propriedades mecânicas que não devem ser alteradas.

Para a realização deste trabalho, coube avaliar os possíveis impactos na rugosidade, na massa e nas dimensões provenientes do tratamento superficial de peças fabricadas pela tecnologia de deposição de material fundido (FDM) por meio de exposição ao reagente escolhido, que é a propanona.

1.1 Justificativa

A partir da presença intrínseca do *staircase*, dependendo do custo/complexidade for requisitado para a peça, será necessário um pós tratamento como explica LIMA (2015):

Dentro do espectro de técnicas de pós-tratamento disponíveis há uma descontinuidade entre o custo/complexidade e a qualidade do resultado final.

Técnicas simples e de baixo custo trazem resultados com baixa repetibilidade e demandam um alto grau de habilidade do operador da técnica, enquanto técnicas com alta repetibilidade e automação tem o custo muito elevado.

Desta forma, os usuários beneficiados com a popularização das impressoras 3D ainda estão distantes de um método de acabamento das peças fabricadas que seja ao mesmo tempo de baixo custo, alta efetividade e que não demande habilidades específicas do usuário.

Uma abordagem promissora para atuar nesta descontinuidade é o desenvolvimento do uso de solventes para realização do acabamento das peças plásticas.

Entre as opções de após tratamento, optou-se pelo tratamento químico com vapor de propanona, pela sua facilidade de manuseio e aquisição bem como atuação homogênea sobre a peça, independentemente do formato, diferentemente do processo mecânico que está sujeito a um pós-tratamento com limitação ao formato do corpo.

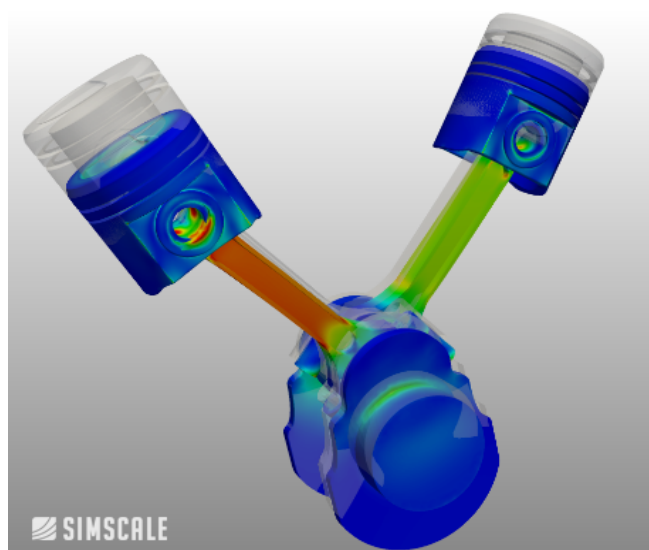
A partir disso, o trabalho será desenvolvido no *Campus* do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), Betim, com seu início no ano de 2019.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Tecnologias assistivas

Conforme Alcántara (2015), em torno de 1970 surgiram *softwares* de desenho assistido por computador – *Computer Aided Design* (CAD) e engenharia assistida por computador – *Computer Aided Engineering* (CAE), que facilitam as alterações nos *designs* e a visualização dos produtos. Com base na integração com sistemas de Manufatura Assistida por Computador – *Computer Aided Manufacturing* (CAM), que se deu ao longo da década de 1980 (CUNICO, 2014), foi possível criar os primeiros protótipos antes de serem fabricadas peças definitivas. Desse modo, em algumas situações, foi possível realizar testes com os próprios protótipos. Nas Figuras 1 e 2 e 3 estão representados alguns exemplos de CAE, CAD e CAM, respectivamente.

Figura 1 – Pistões modelados em sistema CAE



Fonte: Radu Crahmaliuc (2019).

outros setores, como marketing, simulação, análise, otimização, etc. Com o desenvolvimento de modelos virtuais é facilitada a modificação de produtos para que atendam melhor às necessidades dos clientes, podendo ser alterados antes do lançamento oficial ou fazer futuras correções em produtos já lançados (ASHBY; JOHNSON, 2013; VOLPATO, 2007; VOLPATO, 2017).

Das tecnologias desenvolvidas para atender às exigências do mercado foi a de manufatura aditiva (AM - *Additive Manufacturing*), a qual possui como característica a adição de material pelo método camada-por-camada (VOLPATO, 2017; LIMA, 2015). O objetivo inicial da tecnologia era desenvolver protótipos, porém, com sua evolução, já é possível a utilização de peças finais fabricadas por AM (CUNICO, 2014). Na AM há diversas tecnologias para a fabricação de peças, das quais há o método por extrusão de material, também conhecido por deposição de material fundido (FDM). Como característica, há a presença das interfaces das camadas que geraram o produto. O método baseia-se na deposição de material termoplástico, a partir de um bico quente extrusor em geometrias planas definidas por *software* (LIMA, 2015).

Segundo Alcántara (2015), testes de protótipos com material termoplástico são aplicáveis para a indústria do plástico, uma vez que esses materiais são amplamente empregados nesse tipo de manufatura. Villamil (2016) preleciona que a indústria do plástico tem grande interesse em prototipagem de modelos devido à facilidade na correção de erros nas etapas de desenvolvimento, economizando tempo e dinheiro.

Devido ao crescimento da população e o desenvolvimento tecnológico, a produção de plástico global aumentou 500% ao longo dos últimos 30 anos e já é esperado mais crescimento em 850 milhões de toneladas por ano até 2050 (HUNT *et al.*, 2015). A *World Wildlife Fund* (WWF, 2016) prenuncia, para o mesmo ano, o consumo de 1,25 bilhão de toneladas, conforme representado na Figura 4.

Figura 4 – Previsão da WWF para consumo de plástico no ano de 2050



Fonte: *World Wildlife Fund (WWF)*, 2016.

Oportunamente, segundo Kurek (2009 *apud* GALINA, 2018), os materiais plásticos têm conquistado espaço sobre os metais em diversas aplicações em projetos de engenharia, eletroeletrônicos, materiais para construção, embalagens de cosméticos e alimentos. Exemplo disso é a mudança das peças e componentes em automóveis de metal para o plástico que, de acordo com o *site* “Tribuna” (2014), em 2014 a proporção de plástico em um automóvel terá um aumento previsto de 15% para 25 a 30% até 2030.

Os polímeros termoplásticos, conforme Kurek (2009 *apud* GALINA, 2018), têm propriedades que facilitam sua utilização na AM, como temperaturas baixas de fusão, que facilitam a extrusão. Esses materiais ainda são capazes de manter a forma nas temperaturas médias de uso. No caso de aplicações diretas ou testes dos protótipos, como testes de resistência às solicitações mecânicas e químicas, as propriedades das peças em polímeros devem ser bem conhecidas (GALINA, 2016).

Para aplicações diretas podemos citar a aplicação de moldes-protótipos, também chamados de moldes impressos, que podem ser classificados como um processo de ferramental rápido *Rapid Tooling* (RT). O RT é utilizado para a criação rápida de moldes e com custo muito menor que de um ferramental convencional, a partir de um modelo digital (3EPD, 2016). Volpato (2017) afirma que as tecnologias AM podem participar direta ou

indiretamente na fabricação de protótipos de moldes. A Figura 5 ilustra um molde para injeção do ventilador de refrigeração desenvolvido pela empresa Stratasys (2013).

Figura 5 – Ventilador de refrigeração de motor feito em molde impresso em 3D



Fonte: Stratasys (2013).

Além de protótipos e ferramentais, a prototipagem, segundo Villamil (2016), já apresenta ampla gama de aplicações em diversas áreas, como: Arquitetura, Engenharia, Topografia, Educação, Medicina, Robótica, entre outras, como o *design* de produtos.

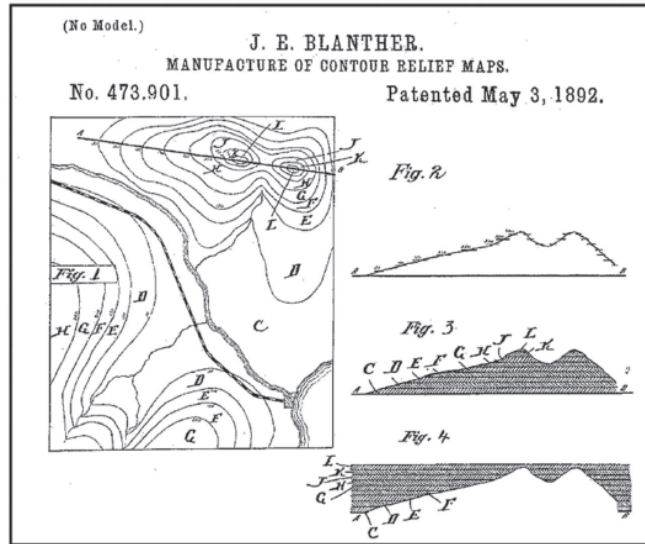
2.3 Manufatura aditiva: impressão 3D

A metodologia convencional empregada nos processos de fabricação têm como objetivo agregar forma e funcionalidade à partir da remoção, moldagem, união de componentes e ou conformação do material como, por exemplo, na usinagem, fundição, soldagem e forjamento para materiais metálicos e não metálicos. Entretanto, no final da década de 1980 surgiu um novo meio de fabricação, com metodologia baseada na adição de material, a AM, ou impressora tridimensional (3D) economizando insumos e reduzindo resíduos uma vez que a matéria-prima é depositada conforme a necessidade definida no modelo programado(VOLPATO, 2017; CHAVES,2020; ZIER, 2019).

Conforme Volpato (2017) e Gorni (2013) o processo tem início com a criação e modelamento da peça em *softwares* CAD de desenho, onde será gerado o modelo 3D da peça, o qual será “fatiado” eletronicamente, obtendo-se “curvas de nível” bidimensional (2D),

semelhante ao método de Blantner, representado na Figura 6, para a construção de mapas topográficos. Cada uma dessas camadas é que definirá onde será ou não adicionado material.

Figura 6 - Método de Blantner “Curvas de nível”



Fonte: Volpato (2017, p. 19).

Após esse fatiamento da peça, dá-se o planejamento da fabricação por meio da definição de estruturas de suporte e estratégias de deposição do material. A partir do passo a passo criado para a fabricação da peça, o equipamento seguirá os comandos e fabricará o protótipo. A partir do empilhamento, sequenciamento e adesão das camadas, é gerado o modelo físico estipulado, como mostra a Figura 7. Por fim, são trabalhadas as medidas de pós-processamento da peça que terão variações de acordo com a metodologia da AM (Gorni, 2013).

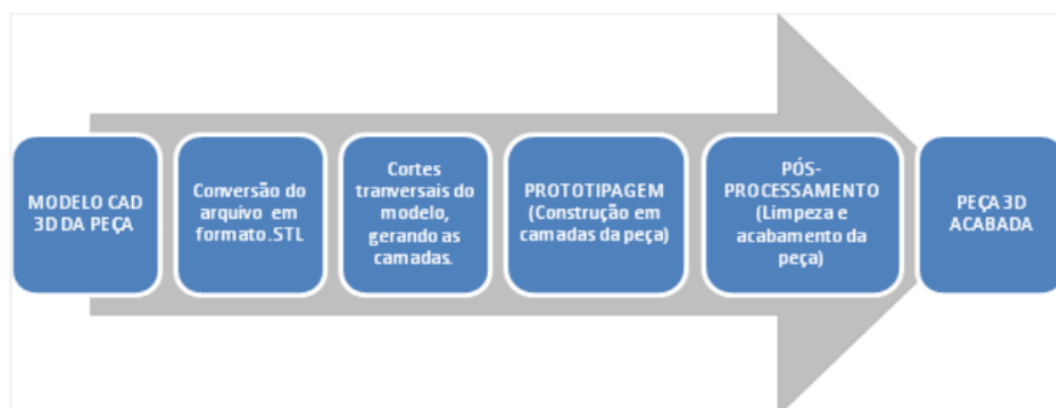
Figura 7 - Representação das principais etapas do processo de AM



Fonte: Volpato (2017, p. 17).

Dentro deste contexto descrito, a Figura 8 demonstra um fluxograma de trabalho esquematizando a manufatura aditiva, proposto por Pereira (2011).

Figura 8 - Fluxograma do processo de AM



Fonte: Pereira (2011, p. 29).

Chua, Leong e Lim (2010 *apud* VOLPATO, 2017) ressaltam que a fabricação de modelos por AM é muito diversificada. Categorizando-se apenas pelo estado inicial do material, seria insuficiente, pois não fica claro o método tecnológico envolvido no tratamento dessa matéria-prima e criação das camadas. Para isso, foi proposto, pela norma *International Organization for Standardization/ American Society for Testing and Materials (ISO/ASTM) 52900:2015 (ASTM F2792) Additive manufacturing - General principles - Terminology* (ISO, 2015), a categorização em sete grupos (VOLPATO, 2017). Na Figura 9 veem-se os grupos, seus princípios e tecnologias relacionadas.

Figura 9 - Classificação das tecnologias de AM de acordo com o princípio de processamento das camadas

Classificação das tecnologias AM	Descrição dos princípios	Algumas tecnologias na categoria
Fotopolimerização em cuba	Polímero fotossensível líquido é curado seletivamente em uma cuba por polimerização ativada por luz*	Estereolitografia (<i>stereolithography</i> – SL), produção contínua com interface líquida (<i>continuous liquid interface production</i> – CLIP), tecnologia da empresa Invision-TEC, outros
Extrusão de material	Material é extrudado através de um bico ou orifício, sendo seletivamente depositado	Modelagem por fusão e deposição (<i>fused deposition modeling</i> – FDM), MakerBot, RepRap, Fab@Home, outros
Jateamento de material	Material é depositado em pequenas gotas de forma seletiva	PolyJet, impressão por múltiplos jatos (<i>Multijet printing</i> – MJP), tecnologia da Solidscape, outros
Jateamento de aglutinante	Um agente aglutinante líquido é seletivamente depositado para unir materiais em pó	Impressão colorida por jato (ColorJet Printing – CJP), tecnologia da VoxelJet, tecnologia da ExOne, outros
Fusão de leito de pó	Energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó	Sinterização seletiva a laser (<i>selective laser sintering</i> – SLS), sinterização direta de metal a laser (<i>direct metal laser sintering</i> – DMLS), fusão seletiva a laser (<i>selective laser melting</i> – SLM), LaserCUSING, fusão por feixe de elétrons (<i>electron beam melting</i> – EBM), outros
Adição de lâminas	Lâminas recortadas de material são unidas (coladas) para formar um objeto	Manufatura laminar de objetos (<i>laminated object manufacturing</i> – LOM), tecnologia da Solido, deposição seletiva de laminados (<i>selective deposition lamination</i> – SDL), outros
Deposição com energia direcionada	Energia térmica é usada para fundir materiais à medida que estes são depositados	Forma final obtida com laser (<i>laser engineered net shaping</i> – LENS), deposição direta de metal (<i>direct metal deposition</i> – DMD), revestimento a laser tridimensional (<i>3D laser cladding</i>), outros

*Observação: os processos que utilizam projeção de luz UV (com ou sem máscara) e cujo material não fica necessariamente em uma cuba estão inclusos nesse grupo.

Fonte: Volpato (2017, p.24).

Quando se compara a AM com métodos tradicionais de fabricação, a metodologia AM apresenta vantagens e desvantagens, de acordo com Volpato (2017).

Algumas das vantagens dessa metodologia foram listadas por Volpato:

- a) Liberdade para fabricar peças com diferentes complexidades geométricas e formas estruturais para otimização de resistência com menor peso, principalmente peças com formatos com grande dificuldade ou impossível de serem fabricadas por métodos tradicionais;

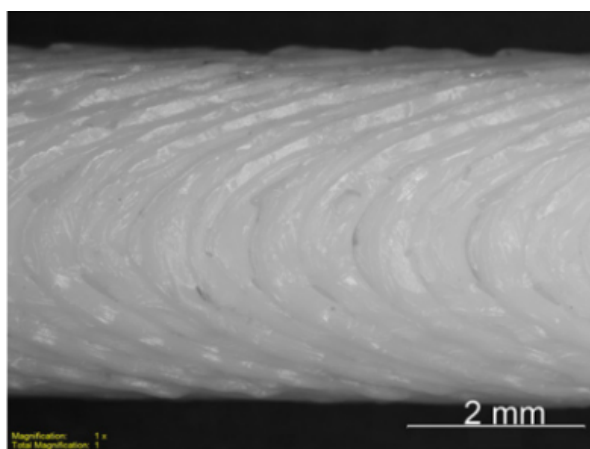
- b) pouco desperdício de material e utilização eficiente de energia;
- c) não requer artifícios de fixação quando o modelo é produzido. O próprio material já se prende à plataforma, não necessitando de algum acessório;
- d) em comparação ao comando numérico computadorizado (CNC), não há necessidade de troca de ferramentas durante a fabricação. Geralmente é utilizado um único meio de processamento da matéria-prima do início ao fim da fabricação;
- e) fabricação do modelo inteiramente em um único equipamento, do início ao fim. Em alguns casos há etapas de pós-processamento;
- f) simplicidade de cálculos de trajetória do ferramental, uma vez que o modelo é fatiado em curvas 2D planas;
- g) rapidez ao se obter modelos que não necessitam de alto acabamento ao se comparar com os tradicionais, principalmente quando o modelo é mais complexo;
- h) possibilidade de produzir peças finais, principalmente quando a tecnologia utiliza metais e polímeros. Existe, porém, uma quantidade de peças por lote que equivale ao custo com processos tradicionais. O custo por AM é menor quando está abaixo dessa quantidade de um lote e maior quando está acima;
- i) capacidade de algumas das tecnologias de AM de variar o material e a densidade das peças durante o tratamento, podendo variar as propriedades como resistência, dureza, porosidade e flexibilidade ao longo da peça.

Toda tecnologia apresenta restrições, e isso não é diferente para a AM. A seguir estão algumas restrições da metodologia, sugeridas por Chua, Leong e Lim (2010), Kochan e Chua (1995), Gibson, Rosen e Stucker (2010) e Volpato (2017):

- a) Precisão e acabamento são mais pobres em relação à usinagem, devido ao processo de adição por camadas, dando origem a degraus de escada em superfícies curvas da peça (Figura 10);
- b) Graças aos diferentes métodos de fabricação, as propriedades das peças são semelhantes, mas não iguais. Devido à criação por camadas, geralmente as peças produzidas por AM apresentam características anisotrópicas;

- c) a maioria das tecnologias tem restrição de matérias-primas empregadas, sendo que geralmente estão disponíveis materiais desenvolvidos para aquela tecnologia específica, dificultando a aplicação;
- d) A tecnologia AM de porte industrial tem alto custo de aquisição, operação e insumos e acaba-se utilizando versões mais acessíveis que limitam o PDP. Esse cenário tem se alterado com o advento das impressoras 3D de baixo custo;
- e) Há problemas de empenamento e distorções se o processo não for bem controlado e calibrado, devido à natureza térmica e química do material. Evoluções na área de AM vêm minimizando esses defeitos;
- f) Para lotes grandes, a AM é lenta e cara ao ser comparada com as técnicas tradicionais. Quando utilizada para customização e baixa produção, vem conquistando espaço como método de manufatura e fabricação de peças finais, como na área médica e aeroespacial.

Figura 10 - Superfície apresentando ocorrência de *staircase* pelo microscópio óptico



Fonte: Gautam, Sridhar e Feih (2018).

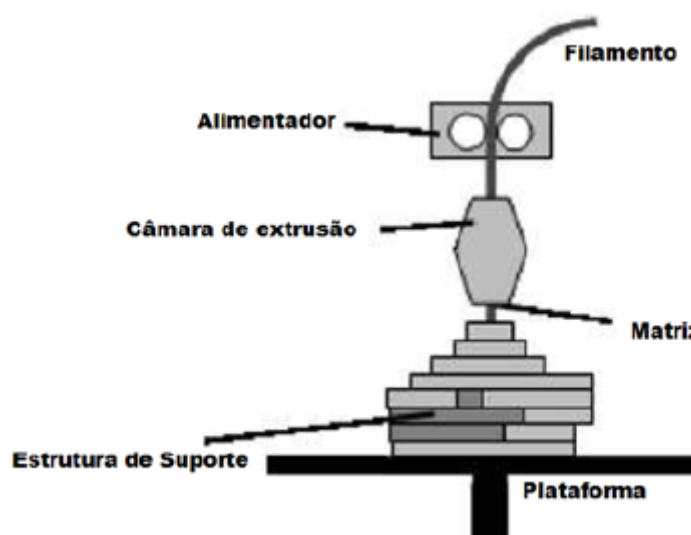
Dentro da variedade de tecnologias de AM presentes na Figura 9, aborda-se neste trabalho apenas a extrusão de material com base na técnica de deposição de material fundido.

2.4 Deposição de material fundido (FDM)

A modelagem por deposição de material fundido (FDM - *Fused Deposition Modeling*) foi desenvolvida em um primeiro momento pela companhia Stratasys Inc, a partir

de 1989 (Lana e Cruz, 2012). O FDM caracteriza-se pela deposição de um material, geralmente termoplástico, que é empurrado por rolos de alimentação para dentro de uma câmara com resistências, a fim de aquecê-lo até uma temperatura superior à temperatura de transição vítrea do plástico. A partir de cálculos computacionais e das estratégias de deposição estipuladas, o cabeçote conduz o filamento e se movimenta, formando perfis da peça adquiridos por fatiamento do modelo virtual STL (CUNICO, 2014, PATREZE; PALAIO; ALMEIDA, 2018). A Figura 11 exibe um esquema da tecnologia. As propriedades mecânicas dos protótipos estão intimamente ligadas às propriedades das matérias-primas utilizadas, assim como os parâmetros de fabricação da AM (CUNICO, 2014; LANA E CRUZ, 2012; LIZARDO *et al.*, 2015; PEREIRA, 2011; VOLPATO, 2007).

Figura 11 - Ilustração do processo de deposição de material fundido (FDM)



Fonte: Raja e Fernandes (2008, p.104 *apud* PEREIRA, 2011).

Nos últimos anos, a impressão 3D vem ganhando popularidade e tem sido cada vez mais abordada no desenvolvimento de estudos e aplicações industriais. Isso se deve às suas características de flexibilidade de fabricação, resposta rápida às alterações e mudanças e capacidade de criar estruturas mais complexas em relação aos processos convencionais (CAMBRAIA *et al.*, 2020).

Cabe ressaltar que peças fabricadas por FDM utilizando os termoplásticos adequados para produção apresentam excelentes atributos mecânicos, térmicos e químicos (Ferreira, 2020; Cardoso, 2018). E que, além disso, tais peças possuem excelente relação

resistência/peso e precisão dimensional suficientemente satisfatória para utilização de aplicações funcionais (LANA E CRUZ, 2012; LIOU, 2008; RAJA; FERNANDES, 2008)

Algumas das vantagens do FDM, segundo Pereira (2011), Cardoso (2018), Volpato (2007), Lana e Cruz (2012) e Lauers (2021), são:

- a) Liberdade de criação de geometrias mais complexas;
- b) baixa quantidade material residual;
- c) liberdade de criação de peças com diferentes materiais simultaneamente;
- d) possibilidade de criação de peças com diferença de densidade ao longo do corpo sólido;
- e) as impressoras por FDM são o tipo de tecnologia de impressão 3D mais comumente disponível e as mais baratas;
- f) excelentes características mecânicas, térmicas e químicas que possibilitam aplicações diretas;
- g) não utiliza *laser*;
- h) pode ser utilizado em ambiente de escritório, por ser mais silencioso e por utilizar materiais não tóxicos;
- i) não necessita de pós-cura dos materiais.

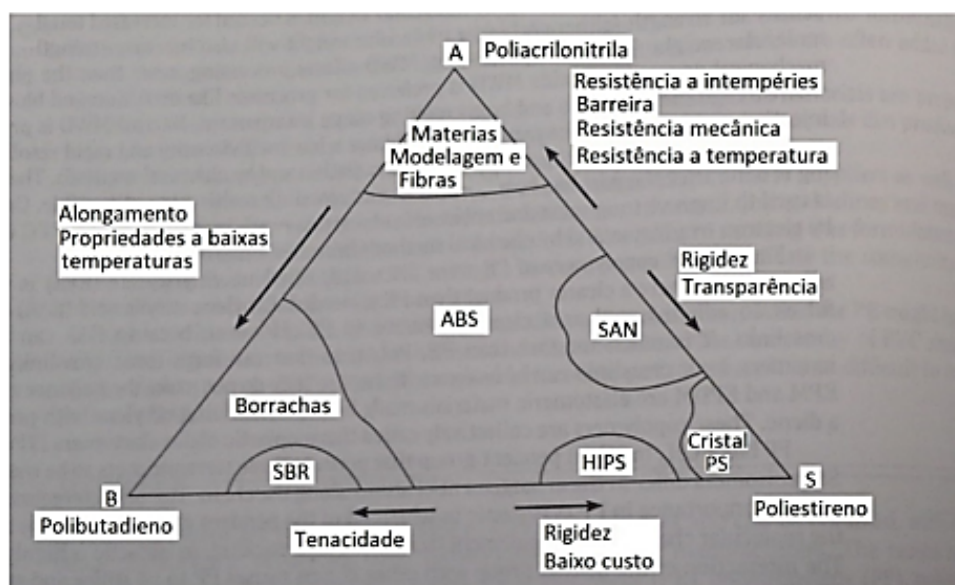
Com desvantagens, citam:

- a) Os materiais empregados são limitados aos termoplásticos;
- b) necessidade da utilização de suportes e de um tratamento para sua remoção. Em caso de suportes solúveis, isso não é um problema;
- c) precisão dimensional não é muito alta;
- d) limitação de tamanho de peças conforme o tamanho da mesa de impressão;
- e) processamento lento, limitado pela taxa de fluxo de material depositado.

O FDM utiliza termoplásticos e os mais comuns são acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e poliláctico (PLA). Esses materiais têm pontos de operação com temperaturas mais baixas. Isso permite que eles sejam extrudados fora de um ambiente industrial dedicado a esse processo Lizardo *et al.* (2015).

Conforme Pereira (2019) e Souza e Huppes (2017), o ABS é um plástico derivado do petróleo formado pela copolimerização de três monômeros: acrilonitrila, butadieno e estireno, já que cada um apresenta características distintas. A variação de cada elemento será responsável por diferentes tipos de ABS. A Figura 12 a seguir, elaborada por Souza e Huppes (2017), representa a relação de propriedades do material com cada um dos monômeros presentes no ABS e demais plásticos.

Figura 12 - Influência dos monômeros nas propriedades do ABS



Fonte: Souza e Huppes (2017).

Como é possível notar, o butadieno dá a característica mecânica de tenacidade, a capacidade de alongamento e a resistência à baixa temperatura, enquanto o estireno é responsável pela rigidez e transparência; por fim, a acrilonitrila tem a função de agregar resistência à temperatura e intempéries, resistência mecânica e ação de barreira ao ABS.

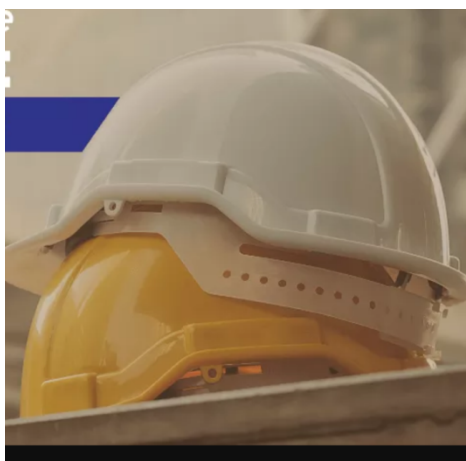
Souza e Huppes (2017) e Lana e Cruz (2012) explicitam que a aplicação desse plástico está presente no nosso dia a dia. São materiais presentes em carcaças de eletrônicos, automóveis (Figura 13), instrumentos de telecomunicação, brinquedos, capacete de segurança (Figura 14), entre outras.

Figura 13 - Painéis internos de automóveis em ABS



Fonte: Mais polímeros (2018).

Figura 14 - Revestimento de capacete em ABS



Fonte: Prometal EPIS (2021).

Agora, para a aplicação em FDM, tanto o ABS quanto o PLA são fornecidos em bobinas e o fio pode ter diâmetro variando entre 3 e 1,75 mm (Figura 15).

Figura 15 - Bobina com filamento de diâmetro de 3mm



Fonte: Cordeiro, 2014.

A respeito das propriedades mecânicas, Lana e Cruz (2012) e Souza e Huppes (2017) destacam que o ABS tem boa resistência mecânica, alta resistência à abrasão e alta tenacidade. Com isso, suas propriedades mecânicas combinadas com baixo peso são utilizadas em diversos objetos de uso cotidiano. Contudo, essas propriedades são dependentes da temperatura à qual o material é exposto, tornando-o mais fluido, ou seja, a tensão de escoamento diminui e o alongamento aumenta.

2.4.1 Características técnicas de peças fabricadas por FDM

Para parametrizar algumas das configurações de impressão, Carlier *et al.* (2019), observou que, em sua pesquisa com PLA, adquire-se melhor adesão entre as camadas a partir de menores espessuras e temperaturas de impressão mais altas.

Samykan *et al.*(2019) frisa que há diversos parâmetros para as impressões e diferentes níveis de interação na qualidade, sendo difícil determinar a melhor configuração a fim de se obterem os melhores resultados do componente fabricado pela FDM.

Villamil em seu trabalho selecionou quatro variáveis, sendo a cor do filamento de ABS, temperatura, velocidade e os tipos de preenchimento para a impressão. Na Tabela 1 estão presentes as variações utilizadas para os parâmetros; na Tabela 2 relacionam-se os dados com os melhores resultados para as propriedades encontradas; e na Tabela 3, ao utilizar estatística, o autor calculou e ordenou o grau de influência de cada fator de controle para obter o melhor desempenho a respeito das características mecânicas.

Tabela 1 - Variação dos parâmetros utilizados por Villamil (2016)

Cor do filamento	Temperatura de impressão (°C)	Velocidade de impressão (mm/s)	Tipo de Preenchimento
Preto/Vermelho/Azul	240/250/260	10/20/30	Linha/Circular/Octogona 1

Fonte: Villamil (2016).

Tabela 2 - Configurações de impressão segundo Villamil (2016)

Características Mecânicas Otimizadas	Tipo de Preenchimento	velocidade de impressão (mm/s)	Temperatura de impressão (°C)	Cor do filamento	Módulo de elasticidade (GPa)	Resist. à Tração (MPa)	Deformação Máxima
Ensaio 7	Circular	30	240	Azul	1,54	16,56	2,42
Ensaio 1	Linha	10	240	Preto	1,03	18,38	2,23
Ensaio 4	Octogonal	20	240	Vermelho	0,91	15,22	2,64

Fonte: Villamil (2016).

Tabela 3 - Configurações de melhor desempenho para impressão segundo Villamil (2016)

Parâmetros Ótimos para:	Tipo de Preenchimento	Velocidade de impressão (mm/s)	Temperatura de impressão (°C)	Cor do filamento
Módulo de elasticidade	Circular	30	260	Azul
Resist. à Tração	Circular	10	250	Preto
Deformação Máxima	Octogonal	20	240	Vermelho

Fonte: Villamil (2016).

Para cada característica mecânica encontrada nos corpos de prova, Villamil encontrou diferentes configurações. Logo, deve ser levada em conta a configuração que melhor atender à demanda que a aplicação da peça exigirá.

Um dos fatores de impressão mais trabalhados por pesquisadores na área de impressão 3D é o fator da espessura da camada. De acordo com Galina (2018), o nível de resolução de impressão resulta em maior ou menor quantidade de camadas nas peças impressas, o que interfere diretamente na adesão dos filamentos de cada camada e na quantidade de material disposto na orientação dos esforços sofridos pelas amostras.

Ramirez *et al.* (2018), Galina (2018), Aliheidari *et al.* (2018) e Lana e Cruz (2012) realizaram pesquisas investigando a influência da espessura da camada. Na Tabela 4 estão expostas a melhor configuração de camada para as propriedades que cada autor investigou em suas pesquisas.

Tabela 4 - Melhor configuração de espessura de camada presentes nas referências

Referências	Espessura de camada em mm	Características mecânicas analisadas
Ramirez <i>et al.</i> (2018)	0,254	Redução de arraste para componentes aerodinâmicos
Galina (2018)	0,25	Resistência a tração, módulo de elasticidade, deformação máxima e flexão
Aliheidari <i>et al.</i> (2018)	0,2	Resistência à fratura
Lana e Cruz (2012)	0,25	Desvio dimensional e geométrico

Fonte: Ramirez *et al.* (2018), Galina (2018), Aliheidari *et al.* (2018) e Lana e Cruz (2012).

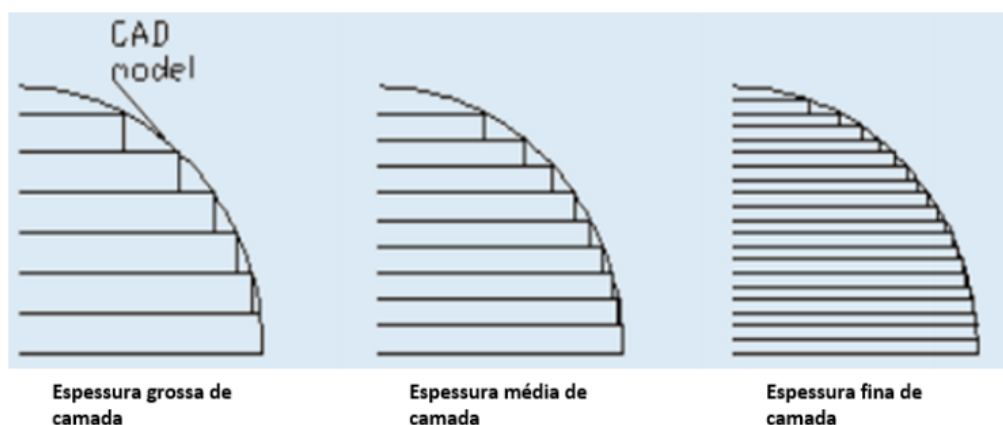
De forma geral, todos os autores encontraram espessura de camada de 0,2 mm, que atende às propriedades físicas e mecânicas. Já em relação à qualidade superficial, Pérez *et al.* (2018) e Polak, Sedláček e Raz (2017) afirmam que, quanto menor for a espessura, melhor resolução as peças terão. E que, em PLA, a melhor configuração desse parâmetro para a qualidade superficial se dá com camadas de 0,1 mm. Por fim, Mello (2010) sugere que para melhor acabamento superficial é importante que o preenchimento dos corpos seja sólido em vez de aerado, devido à densidade das camadas.

2.4.2 Fatores de acabamento em modelos impressos em FDM

A reprodução de espessuras com qualidades mecânicas otimizadas e bom acabamento das peças impressas está intimamente ligada ao sistema de fatiamento do modelo virtual, em que a espessura indicará a qualidade do resultado e, por consequência, o valor atribuído ao produto (LIZARDO *et al.*, 2015). Quanto maior a espessura, mais rápida é a impressão, porém terá perda em qualidade dimensional e acabamento. E quanto menor a espessura da camada, melhor será o acabamento, porém a velocidade de impressão é mais

lenta. Além disso, os equipamentos têm limite de tamanho para que as camadas sejam construídas (Figura 16) (CORDEIRO, 2014).

Figura 16 - Relação da espessura com o modelo em CAD

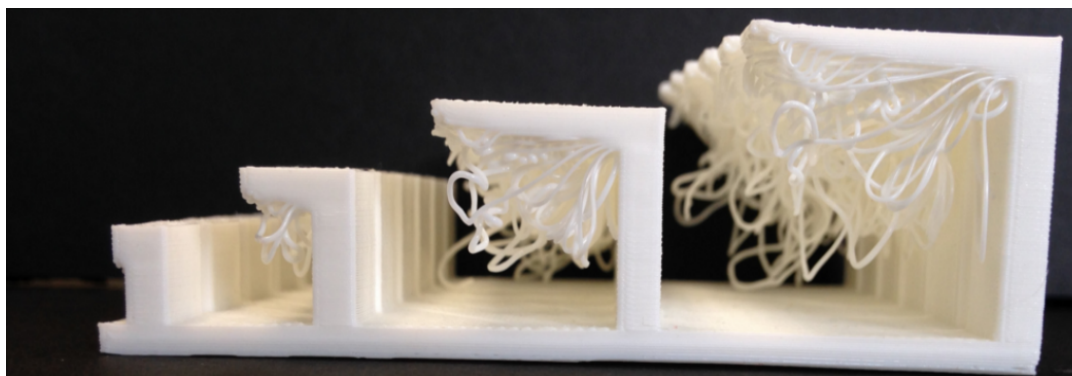


Fonte: Lima (2015).

Por fim, o acabamento é um dos aspectos de grande atenção que são pesquisados e estudados visando atender o mercado. Atender a essa demanda está diretamente ligado à capacidade da máquina de realizar fatiamentos mínimos e conduzir uma impressão rápida. É possível alcançar melhores acabamentos superficiais por meio de pós-processamentos, como, por exemplo, a exposição de peças impressas ABS em soluções ou vapores amoníacos (LIZARDO *et al.*, 2015).

Lima (2015) salienta que uma das características mais marcantes do processo de fabricação por FDM é a presença visível da interface entre as camadas que, quanto maior a sua altura, mais visível é o efeito. E isso influencia diretamente na formação do “efeito escada” ou *staircase effect*, que apresenta como característica a formação de degrau de escada devido à aproximação de curvas estabelecidas por CAD, utilizando segmentos de reta. Devido a esse problema, as peças acabam se tornando rugosas, o que pode comprometer a forma e o desempenho da sua função em aplicações.

Além dos problemas superficiais causados pelo “efeito escada”, há também a possibilidade de ocorrência do *overhang effect*. Trata-se de estruturas em suspensão das peças e que deformaram devido à falta de material de suporte (HIGGS, 2018). À medida que vai criando mais camadas, as camadas superiores se apoiam nas camadas falhas e voltam a convergir para o modelo em CAD (LIMA, 2015). Na Figura 17 é possível ver a grande deformação causada à peça devido a esse defeito.

Figura 17 - Defeito por *overhang*

Fonte: Higgs (2018).

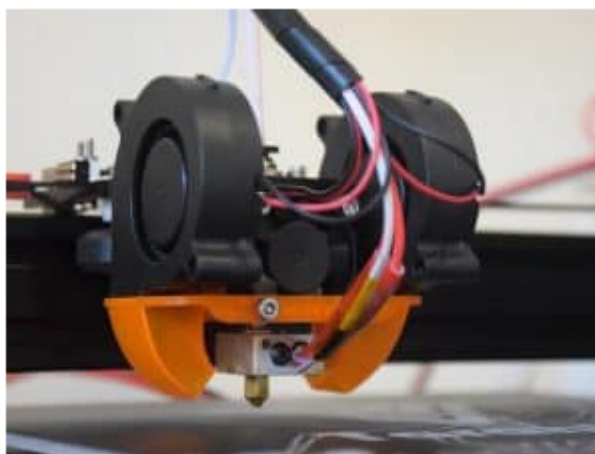
2.4.2.1 Melhorias de acabamento de peças impressas

Entre os problemas descritos anteriormente sobre rugosidade superficial, *staircases* (que também remete à rugosidade) e *overhangs* podem ser resolvidos a partir de algumas estratégias.

Os *overhangs* são causados por componentes em suspensão com ângulos superiores a 45° de inclinação. É possível resolver isso apenas posicionando a peça na mesa de impressão, buscando evitar que apresente material suspenso. Em geometrias mais complexas, só isso não basta, portanto, é necessária a criação de suportes para sustento do material em suspensão. (BINTARA, 2019).

Para os suportes, os *softwares* são programados para reduzir a quantidade de material utilizado, assim como a redução da adesão do suporte à peça. Dessa forma, a remoção do suporte é facilitada e deixa menos marcas na superfície da peça. Há também a possibilidade da utilização do filamento denominado *high impact polystyrene* (HIPS), que é solúvel com D-Limoneno, não causando danos à peça ao ser removido (LIMA, 2015). Também é possível evitar esse tipo de defeito com ajustes na própria impressora, como temperatura do bico, ventilação alta e uniformemente distribuída sobre a peça (Figura 18) e controle de fluxo (principalmente para evitar excesso de material, que acaba raspando no bico e causando deformações).

Figura 18 - Presença de "ventoinhas" para refrigeração das peças



Fonte: 3DFila (2018b).

Quanto ao *staircase*, esse é inevitável, por ser intrínseco ao processo de FDM, porém pode ser minimizado ao se reduzir a espessura das camadas e melhorar a estabilidade dos equipamentos, a fim de evitar vibrações (LIMA, 2015), além de outras configurações da máquina e inclinação do bico quando este é possível.

2.4.2.2 Acabamento superficial de produtos impressos em FDM

Após a fabricação da peça e mesmo minimizando o efeito da rugosidade superficial a partir dos parâmetros de impressão, em alguns casos faz-se necessário o tratamento superficial com pós-tratamentos, como mencionado por Lima (2015). Esse autor explicita que há desde soluções simples a soluções que exigem maquinários rebuscados. De acordo com Albuquerque (2018), os tratamentos podem ser agrupados em três grupos: tratamentos mecânicos, pinturas e tratamentos químicos.

Nos tratamentos mecânicos são utilizados lixas, bisturis, tesouras, alicates e até usinagem (ALBUQUERQUE, 2018; LIMA, 2015). Já as pinturas podem ser feitas com vasta gama de tintas (*spray*, tinta automotiva, de tecido, guache, etc) aplicadas com basicamente qualquer ferramenta (pincel, aerógrafo, compressor, etc) (ALBUQUERQUE, 2018).

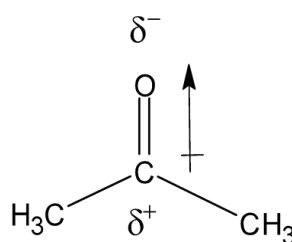
Por fim, o tratamento químico é relativo ao material de que a peça será fabricada. Devido à composição química do ABS, o vapor de acetona tem a capacidade de dissolver a superfície de peças confeccionadas com esse polímero. Albuquerque (2018) adverte que a peça deve ser colocada em uma câmara para sofrer a ação do solvente de maneira uniforme e

intensa, devendo-se atentar aos riscos de inflamabilidade da acetona. O PLA, por sua vez, reage com vapor de clorofórmio, porém, por ser um solvente de difícil aquisição utilizam-se, assim, outros métodos, como aplicação de resina líquida para suavização das camadas.

2.4.2.2.1 Reação química entre o vapor de propanona e o ABS

Ao analisarem-se quimicamente as reações entre os materiais, por exemplo, o ABS e a propanona em estado gasoso, podemos observar primeiramente que a molécula da propanona (C_3H_6O) (Figura 19) é composta de uma cadeia carbônica e um oxigênio. Morrison e Boyd (1996) descrevem que esse átomo de oxigênio é o fundamento da característica levemente polar da molécula.

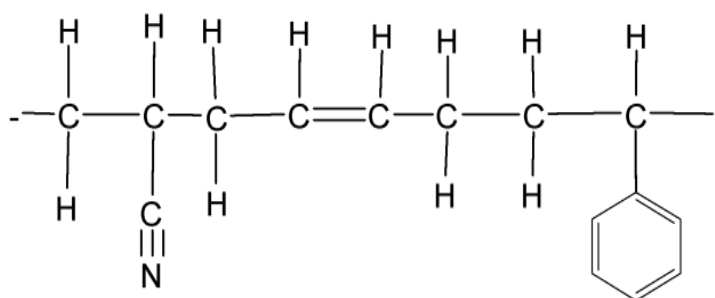
Figura 19 - Fórmula estrutural da propanona



Fonte: Morrison e Boyd (1996).

Ao mesmo tempo, o termoplástico ABS, com a fórmula caracterizada por $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$ (Figura 20), pode ter suas camadas suavizadas por meio do ataque químico de propanona. Isso se deve primeiro à polaridade das moléculas de ABS serem próximas da polaridade da propanona; segundo, pelas reações intermoleculares nas moléculas de propanona serem mais fortes que as interações moleculares na cadeia de ABS, causando a solubilização do ABS. Para isso, basta evaporar a propanona para dissolver o polímero.

Figura 20 - Fórmula estrutural do ABS



Fonte: Morrison e Boyd (1996).

Entretanto, o método em que o vapor de acetona é aplicado é pouco trabalhado na comunidade científica (LIMA, 2015; MORRISON; BOYD, 1996). Apesar de haver empresas que fornecem máquinas para esse fim, o custo do maquinário e o tempo de tratamento são muito elevados. O solvente também é de alto custo, havendo grande necessidade de envolvimento e conhecimento do operador na área e proteção do conhecimento por meio de patente da tecnologia. Tudo isso dificulta a disseminação e popularização da técnica (LIMA, 2015). Como se trata de uma dissolução da cadeia do polímero, cabe se atentar à perda dimensional e à fragilização da estrutura, ou seja, devendo haver um controle preciso na hora de aplicar a técnica.

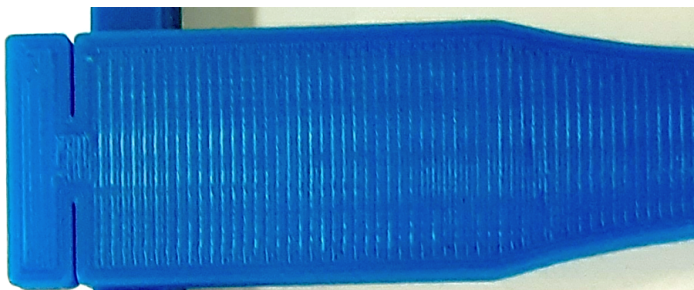
2.5 Rugosidade

Na Engenharia a rugosidade é fator fundamental e desempenha papel fundamental na interação entre corpos. Conforme explicam Benedicto, Oliveira e Silva (2011), a rugosidade é fator importante na resistência ao desgaste, em acoplamentos com interferência, na resistência à corrosão e à fadiga, no escoamento dos lubrificantes e na aparência da peça. E a importância de cada fator será ditada pela aplicação do componente.

Carpinetti *et al.* (1996) acreditam que a rugosidade é a textura superficial caracterizada pelas microirregularidades geométricas deixadas na superfície do material durante o processo de fabricação. Vários fatores podem influenciar na rugosidade de uma peça. Assim como na usinagem e no processo de impressão 3D, ela consiste basicamente de marcas regulares deixadas pelo perfil do bico ou da ferramenta combinadas a outras irregularidades em função do processo e/ou do material, como, por exemplo, microvibrações entre a ponta da ferramenta e a peça. A Figura 21 apresenta parte de um corpo de prova desta

pesquisa, na qual ficam evidenciadas linhas horizontais que representam as ondulações existentes na superfície.

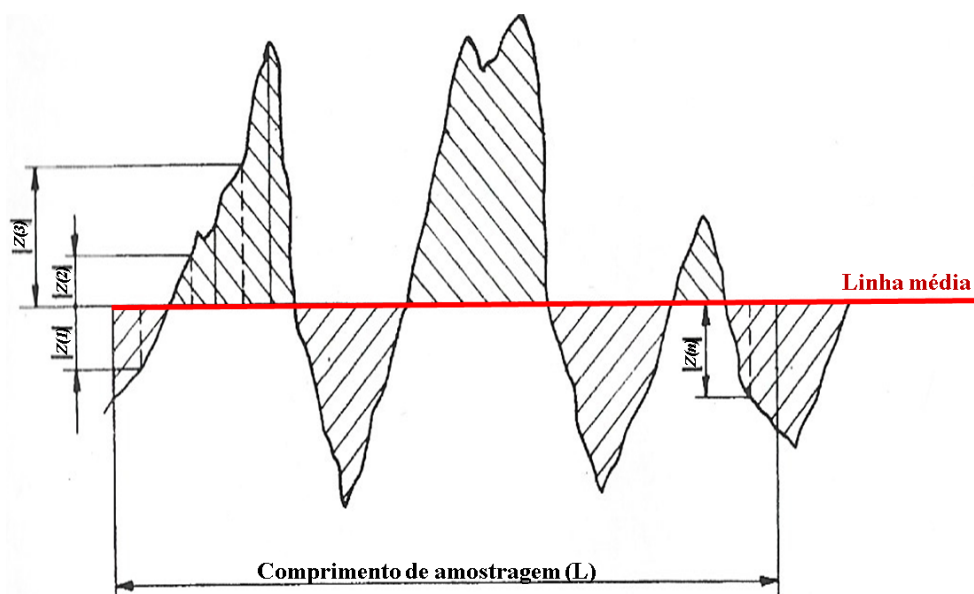
Figura 21 – Detalhe do corpo de prova da pesquisa



Fonte: os autores.

Entre os métodos de quantificação dessa textura superficial de modo bidimensional, ou seja, quantificar o valor das irregularidades superficiais no perfil real da peça, são amplamente adotadas as relações entre as amplitudes (altura) dos picos e/ou dos vales e uma frequência de distribuição. Assim sendo, no Brasil, a principal medida de rugosidade normalizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) com base na Norma ISO 4287/1(2002) é o parâmetro Ra , caracterizado como sendo ISO, 2004: o valor médio aritmético (Ra) expresso em micra (μm), dos valores absolutos dos desvios e do perfil real em relação à linha média do perfil, como mostra a Figura 22 (MANFÈ; POZZA; SCARATO, 2004).

Figura 22 – Representação dos componentes do desvio médio aritmético para a Ra



Fonte: adaptado de Manfè, Pozza e Scarato (2004).

Ao mesmo tempo, com base nessas normalizações, tem-se matematicamente que o desvio aritmético médio do perfil avaliado designado de Ra , Pa ou Wa é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas $Z(x)$ no comprimento de amostragem, sendo calculado mediante a Equação 01, de acordo com a norma ISO 4287/1(2002) (ISO, 2004).

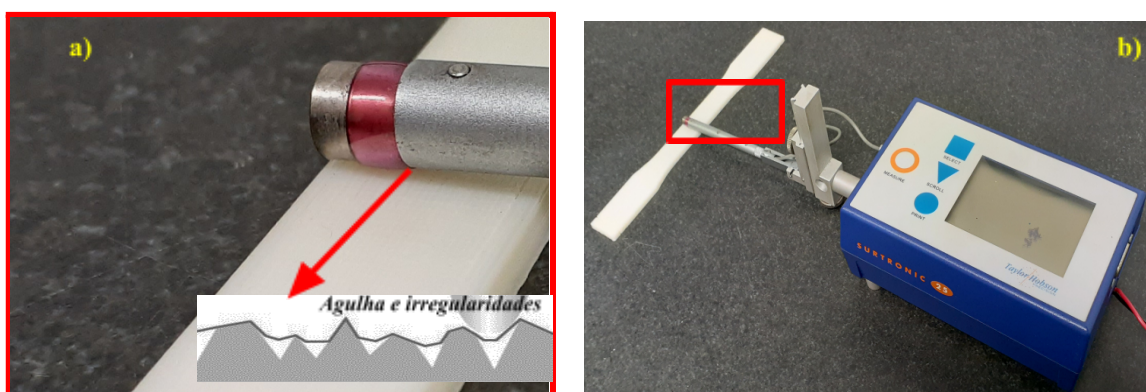
$$Ra = \frac{1}{ln} \int_0^{ln} Z(x) dx \quad (01)$$

Na Equação 01 tem-se que $Z(x)$ é o valor do desvio do perfil real em relação à linha média (vale ou pico, também designado de ordenada ou Y) em comprimento avaliação Ln (ou posição X) do comprimento de amostragem L .

Durán, Cabrera e Leite (2017) realçam que o parâmetro Ra descrito é o principal índice utilizado nos processos de fabricação industriais para exprimir quantitativamente a rugosidade. Carpinetti *et al.* (1996) e Benedicto, Oliveira e Silva (2011) citam outros parâmetros relevantes, como a rugosidade média quadrática (R_q), a máxima distância pico a vale (t) e a altura máxima do perfil avaliado (z).

Para mensurar esses parâmetros de rugosidade superficial bidimensional, normalmente utilizam-se a captação da medição de amplitude e a frequência da textura do comprimento amostral por meio de dispositivos chamados de rugosímetros (Figura 23b). Esses dispositivos possuem uma agulha que será deslocada sobre uma seção da superfície do material a ser mensurada, visando captar esses dados (Figura 23a). Essa parte é considerada representativa de todo o restante da peça. Ainda, esses equipamentos são dotados de microprocessadores e/ou sistemas computacionais e/ou *softwares* capazes de realizar os cálculos dos parâmetros descritos e outros (MANFÈ; POZZA; SCARATO, 2004).

Figura 23 - Representação do processo de medição da rugosidade superficial



Fonte: do autor. a) Detalhe da agulha e superfície mensurada; b) Rugosímetro.

2.6 Técnicas Estatística aplicadas em Engenharia

Dentre as várias análises estatísticas que podem ser realizados em uma pesquisa para seu enriquecimento e validação, foram utilizados ANOVA, planejamento fatorial 2^k e regressão linear múltipla.

Conforme cita Rocha (2018) e Cordeiro(2018), a ANOVA consiste na análise de variância, capaz de conferir diferenças entre as médias de três ou mais grupos através de duas hipóteses: a hipótese nula H_0 e a hipótese alternativa. Na hipótese nula é considerado que as médias são iguais e na hipótese alternativa pelo menos uma das médias é diferente.

Já o planejamento experimental consiste numa otimização no procedimento experimental que, segundo Pereira (2018), pode ser resumido em:

- (1) execução de um número reduzido de experimentos quando comparado com o procedimento univariado convencional;
- (2) economia de recursos financeiros;
- (3) obtenção de resultados com maiores confiabilidades química e estatística;
- (4) possibilidade de obter um modelo matemático que permitirá a realização de previsões em condições que não foram testadas.

Nesta pesquisa foi utilizado o planejamento experimental 2^2 acrescentado de um composto central que consiste em avaliar inter-relações entre as variáveis selecionadas pelo planejamento experimental.(MATTIETTO, 2012).

Por fim, a regressão linear múltipla de acordo com Coelho (2008), consiste em determinar uma variável linearmente através de outras duas já estabelecidas através da fórmula:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i, i = 1, \dots, n \quad (2)$$

em que, n é o número de indivíduos, y_i é a observação da variável dependente para o i -ésimo indivíduo, $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik})'$ é um vetor de observações das variáveis independentes para o i -ésimo indivíduo, $\beta = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)'$ é um vetor de coeficientes de regressão (parâmetros) e ε_i é um componente de erro aleatório. Assume-se que esses erros são independentes e seguem distribuição normal com média zero e variância desconhecida σ^2 .

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivos gerais

Este trabalho teve por objetivo determinar a influência de duas variáveis do processo de tratamento superficial de peças fabricadas em ABS via impressão 3D, sendo elas o tempo de exposição ao vapor de solvente e a quantidade em mililitros deste solvente na câmara. Após a realização dos testes experimentais, objetivava-se avaliar os efeitos causados nos corpos de prova a partir de análise da variação de massa, da espessura resultante e da rugosidade superficial (Ra).

3.2 Objetivo específico

Este trabalho tem por objetivo específico propor e testar uma metodologia de tratamento superficial de peças fabricadas pela tecnologia FDM por meio do ataque químico com vapor de acetona, visando avaliar os efeitos no acabamento superficial minimizando os efeitos do processo sobre as dimensões e maximizando a redução da rugosidade do produto, como também estabelecer e testar parâmetros quantitativos para avaliação do método.

Para isso, fez-se necessário definir os seguintes objetivos secundários:

- i. Desenvolver um procedimento passível de replicação e com baixo erro de previsibilidade dos resultados futuros.
- ii. Alcançar a capacidade de previsibilidade da rugosidade superficial de peças, de maneira que haja domínio dimensional e da densidade dentro de margens de erros conhecidas.

- iii. Propiciar uma técnica que supra algumas demandas de aplicação do tratamento superficial de componentes impressos em 3D para comunidade do IFMG campus Betim.
- iv. Propor um processo de baixa complexidade de operação, manuseio e baixo custo.
- v. Estabelecer critérios de segurança para o usuário quanto a manipulação de produtos e ao uso de equipamento.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Equipamentos e materiais

4.1.1 Impressora 3D

Para o presente trabalho foi utilizada a impressora Da Vinci 1.0 Pro, devido à sua disponibilidade no *Campus* Betim, viabilizando o início imediato da pesquisa realizada. O modelo comporta o processo de FDM, sendo possível trabalhar com filamentos termoplásticos (ABS, PETG, PLA e HIPS)² com diâmetro de 1,75 mm. Possui mesa aquecida, volume de impressão disponível com as seguintes dimensões (LxCxH): 200 x 200 x 200 mm e ainda um bico extrusor único com diâmetro de 0,4 mm, precisão dimensional de 0,2 mm e espessura fina de 0,1 mm. A impressora trabalha com arquivos .stl e .3w, o *software* de impressão é original e o método de conexão pode ser por *wireless fidelity* (WIFI), *Universal serial bus* (USB) ou cartão de memória. Para os casos de *Wifi* e USB é demandada a utilização de *Windows 7* ou versões superiores. Nas figuras 24, 25 e 26 apresentamos a impressora 3D com tecnologia FDM utilizada neste trabalho.

² HIPS: poliestireno de alto impacto (*High Impact Polystyrene*) é um filamento solúvel em D-limoneno utilizado para impressões 3D (3dFila, 2018a).

Figura 24 - Impressora 3D da marca Da Vinci 1.0 Pro utilizada na pesquisa



Fonte: do autor.

Figura 25 - *Display* digital para *set up* das configurações de impressão



Fonte: do autor.

Figura 26 - Interior da impressora



Fonte: do autor.

Na Figura 24 está representada a impressora conforme o modelo utilizado na pesquisa. Ainda, a Figura 25, é possível visibilizar a disposição do *display* e a partir dele foi configurada a máquina. Em seguida, tem-se a Figura 26, a qual disponibiliza a visibilização do interior da cabine de impressão, onde é possível observar que o cabeçote de impressão se movimenta em dois eixos (X e Y), enquanto a mesa se movimenta no eixo Z, no sentido de cima para baixo à medida que a impressão acontece.

4.1.2 Câmara de vedação e banho maria

Para o tratamento foi utilizado um recipiente de vedação com um sistema próprio de pressurização por motor, o qual demanda a utilização de um anel de borracha na câmara, responsável por vedar a interseção entre a base e a tampa do recipiente (Figura 27). Além desses elementos, foram também utilizadas quatro presilhas espaçadas igualmente para garantir que a reação química seja um sistema fechado.

Figura 27 - Recipiente de contenção devidamente fechado



Fonte: do autor.

Após o fechamento da câmara de tratamento, foi utilizada a máquina da CIENLAB (Figura 28), para mergulhar o recipiente em água aquecida e para realizar um banho-maria no sistema, fornecendo aquecimento homogêneo (Figura 29).

Figura 28 - Máquina da CIENLAB para banho-maria e recipiente para contenção do vapor de acetona



Fonte: do autor.

Figura 29 - Água aquecida em contato com a câmara



Fonte: do autor.

4.1.3 Parâmetros de impressão

Para a impressão dos corpos de prova, como já dito anteriormente, foi utilizada a impressora Da Vinci 1.0 Pro; Levando em conta os resultados de pesquisas anteriores compilados na Tabela 4, utilizou-se a espessura da primeira camada de 0,3 mm e das demais

camadas 0,2 mm para maximizar as qualidades mecânicas e minimizar o *staircase*. A temperatura do bico para a fusão do material foi estabelecida conforme a margem de trabalho indicada pelo fabricante. As espessuras de cascas foram definidas para caracterizarem mais resistência ao corpo de prova, e definiu-se baixa velocidade de movimentação do cabeçote para maximizar o grau de precisão da impressão. Na Figura 30 segue-se a inserção dos parâmetros no *software* da impressora.

Figura 30 - Parâmetros de impressão dos corpos de prova

The image shows two side-by-side screenshots of the XYZprint software interface. The left panel is titled 'Geral' (General) and the right panel is titled 'Velocidade' (Speed).

Panel 1: Geral

- Bocal1 Temperatura: 225 °C
- Temperatura do bico 1 da primeira camada: 225 °C
- Plataforma Aquecida Temperatura: 90 °C
- Temperatura do leito de impressão da primeira camada: 90 °C
- Densidade de Enchimento: 10 %
- Tipo de Preenchimento: Retilíneo
- Altura da Camada: 0.20 mm
- Altura da primeira camada: 0.30 mm
- Espessura da Casca Normal: 3 layers
- Espessura da Casca Superfície superior: 3 (with warning icon)
- Espessura da Casca Superfície inferior: 3 (with warning icon)
- Limiar de detalhes: 0.040 mm
- Evite cruzar peças impressas quando não estiver efetuando extrusão:
- Deteção de ponte:
- Taxa de extrusão de ponte: 90 %

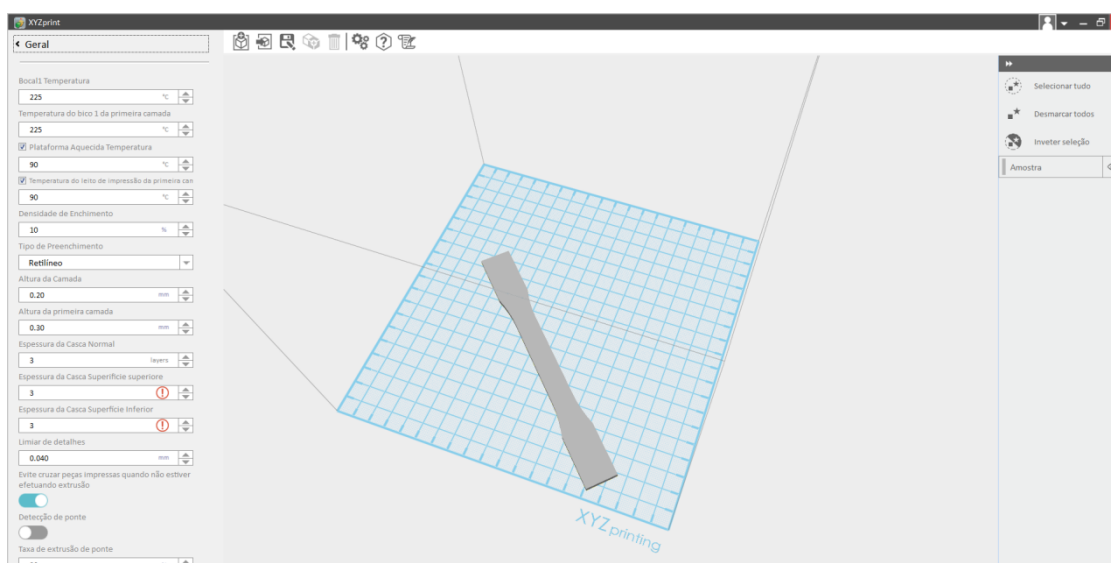
Panel 2: Velocidade

- Cascas Normal Velocidade: 45 mm/s
- Cascas Superfície Velocidade: 15 mm/s
- Cascas Raio Pequeno Velocidade (raio < 6.5mm): 5 mm/s
- Preenchimento Normal Velocidade: 45 mm/s
- Preenchimento Superfície Superior Velocidade: 45 mm/s
- Enchimento Sólido Velocidade: 45 mm/s
- Velocidade de Impressão em Ponte: 25 mm/s
- Velocidade de movimento de não impressão: 25 mm/s
- Velocidade da Camada Inferior: 15 mm/s
- Velocidade de Retração: 10~250 mm/s
- 15 mm/s
- Auto ajuste de velocidade para peças pequenas

Fonte: do autor.

Na Figura 31 é ilustrada a escolha de posicionamento do corpo de prova sobre a mesa de impressão. Devido ao processo automático de posicionamento da estrutura de preenchimento, o corpo de prova foi rotacionado 45° para que as fibras de preenchimento dos corpos de prova ficassem dispostas ao longo de toda a peça, para que os esforços fossem feitos ao longo das fibras e não em suas interseções.

Figura 31 - Posicionamento do corpo de prova sob a mesa de impressão

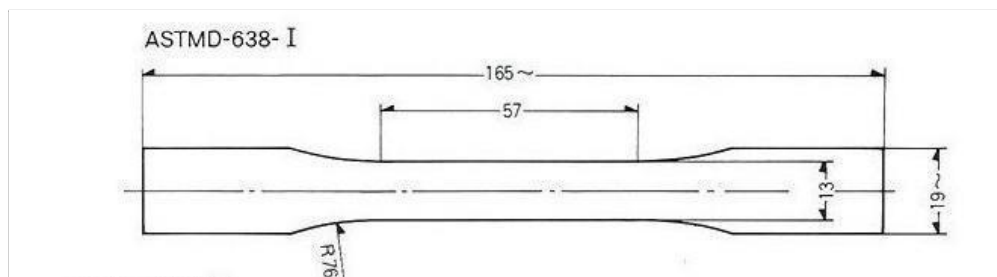


Fonte: do autor.

4.1.4 Corpos de prova

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram impressos corpos de prova conforme o modelo de referência, de acordo com o material utilizado presente na norma ASTM D638 (Figura 32) com 3,2 mm de espessura. E para a fixação dos corpos de prova nos suportes (Figura 33) foram acrescentados 1,65 mm nas extremidades (Figura 34) para que, após o tratamento químico, esse acréscimo fosse removido.

Figura 32 - Norma ASTM D638



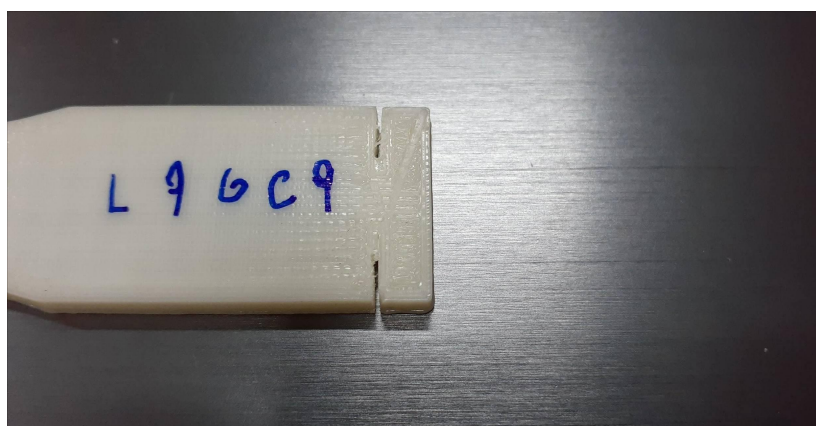
Fonte: Norma ASTM D638.

Figura 33 - Utilização dos talhos nos corpos de prova de forma a fixar no suporte



Fonte: do autor.

Figura 34 - Acréscimo no corpo de prova para fixação no suporte



Fonte: do autor.

4.1.5 Materiais

Como dito anteriormente, foi utilizado o filamento acrilonitrila butadieno estireno (ABS) com a fórmula $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$, a qual é caracterizada por uma cadeia apolar devido à grande distribuição de carbono em sua constituição.

O filamento utilizado para a pesquisa foi um ABS natural, o qual se constitui em ausência de pigmentação, a fim de que seja evitada influência na conclusão dos resultados.

O referido filamento foi adquirido do fabricante 3DLab, lote L 9GD0 e L 9GC9. Assim que desembalado, foi usado para que se pudesse imprimir os corpos de provas. Cabe registrar que, ao final da sua utilização, o filamento ABS foi condicionado em embalagem plástica própria, devidamente vedada, contendo sílica, para que a umidade do ar não alterasse as propriedades originais do material.

A Figura 35 ilustra as especificações de lote e temperatura de trabalho do ABS na caixa original, no momento em que sua embalagem foi retirada. O filamento vem lacrado a vácuo.

Figura 35 - ABS natural utilizado



Fonte: do autor.

Quanto ao reagente, definiu-se a propanona na forma de vapor para solubilizar o ABS. A propanona possui a seguinte fórmula química: $(CH_3)_2CO$ e peso molecular de 58,08 g/mol. A capacidade de solubilização da propanona, como já dito, deve-se ao nível de polaridade próximo do ABS, caracterizada por uma estrutura química apolar levemente polar.

Na Figura 36 está representado o recipiente de armazenamento do reagente.

Figura 36 - Propanona da marca Synth



Fonte: do autor.

A propanona utilizada é da marca Synth e o frasco possui 1.000 mL. O material está disponível no laboratório de química do IFMG Betim. Cabe ressaltar que a manipulação da propanona deve ser feita cuidadosamente e em lugar arejado, devido à sua inflamabilidade informada na Figura 37.

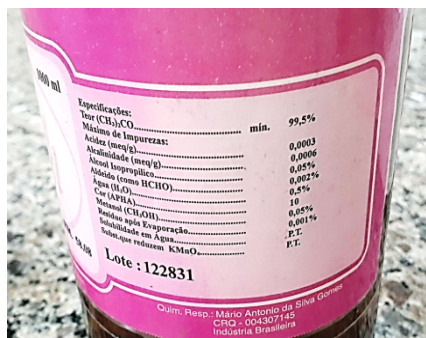
Figura 37 - Indicação de líquido inflamável no frasco



Fonte: do autor.

O teor mínimo de propanona é de 99,5% e o lote de fabricação é 122831, representado na Figura 38.

Figura 38 - Indicação de teor mínimo e lote de fabricação

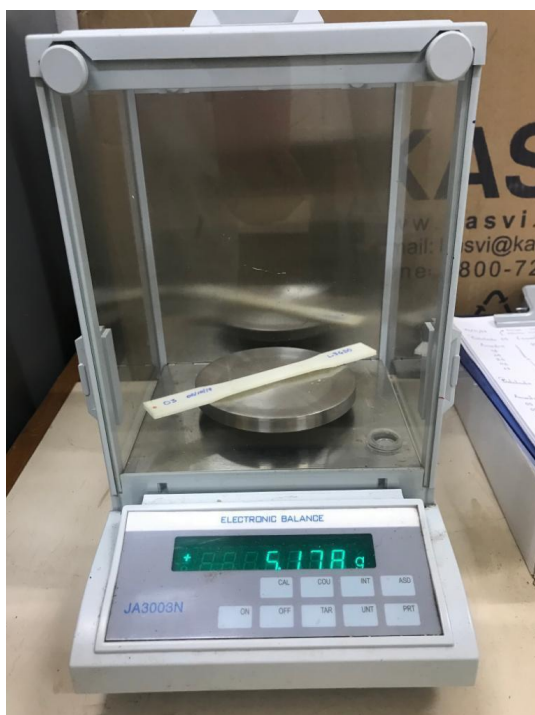


Fonte: do autor.

4.1.6 Medições

Para a verificação da massa dos corpos de prova, foi utilizada a balança eletrônica de precisão com câmara de pesagem do modelo JA3003N, disponível no IFMG *Campus* Betim. Para isso, a balança foi devidamente posta sobre uma superfície nivelada e tarada. Após a inserção do corpo de prova na câmara, esta foi fechada para que possíveis deslocamentos de ar não influenciassem nos valores obtidos, como referido na Figura 39.

Figura 39 - Coleta da massa do corpo de prova por meio da balança eletrônica



Fonte: do autor.

Cada corpo de prova foi pesado três vezes e obtida a média dos valores encontrados. Após o fim da pesagem, os corpos de prova foram submetidos ao teste de rugosidade superficial. Para tal, foi utilizado o rugosímetro Surtronic 25 (Figura 40), disponibilizado ao Professor Wanderson pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Figura 40 - Rugosímetro utilizado para medir a rugosidade superficial dos corpos de prova



Fonte: do autor.

Para a coleta de dados, foram mensurados três pontos ao longo dos corpos de prova indicados pelas letras A, B e C, de acordo com a Figura 40. Cada um dos três pontos foi mensurado cinco vezes e obtida a média dos valores encontrados. O *cut off* utilizado foi de 0,25 mm em seções de 7,5 mm. Por fim, utilizou-se um paquímetro Universal Digital 150mm em Aço Inox - MTX-316119 com display LCD, resolução: 0,01 mm/0,0005" - 1/64", bateria de 1,5 V, tipo SR44; Erro de medição e 0,02 mm (100 mm) 0,03 mm (100–200 mm), para a coleta da espessura inicial das amostras nas três seções de referência. Cada uma das seções foi mensurada três vezes e obtida a média dos valores encontrados.

4.1.7 Métodos de análises

Antes da realização dos testes propostos neste trabalho, foram realizados pré-testes utilizando corpos de prova azul com o intuito de estabelecer os parâmetros de

tempo de exposição e quantidade de solvente que foram utilizados na pesquisa conforme Tabela 7 e que, para tal, foram utilizados Planejamento Fatorial 2^k , sendo $K=2$ e com 01 Composto Central para estipular os ensaios.

Neste trabalho foi realizada a análise estatística de variância (ANOVA) das médias das espessuras encontradas nos 25 corpos de prova via Minitab Statistical Software Version Education. Além disso, para a análise de resultados, foram utilizados os gráficos de linha para visualização do efeito das variáveis sobre os resultados e, por fim, foram utilizados gráficos de contorno os quais permitem analisar o efeito de duas variáveis contínuas sobre os resultados.

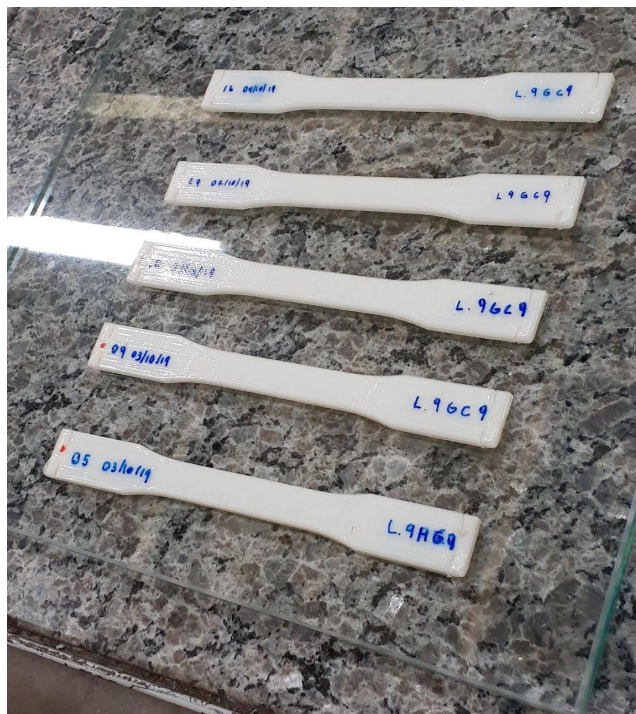
4.2 Procedimento

Para o desenvolvimento do procedimento experimental foi estabelecida a seguinte sequência de trabalho:

- a) Configurar os parâmetros iniciais na impressora 3D;
- b) após a configuração, produzir 25 corpos de prova para o estudo;
- c) ao fim da impressão, o corpo de prova deve ser deixado para resfriar naturalmente, removido da mesa aquecida por uma espátula e colocado sobre um tampo de vidro para resfriamento uniforme em uma sala climatizada e livre de corrente de ar (Figura 41);
- d) após a impressão, mensurar três vezes cada amostra e coletar a média das massas (Figura 39). A balança de precisão deve ser devidamente nivelada, tarada e sua câmara fechada em cada pesagem;
- e) em seguida, cada amostra deve ser submetida ao rugosímetro. A Figura 40 trata da coleta de dados, que é efetuada em três pontos - A, B e C -; e em cada ponto realizam-se cinco coletas, estabelece-se a média dos resultados encontrados e depois uma média geral dos pontos em cada peça;
- f) posteriormente, com um paquímetro, a coleta de dados da espessura é efetuada em três pontos - A, B e C - e em cada um deles realizam-se três coletas, estabelece-se a média dos resultados encontrados e depois uma média geral dos pontos em cada peça;

g) registrados os dados coletados (Tabela 6), inicia-se a etapa do tratamento superficial;

Figura 41 - Resfriamento dos corpos de prova sob placa de vidro



Fonte: do autor.

A. Para o preparo do “banho-maria”, preencher com água o interior do equipamento e programar a temperatura de 62,9 °C, que consiste na temperatura de ebulição da propanona (Figura 42).

Figura 42 - Programação do “banho-maria”



Fonte: do autor.

- B. Na sequência, aguardar até que a temperatura da água se estabilize no “banho-maria”.
- C. Para a montagem do teste, agrupar, aleatoriamente, cinco amostras por vez para a formação dos ensaios.
- D. Cada ensaio estará sujeito a um tempo de exposição, assim como a um específico volume/quantidade de propanona (solvente) em mililitro disposto na câmara, de forma que os testes devam ser realizado, obedecendo ao Planejamento Fatorial 2^2 com 01 ponto central apresentado na Tabela 5.

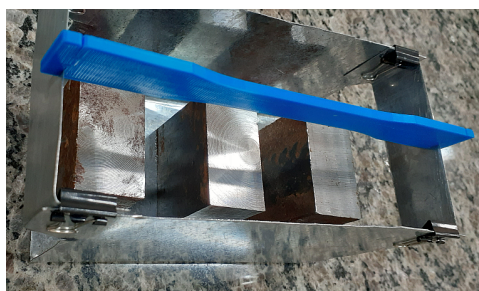
Tabela 5 – Planejamento Fatorial 2^k com Ponto Central e regressão Linear

Ensaio	Fatores	
	Tempo de exposição (minutos - min)	Quantidade de solvente (mililitro - mL)
1	20	400
2	27,5	300
3	35	200
4	20	200
5	35	400

Fonte: do autor.

- E. Para a montagem do teste, encaixar os corpos de prova no suporte por meio dos entalhes presentes na amostra (Figura 34) e anotar a sequência e combinação por ensaio.
- F. Na sequência, colocar os contrapesos no suporte de forma a evitar o tombamento ou qualquer outra movimentação do conjunto na cuba de tratamento (Figura 43).

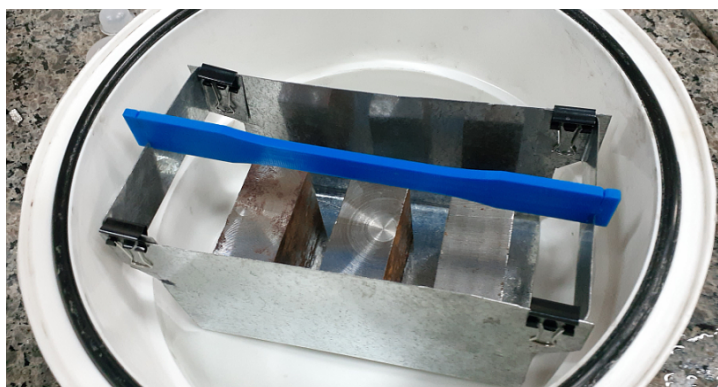
Figura 43 - “Contrapesos” no suporte para estabilizar o conjunto



Fonte: do autor.

G. Em seguida, o conjunto deve ser posto dentro da cuba de tratamento (Figura 44).

Figura 44 - Conjunto inserido na cuba de vácuo

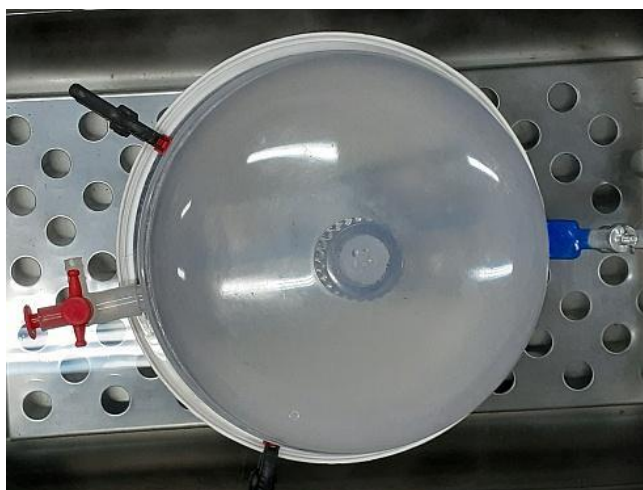


Fonte: do autor.

H. Feita a inserção do conjunto, verter a quantidade de mililitro de acetona na cuba de vácuo com cuidado para que não entre em contato direto com as amostras.

I. Ao término da última etapa, deve-se fechar a tampa da cuba e, para garantir que o sistema esteja isolado, utilizar ao menos quatro grampos (Figura 45).

Figura 45 - Fechamento da cuba e utilização de grampos



Fonte: do autor.

J. Feito isso, colocar a cuba no “banho-maria” e cronometrar o tempo (Figura 46).

Figura 46 - Cuba parcialmente imersa na água aquecida



Fonte: do autor.

- K. Com o esgotamento do tempo, remover a cuba do banho e abrir a cuba com cuidado, pois pode haver pressão.
- L. Retirar o suporte com cuidado e esperar cerca de 10 minutos para que o conjunto estabilize à temperatura ambiente.
- M. Estabilizada a temperatura, anotar a numeração novamente nos corpos de prova e colocar sobre uma superfície plana e inerte para descansar por 24 horas.
- N. Para cada teste trocar a borracha de vedação, pois a propanona pode danificá-la e diminuir sua eficiência.
- O. Ao ter realizado o tratamento de todas as amostras, mensurar a massa e a rugosidade seguindo as etapas anteriores.
- P. Por fim, comparar os dados iniciais e finais e analisar os resultados obtidos.

4.3 Dados iniciais

A seguir, na Tabela 6 estão registradas as amostras conforme configuração nos ensaios e seus respectivos valores de massa, espessura e valores da rugosidade R_a inicial encontrados.

Tabela 6 - Massa, espessura e rugosidade iniciais das amostras por ensaio

Ensaio	Amostra N°	Massa (gr)	Espessura* (mm)	Rugosidade R_a (μm)
1	18	5,39	3,22	3,99
	24	5,464	3,23	5,88
	23	5,456	3,24	5,13
	02	5,153	3,22	4,90
	17	5,412	3,22	5,25
2	05	5,151	3,23	5,39
	09	5,304	3,24	4,97
	10	5,278	3,23	4,23
	29	5,415	3,25	5,17
	16	5,393	3,23	4,21
3	15	5,394	3,24	5,34
	26	5,517	3,25	5,70
	19	5,381	3,24	5,08
	13	5,361	3,22	4,95
	03	5,179	3,21	5,30
4	25	5,412	3,24	4,36
	22	5,348	3,23	5,51
	01	5,026	3,20	6,27
	07	5,325	3,22	5,30
	20	5,382	3,24	5,72
5	30	5,476	3,24	5,05
	06	5,212	3,22	4,87
	12	5,448	3,24	5,05
	14	5,332	3,23	5,03
	28	5,413	3,25	5,66

* Espessura teórica via parâmetros de impressão = 3,3 mm.

Fonte: do autor.

4.4 Dados finais

Os resultados encontrados de massa, espessura e rugosidade R_a após o tratamento superficial via vapor de propanona reação encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Massa, espessura e rugosidade iniciais das amostras por ensaio

Ensaio	Amostra N°	Massa (gr)	Espessura* (mm)	Rugosidade R_a (μm)
1	18	5,521	3,23	1,15
	24	5,589	3,23	0,85
	23	5,580	3,24	1,03
	02	5,274	3,22	1,23
	17	5,534	3,24	0,99
2	05	5,409	3,27	0,78
	09	5,541	3,28	0,93
	10	5,536	3,29	0,84
	29	5,564	3,29	0,92
	16	5,655	3,29	0,83
3	15	5,778	3,32	0,57
	26	5,851	3,32	0,74
	19	5,706	3,29	0,70
	13	5,704	3,25	0,85
	03	5,512	3,29	0,65
4	25	5,594	3,25	0,87
	22	5,507	3,25	1,02
	01	5,216	3,21	1,13
	07	5,490	3,25	0,90
	20	5,560	3,25	0,96
5	30	5,872	3,32	0,71
	06	5,574	3,31	0,72
	12	5,802	3,32	0,66
	14	5,682	3,31	0,95
	28	5,757	3,32	0,63

Fonte: do autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme apresentado no capítulo 4, foram fabricados 25 corpos de prova e testados dois parâmetros do processo, a saber, tempo de exposição e quantidade de solvente. Ainda, de acordo com as configurações de parâmetros dos testes presentes na Tabela 5, foram controladas as variações de massa, de espessura e de rugosidade superficial. Assim, os valores dos dados apresentados nas Tabelas 6 e 7 foram compilados e se obteve a variação delta (Δ), que representa a diferença entre o valor inicial e o valor final de um parâmetro de controle em cada corpo de prova. A seguir, os resultados e discussões obtidos via análises desses dados.

5.1 Variação da espessura

Primeiramente, como as espessuras dos 25 corpos de prova supostamente apresentaram valores numéricos com pouca variação, antes e após tratamento superficial com vapor de propanona foi realizada a análise estatística de variância (ANOVA) das médias via *Minitab Statistical Software Version Education*. A Figura 47 traz os resultados dos cálculos no *software*.

Figura 47 – Cálculos da análise das médias para espessura

ANOVA com um fator: Espessura (mm) versus Condição do Corpo de Prova

Método

Hipótese nula Todas as médias são iguais
 Hipótese alternativa No mínimo uma média é diferente
 Nível de significância $\alpha = 0,05$

Assumi-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator Níveis Valores
 Condição do Corpo de Prova 2 Final (Pós Tratamento); Inicial (Antes do Tratamento)

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Condição do Corpo de Prova	1	0,02247	39,49%	0,02247	0,022472	31,32	0,000
Erro	48	0,03444	60,51%	0,03444	0,000717		
Total	49	0,05691	100,00%				

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)
0,0267862	39,49%	38,22%	0,0373698	34,34%

Médias

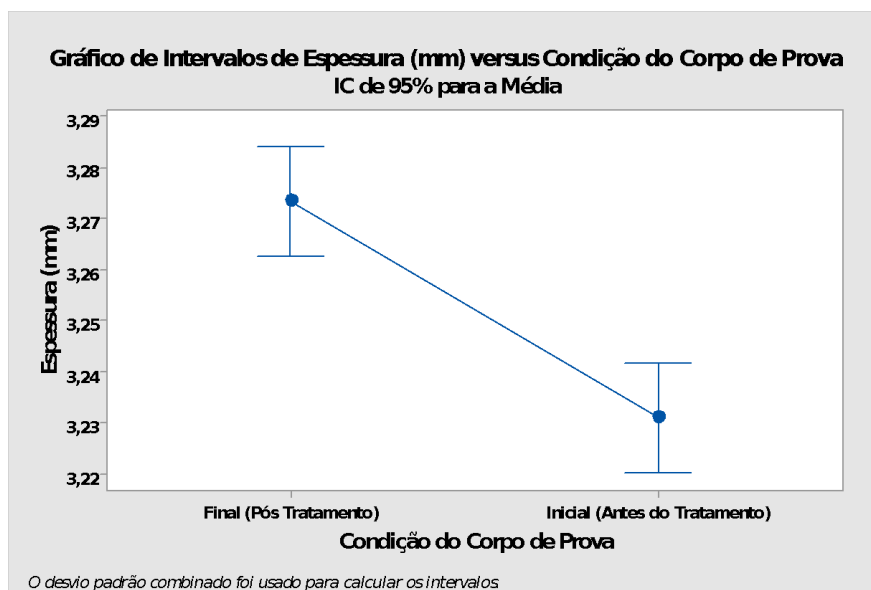
Condição do Corpo de Prova	N	Média	DesvPad	IC de 95%
Final (Pós Tratamento)	25	3,27360	0,03569	(3,26283; 3,28437)
Inicial (Antes do Tratamento)	25	3,23120	0,01269	(3,22043; 3,24197)

DesvPad Combinado = 0,0267862

Fonte: do autor.

Como se pode observar nos resultados, o valor-p é de 0,000, ou seja, abaixo do nível de significância estipulado para teste, que foi de 0,05, constatamos que as médias são diferentes. No Gráfico 1, gerado no mesmo *software*, nota-se que os valores médios dentro do intervalo de confiança (IC) são diferentes (IC de 95% para a média).

Gráfico 1 – Cálculos da análise das médias para espessura

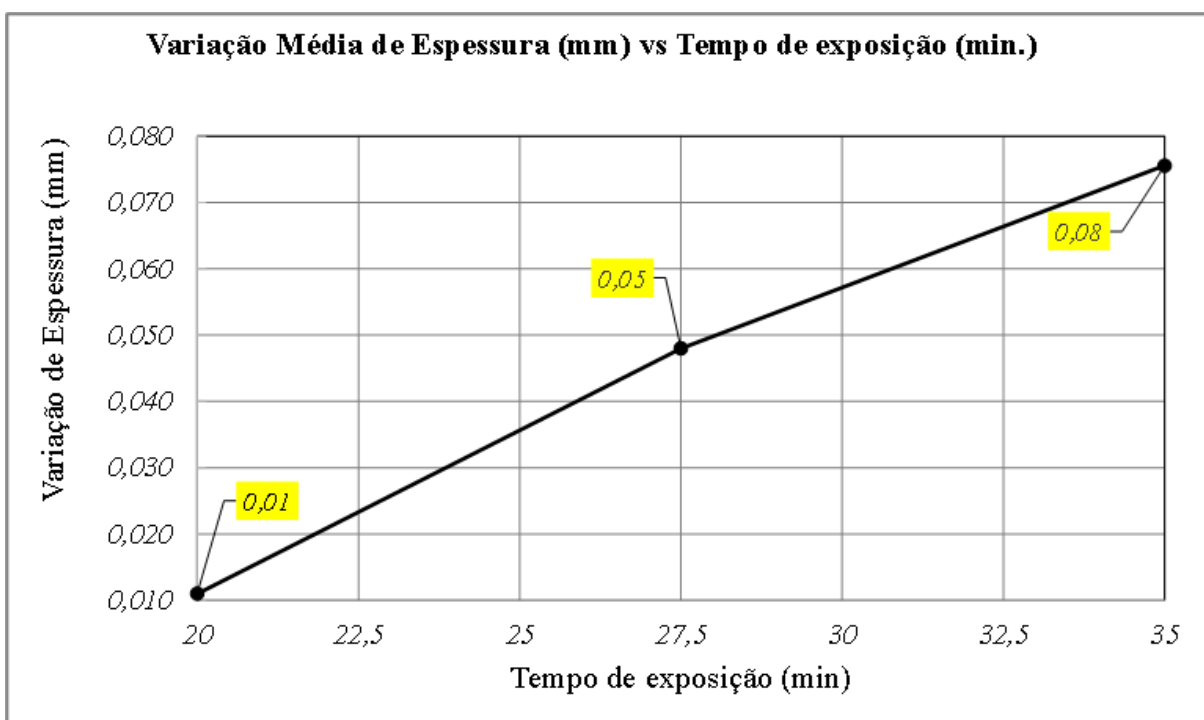


Fonte: do autor.

Na sequência, os Gráficos 2 e 3 demonstram as relações dos efeitos do tempo de exposição e quantidade de solvente sobre a espessura média dos corpos de prova, sendo que estes foram agrupados por amostra e suas réplicas para cada tipo de ensaio, e as médias calculadas, sendo cinco o número total de elementos/observações ($n=5$).

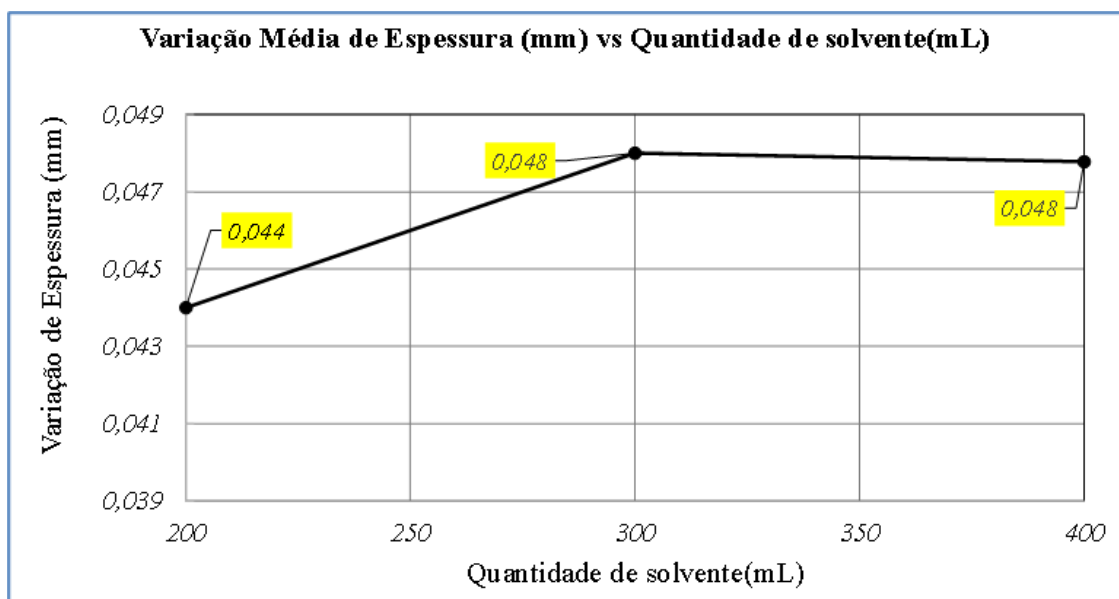
A análise do Gráfico 2 revela que o tempo de exposição tem relação direta com o aumento da espessura da peça e, conseqüentemente, com o aumento do erro dimensional linear da geometria de aproximadamente 0,24 mm a cada 10 mm (dimensão nominal de impressão 3,300 mm; dimensão média 3,274 mm). Ainda, a quantidade de solvente (Gráfico 3) possui essa relação, mas com menos efeito sobre a dimensão, havendo a saturação de sua quantidade em aproximadamente 300 mL de propanona.

Gráfico 2 – Efeito do tempo de exposição na média da espessura dos corpos de prova



Fonte: do autor.

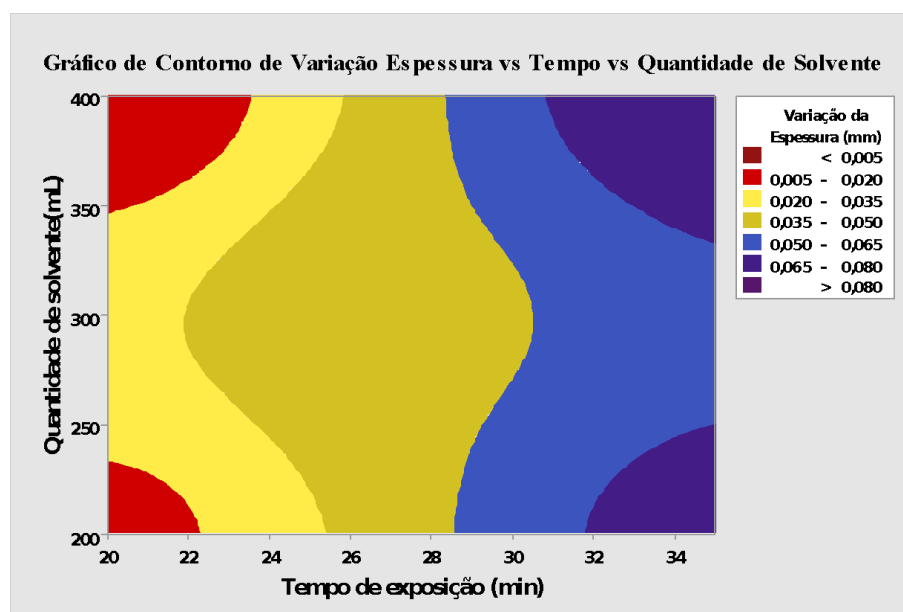
Gráfico 3 – Efeito da quantidade de solvente na média da espessura dos corpos de prova



Fonte: do autor.

Para representar a relação conjunta de tempo de exposição e quantidade de solvente em função da variação de espessura, elaborou-se o gráfico de contorno (Gráfico 4), desenvolvido no *Minitab Statistical Software Version Education*. Nele se vê que, conforme dados dos testes, não há uma relação linear entre os parâmetros e a espessura e duas regiões de valores mínimos.

Gráfico 4 – Variação de espessura em função do tempo e quantidade de solvente



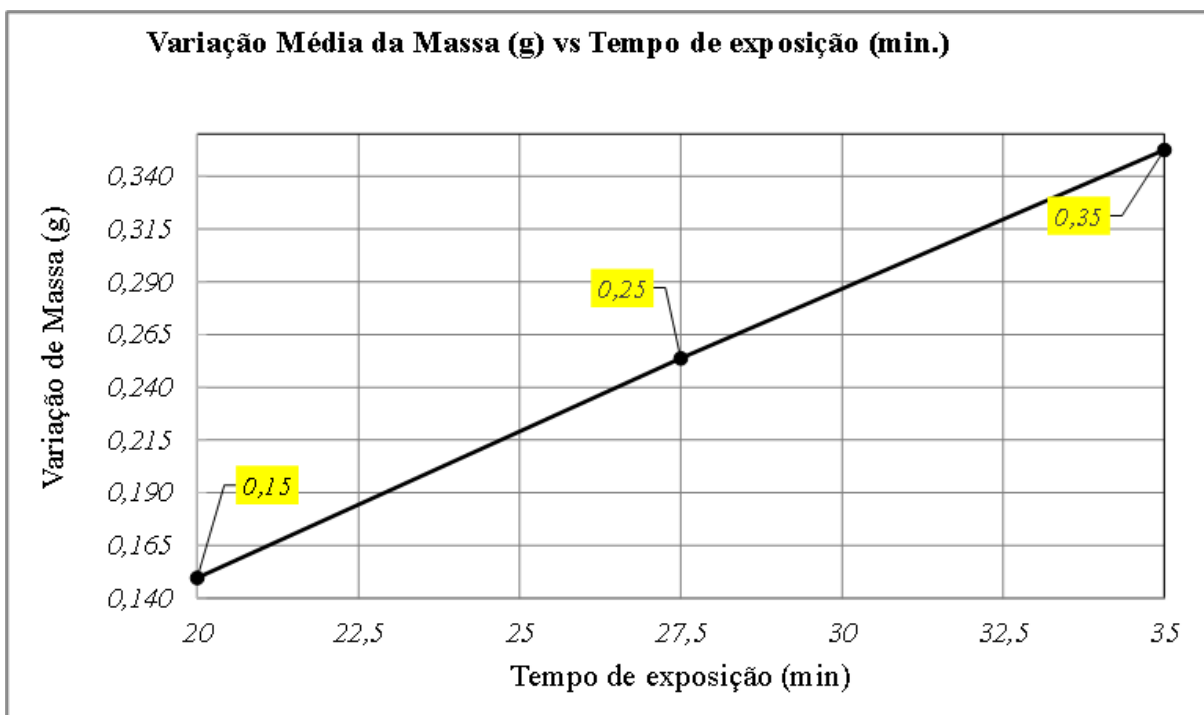
Fonte: do autor.

5.2 Variação da massa

Para a variação média da massa dos corpos de prova, são descritos nos Gráficos 5 e 6, respectivamente, variação média da massa em função do tempo em minutos e variação da quantidade de solvente (propanona em mililitro). As massas foram mensuradas na balança eletrônica de precisão e novamente se agruparam os corpos de prova por amostras e tipo de ensaio ($n=5$), calcularam-se as médias amostrais e, por fim, os corpos de prova foram separados em função dos parâmetros descritos.

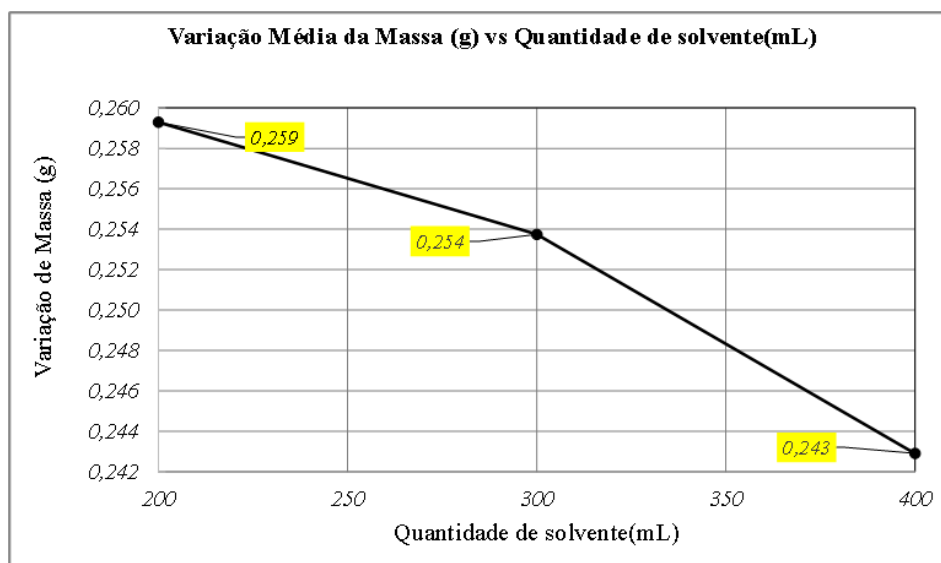
No Gráfico 5, o comportamento da média da variação da massa dos corpos de prova demonstra ter correlação positiva e crescente com o fator tempo de exposição. Já a quantidade de solvente (Gráfico 6) teve correlação negativa e decrescente. Assim, os dois parâmetros apresentaram relações inversas em relação às médias das massas, ou seja, interação inversa entre os dois fatores e a variável massa. Ainda, o efeito principal - tempo de exposição - teve ganho de 0,067 g a cada +5 minutos de tratamento.

Gráfico 5 – Efeito do tempo de exposição na média da massa dos corpos de prova



Fonte: do autor.

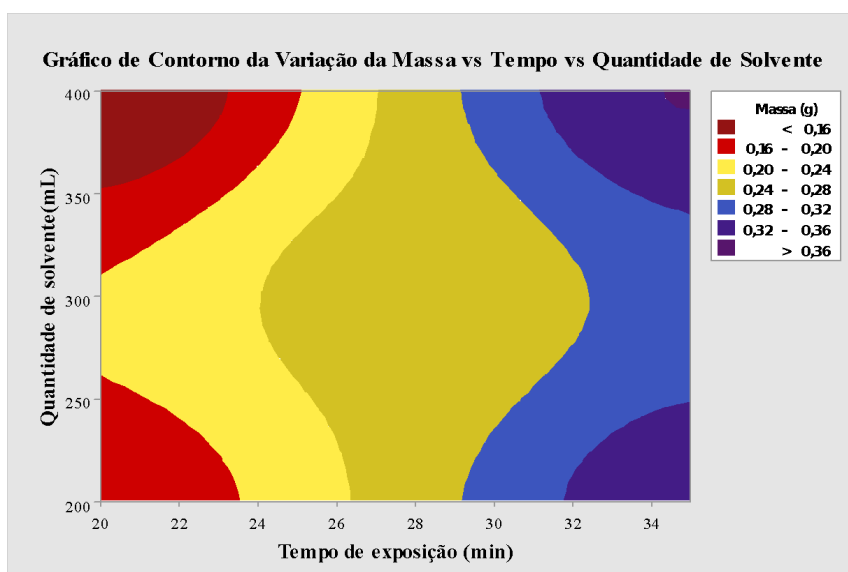
Gráfico 6 – Efeito da quantidade de solvente na média da massa dos corpos de prova



Fonte: do autor.

Ademais, o Gráfico 7 descreve a interação dual da quantidade de solvente e do tempo de exposição *versus* (vs) a massa dos 25 corpos de prova. Esse gráfico evidencia, novamente, que não há relação linear entre os parâmetros e as massas dos corpos de prova. Há uma região de valores mínimos, conforme já evidenciado nos Gráficos 5 e 6, próximos dos valores de tempo 20 minutos e quantidade de solvente 400 mL, com dezenas de combinações como valores intermediários.

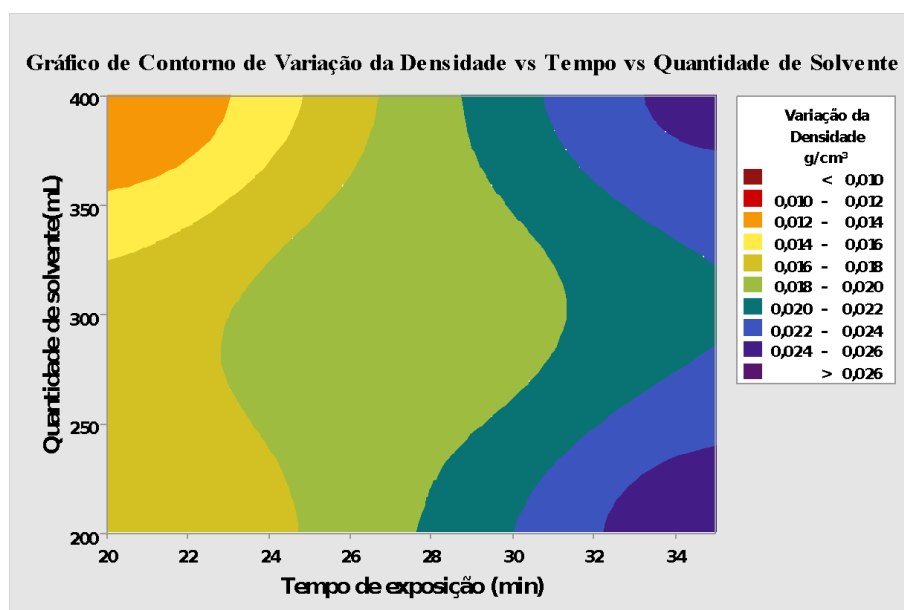
Gráfico 7 – Variação de massa em função do tempo e quantidade de solvente



Fonte: do autor

Por fim, para avaliar conjuntamente a variação das espessuras e das massas, foi desenvolvido o gráfico de contorno da variação da densidade (g/cm^3) das amostras *versus* os dois fatores estudados (Gráfico 8). Verifica-se nele a existência de uma região de valores mínimos próxima dos níveis de tempo 20 minutos e propanona de 400 mL. O aumento do tempo de exposição influencia em mais importância o acréscimo na variação da densidade.

Gráfico 8 – Variação de densidade em função do tempo e quantidade de solvente

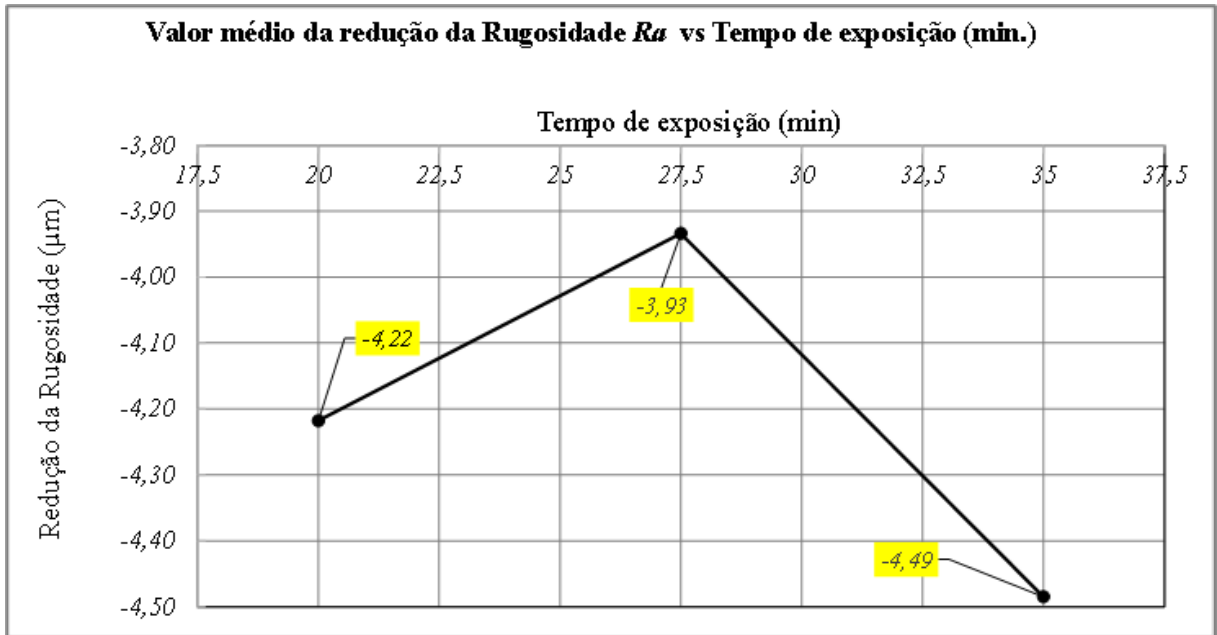


Fonte: do autor.

5.3 Variação da rugosidade superficial Ra

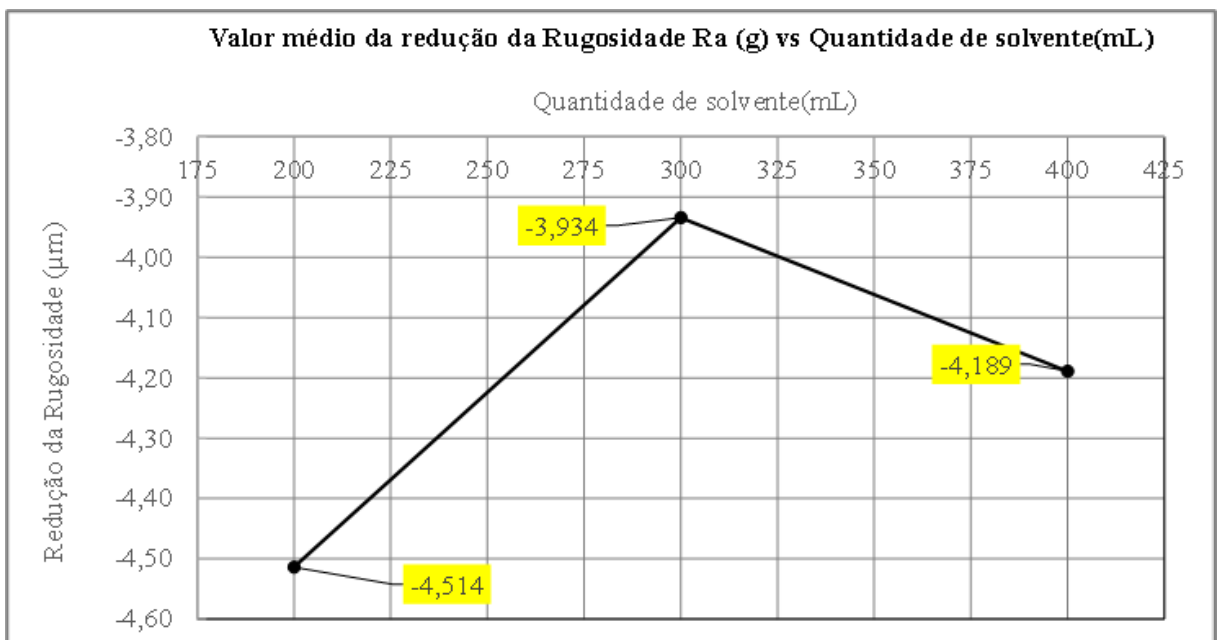
Primeiramente, os Gráficos 9 e 10 apresentam o valor da variação da redução do valor de rugosidade superficial, especificamente o índice Ra (μm), de cada tipo de ensaio *versus* os fatores tempo de exposição e quantidade de solvente, e as médias para cada tipo de ensaio com número total de observações de $n=5$ *versus* os fatores. Assim sendo, é possível visualizar no Gráfico 9 que, durante os testes na câmara, o valor médio da redução do parâmetro de rugosidade superficial Ra não possui variação constante, em função do tempo de exposição ao vapor de acetona. Comportamento similar é detectado em relação ao aumento do volume em mililitro da propanona em relação aos valores de redução da rugosidade Ra nas amostras (Gráfico 10).

Gráfico 9 – Efeito da quantidade de solvente na média da massa dos corpos de prova



Fonte: do autor.

Gráfico 10 – Efeito da quantidade de solvente na média da massa dos corpos de prova

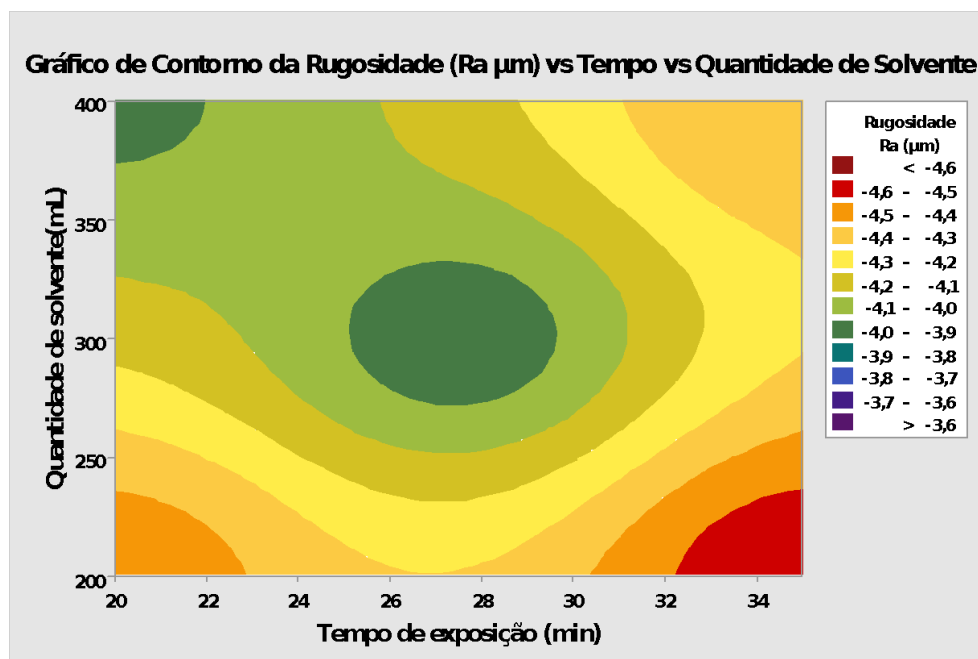


Fonte: do autor.

Já no Gráfico 11, por essa ordem, gráfico de contorno da rugosidade superficial e dos fatores tempo e volume de acetona, a combinação dos parâmetros gerou uma região de maior evidência na redução de valores Ra próxima do tempo de 35 minutos e 200 mL de

propanona e, ainda, uma região central e outra nos valores de 20 minutos e 400 mL de ganhos relativamente menores na qualidade do acabamento superficial das peças.

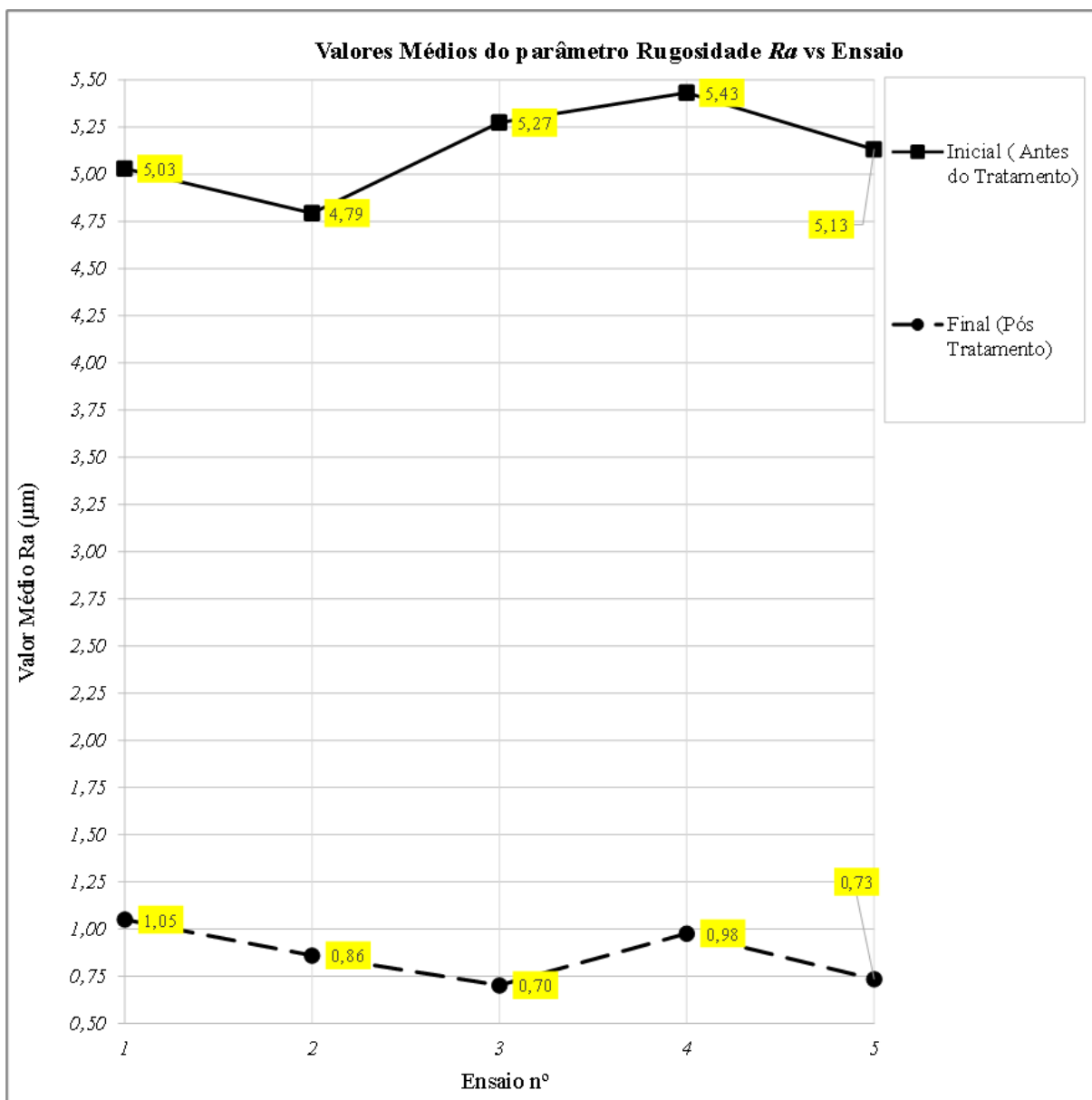
Gráfico 11 – Variação parâmetro de rugosidade Ra em função do tempo e quantidade de solvente



Fonte: do autor.

Para colaborar com as análises anteriores, o Gráfico 12 demonstra os resultados dos valores de rugosidade Ra (μm) por grupo de cinco amostras, nas condições inicial (antes do tratamento) e final (pós-tratamento), para cada tipo de ensaio do planejamento experimental fatorial (Tabela 5). No gráfico, antes do tratamento, o valor médio da rugosidade superficial, parâmetro Ra , possuía média geral de 5,13 μm . E no pós-tratamento com vapor de propanona, média geral de 0,86 μm , o que significa redução de aproximadamente 83,2% no valor médio de rugosidade Ra .

Gráfico 12 – Comparativo dos valores médios de rugosidade Ra antes e após tratamento vs grupo de ensaios



Fonte: do autor.

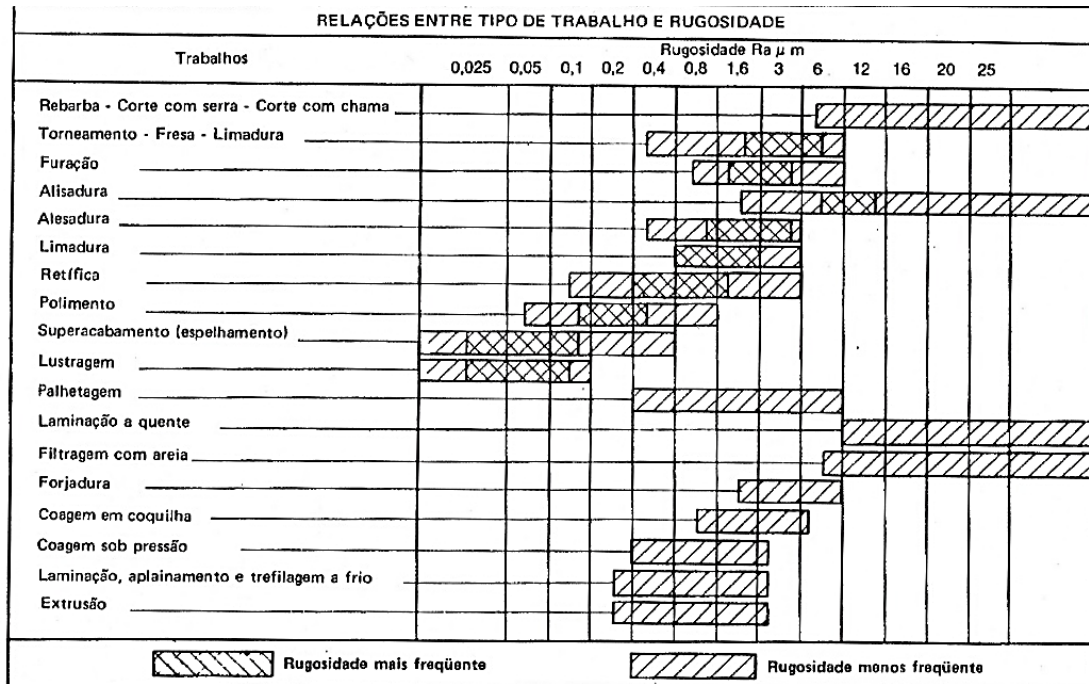
A Figura 48 exibe amostras antes e após o tratamento com vapor de acetona. Percebe-se, primeiramente, que há a geração de uma camada externa de aparência vítrea transparente ou reflexiva nas Figura 48b e 48d. A superfície está isenta de ranhuras superficiais visíveis, as quais são observadas nas Figuras 48a e 48c. Assim sendo, pode-se inferir que as texturas superficiais ou microirregularidades geométricas deixadas na superfície do material durante o processo de impressão 3D foram reduzidas pelo processo de tratamento superficial testado.

Figura 48 – Detalhes de corpos de prova antes e após tratamento superficial



Fonte: do autor.

Por fim, segundo Manfê, Pozza e Scarato (2004) e Silva, Ribeiro e Dias (2012), há uma relação conhecida e consolidada entre os processos de fabricação e os valores médios previstos para rugosidade superficial (Figura 49). Nesse caso específico, a média para o processo estudado é de $5,13 \mu\text{m}$ (Ra), o que em geral coloca o processo de impressão 3D compatível com processo de fabricação com qualidade de acabamento superficial inferior (ex.: corte por chama, serrar, limar, etc.). Entretanto, conforme apresentado na Tabela 9 e no Gráfico 12, as peças após o tratamento superficial com vapor de propanona, independentemente dos valores utilizados no ensaio, alcançaram valores médios de Ra de $0,86 \mu\text{m}$, os quais estão na mesma faixa de valores de usinagem com torneamento e fresamento. Os mesmos autores asseveram que há uma relação direta entre valores máximos de rugosidade e níveis de qualidades de trabalho/tolerância (NBR 6158) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS/ INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION, 1995). Pode-se, então, idealizar que, na faixa de $>18 \leq 180$, os produtos pós-tratamento obtiveram melhorias na estabilidade dimensional, passando do índice IT12 para até IT8 (Figura 50).

Figura 49 – Relação entre processo de fabricação e o parâmetro de rugosidade Ra 

Fonte: adaptada de Manfê, Pozza e Scarato (2004).

Figura 50 – Valores máximos da rugosidade Ra (μm) compatíveis com as qualidades de trabalho/tolerância da Norma ABNT/ISO (NBR 6158)

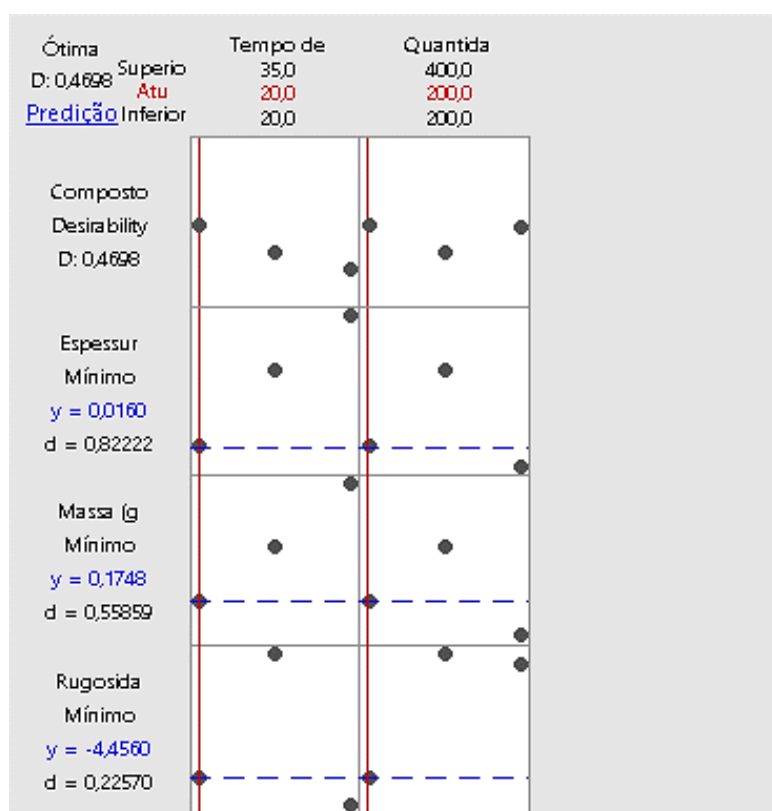
VALORES DE RUGOSIDADE MÁXIMA Ra COMPATÍVEIS COM AS TOLERÂNCIAS ISO (μm)										
Tolerâncias ISO	Grupos de dimensões (mm)									
	≤ 3		$> 3 \leq 18$		$> 18 \leq 80$		$> 8 \leq 250$		> 250	
	Tol.	Ra	Tol.	Ra	Tol.	Ra	Tol.	Ra	Tol.	Ra
IT 6	6	0,2	8 ÷ 11	0,3	13 ÷ 19	0,5	22 ÷ 29	0,8	32 ÷ 40	1,2
IT 7	10	0,3	12 ÷ 18	0,5	21 ÷ 30	0,8	35 ÷ 46	1,2	52 ÷ 63	2
IT 8	14	0,5	18 ÷ 27	0,8	33 ÷ 46	1,2	54 ÷ 72	2	81 ÷ 97	3
IT 9	25	0,8	30 ÷ 43	1,2	52 ÷ 74	2	87 ÷ 115	3	130 ÷ 155	5
IT 10	40	1,2	48 ÷ 70	2	84 ÷ 120	3	140 ÷ 185	5	210 ÷ 250	8
IT 11	60	2	75 ÷ 110	3	130 ÷ 190	5	220 ÷ 290	8	320 ÷ 400	12
IT 12	100	3	120 ÷ 180	5	210 ÷ 300	8	350 ÷ 460	12	520 ÷ 630	20
IT 13	140	5	180 ÷ 270	8	330 ÷ 460	12	540 ÷ 720	20	810 ÷ 970	—
IT 14	250	8	300 ÷ 430	12	520 ÷ 740	20	870 ÷ 1150	—	1300 ÷ 1550	—

Fonte: adaptada de Manfê, Pozza e Scarato (2004).

5.4 Avaliação conjunta das variações dos parâmetros

A avaliação conjunta das variações dos parâmetros consiste em manipular uma ferramenta computacional visando otimizar (maximizar ou minimizar) simultaneamente as três variáveis de resposta estudadas, respectivamente: espessura do corpo de prova, massa do corpo de prova e rugosidade superficial, parâmetro Ra . Neste estudo foi almejado minimizar a variação positiva de espessura e massa e a variação negativa da rugosidade estudada. A Figura 51 desenvolvida no *Minitab Statistical Software Version Education* informa o resultado da manipulação da ferramenta de otimização de resposta

Figura 51 – Otimização e cálculos da solução de otimização das três variáveis



Fonte: do autor.

Os valores dos parâmetros de fabricação ótimos são tempo de 20 minutos e quantidade de solvente em 200 mL, respectivamente, ensaio nº 4 (Tabela 5). Nessa situação ter-se-ia aumento médio de espessura na ordem de 0,016 mm, ganho médio de massa de 0,175 g e redução média de rugosidade Ra de 4,46 μm .

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Considerações Finais

Para a elaboração deste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia para analisar como os parâmetros do tratamento superficial via vapor de propanona (acetona) afetam a qualidade do produto. De forma geral, os resultados das etapas permitem concluir que os procedimentos e métodos empregados foram capazes de prover de forma adequada o tratamento superficial nos corpos de prova. E os métodos, equipamentos e *softwares* utilizados possibilitaram realizar as análises propostas, validando a metodologia desenvolvida para uso em trabalhos futuros. Ademais, em relação aos ensaios em si, pelos resultados encontrados infere-se que as alterações dos níveis dos parâmetros de tratamento nos níveis estudados não produzem impactos relevantes no acabamento superficial do produto.

De forma específica, quanto à variação dimensional de espessura, concluiu-se que o acréscimo do tempo de tratamento e/ou quantidade de acetona (até 300 mL) produziu acréscimos não desejados na dimensão linear da espessura na ordem aproximada de 0,24 mm a cada 10 mm. Este item se mostrou mais sensível à variação do tempo de exposição, sendo evidenciado que ele deveria estar entre 20 e 24 minutos. Tais variações devem ser cuidadosamente planejadas em componentes já que podem produzir problemas de encaixes, montagens e alinhamentos.

Já as variações da massa sofreram alterações positivas, com destaque para o ensaio nº 3 (tempo = 35 min; propanona = 200 mL), com média de +0,344 g. No geral, constatou-se ganho de 0,067g a cada +5 minutos de tratamento e novamente o parâmetro principal foi o tempo, com indicação de uso em valores inferiores a 25 minutos.

A variação positiva de espessura e massa suscitou avaliar, também, a variação de densidade, sendo que por essa apreciação ratificou-se que a densidade é mais sensível à variável tempo de tratamento. Também se certificou que houve crescente ganho de densidade, deduzindo-se que se deve a alterações na estrutura do ABS.

Em relação ao acabamento superficial, apurou-se que as variações dos valores de tempo e quantidade não demonstraram claramente tendência a comportamento para minimizar a rugosidade *Ra*. No geral, por essa análise, ratificou-se a potencialidade do tratamento via propanona para o aprimoramento do acabamento superficial da peça, alcançando aproximadamente 83,2% de melhorias médias. Mesmo assim, concluiu-se que alterações dos

valores utilizados nos ensaios não geram impactos consideráveis no acabamento superficial, que está 79,5 a 86,3% melhor, respectivamente, $Ra=1,05 \mu\text{m}$ e $Ra=0,73 \mu\text{m}$.

Ponderando sobre o processo de impressão 3D, foi demonstrado que, nesse caso específico, a média de rugosidade Ra antes do tratamento foi $5,13 \mu\text{m}$ e após $0,86 \mu\text{m}$. Apreendeu-se daí que houve migração de uma classe de rugosidade N9 para N7 (NBR 8404/1984) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1984), compatível com outros processos de fabricação de qualidade de acabamento superficial superior. Ao mesmo tempo, obteve-se que após tratamento é possível obter melhorias na estabilidade dimensional, mudando das qualidades de trabalho/tolerância IT12 para até IT8 (Norma ABNT/ISO - NBR 6158).

Avaliando o processo de tratamento superficial, verificaram-se mudanças de características do produto, em específico a geração de uma camada externa de aparência vítrea transparente ou reflexiva e o aumento aparente da flexibilidade. Recomenda-se análise das consequências dessas mudanças, conduzindo novos estudos sobre o tema.

Por fim, por meio da otimização simultânea das três variáveis de resposta estudadas, obteve-se que os parâmetros de tratamento superficial, em seus níveis mínimos testados, produzem o melhor resultado, respectivamente: tempo de 20 minutos e quantidade de solvente em 200 mL, produzindo aumento médio de espessura na ordem de $0,016 \text{ mm}$, ganho médio de massa de $0,175 \text{ g}$ e redução média de rugosidade Ra de $4,46 \mu\text{m}$ (81%).

6.2 Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi utilizado o paquímetro o qual possibilita uma menor precisão no momento de mensurar os corpos de prova e que o micrômetro seria um instrumento de medição mais indicado para melhor avaliação da variação dimensional.

No trabalho apresentado concluiu que houve uma variação de densidade nos objetos de teste e que, portanto, deve haver alguma alteração química no ABS, requisitando estudos mais aprofundados na química para análise do experimento.

Como apresentado ao longo do trabalho e por autores como Samykano, Villamil, Ramirez e Galina, cabe avaliar as alterações das propriedades mecânicas ocorridas nos corpos de prova após o tratamento superficial.

REFERÊNCIAS

- 3DFila. **Como dar acabamento nas peças de forma simples e barata**. 2017. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/como-dar-acabamento-nas-pecas/>>. Acesso em: 2 jul. 2019.
- 3DFila. **Filamento HIPS: o material de suporte solúvel fácil**. 2018a. Disponível em: <<https://3dfila.com.br/filamento-hips-o-material-de-suporte-soluvel-facil/>>. Acesso em: 2 jul. 2019.
- 3DFila. **O que é overhang?: imprimindo peças no ar**. 2018b. Disponível em: <<https://3dfila.com.br/o-que-e-overhang-imprimindo-pecas-no-ar/>>. Acesso em: 2 jul. 2019.
- 3EPD. **What is rapid tooling and what are its advantages?** 2016. Disponível em: <<http://www.3epd.com/what-is-rapid-tooling-and-what-are-its-advantages/>>. Acesso em: 20 maio 2019.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8404**: indicação do estado de superfície em Desenho Técnico. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- ABNT/ISO - **NBR 6158**. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS/ INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION. Norma Brasileira (NBR) 6185 (ABNT-1995): Sistema de tolerâncias e ajustes. 1995.
- ALBUQUERQUE, A.L. **Como dar acabamento em peças impressas em 3D**. 2018. Disponível em: <<https://fazmakerspace.com.br/como-dar-acabamento-em-pecas-impressas-em-3d/>>. Acesso em: 2 jul. 2019.
- ALCÁNTARA, V. De la impresión 3D a la manufactura aditiva. **Tecnología del Plástico**. 2015. Disponível em: <<http://www.plastico.com/temas/De-la-impresion-3D-a-la-manufactura-aditiva+108475>>. Acesso em: 20 maio 2019.
- ALIHEIDARI, N. *et al.* Interlayer adhesion and fracture resistance of polymers printed through melt extrusion additive manufacturing process. **Materials & Design**, v. 156, p. 351-361, 2018.
- ALVAREZ, K.L.; LAGOS, R.F.; AIZPUN, M. Influencia del porcentaje de relleno en la resistencia mecánica en impresión 3D, por medio del método de Modelado por Deposición Fundida (FDM). Ingeniare. **Revista Chilena de Ingeniería**, v. 24, n. espec., p. 17-24, 2016.
- ASHBY, M.; JOHNSON, K. **Materiais e design: a arte e ciência da seleção de materiais no projeto do produto**. Amsterdã: Elsevier, 2013.
- BENEDICTO, R.R.; OLIVEIRA, JEF.; SILVA, LR.O. **Desenvolvimento de um programa computacional educativo para o estabelecimento do acabamento superficial em componentes mecânicos**. 2011.

Bintara, Redyarsa Dharma, et al. "The Characteristic of Overhang Object to Material Usage on FDM 3D Printing Technology." *Journal of Mechanical Engineering Science and Technology (JMEST)* 3.1 (2019): 35-41.

CARDOSO, S. Conheça os tipos de impressão 3D e os seus benefícios. **3D Lab Soluções em Impressão 3D**. 25 set. 2018. Acesso em: 25 de maio 2021.

CARLIER, E. *et al.* Investigation of the parameters used in fused deposition modeling of poly (lactic acid) to optimize 3D printing sessions. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 565, p. 367-377, 2019.

CARPINETTI, L.C.R. *et al.* **Rugosidade superficial**: conceitos e princípios de medição. Depósito Institucional EESC, 1996.

CAMBRAIA, L.V. *et al.* Desenvolvimento de filamentos de PLA e óxido de grafeno para melhoria termomecânica de peças produzidos por impressão 3D. **Brazilian Journal of Development**, v. 6.9, p. 69623-69636, 2020.

Chaves, Léo Ramos. "O avanço da impressão 3D." (2020).

CHUA, C.K.; LEONG, K.F.; LIM, C.S. **Rapid prototyping**: principles and applications. 3. ed., Singapore: Manufacturing World Scientific Pub Co., 2010.

Coelho-Barros, Emílio Augusto, et al. "Métodos de estimação em regressão linear múltipla: aplicação a dados clínicos." *Revista Colombiana de Estadística* 31.1 (2008): 111-129.

CORDEIRO, M.J.E. **Análise e otimização dos parâmetros processuais e dos sistemas funcionais de uma impressora 3D, que se baseia na técnica deposição de plástico fundido (FDM)**. 2014. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de Lisboa, 2014.

Cordeiro, Emanuel Duarte, Marcio Braga Melo, and Sheyla Christine Fernandes. "Um Estudo sobre a Utilização da ANOVA de uma Via na Produção Científica na Área de Psicologia." *Revista Meta: Avaliação* 10.28 (2018): 139-153.

CUNICO, M.W.M. **Impressoras 3D: o novo meio produtivo**. Concep3D Pesquisas Científicas Ltda; Curitiba, 2014.

DURÁN, F.R.A.; CABRERA, F.M.; LEITE, W.O. Estudio del acabado superficial en piezas mecanizadas de materiales compuestos de matriz polimérica: definición de parámetros adimensionales. *In: XIII CONGRESO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA*, 2017, Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, v. 01. **Anais...**, 2017. v. 01.

FERREIRA, F.F. **Estudo e desenvolvimento de filamento de PET reciclado para impressoras 3D FDM**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – UFOP, 2020.

GALINA, D.M. *et al.* Caracterización de las propiedades mecánicas de los cuerpos de prueba ABS confeccionados con diferentes parámetros de extrusión vía impresión 3D. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, v. 17, n. 6, 2016. Disponível em: <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5726367>>. Acesso em: 25 maio. 2019.

GALINA, D.M. *et al.* Influência da espessura de camada de impressão 3D nas propriedades mecânicas de peças fabricadas com o copolímero abs. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, v. 19, n. 3, 2018.

GAUTAM, R., SRIDHAR, I.; FEIH, S. Printing and characterisation of Kagome lattice structures by fused deposition modelling. **Materials & Design**, v. 137, p. 266-275, 2018.

GIBSON, I.; ROSEN, D.W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing**. New York: Springer, 2010.

GORNI, A. A. Prototipagem rápida, a revolução 3D. Plástico Industrial, São Paulo, nov. 2013. Disponível em: <http://www.gorni.eng.br/Gorni_PI_Nov2013.pdf>.

HIGGS, B. **3D Print overhangs and how to deal with them**. 2018. Disponível em: <<https://medium.com/bravovictornovember/3d-print-overhangs-and-how-to-deal-with-them-9eed6a7bcb5d>>. Acesso em: 2 jul. 2019.

HUNT, E. *et al.* Polymer recycling codes for distributed manufacturing with 3-D printers. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 97, n. 24, 2015.

HWANG, S, *et al.* Thermo-mechanical characterization of metal/polymer composite filaments and printing parameter study for fused deposition modeling in the 3D printing process. **Journal of Electronic Materials**, v. 44.3, p. 771-777, 2015.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; ASTM – AMERICAN SOCIETY OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING AND MATERIALS. **ISO/ASTM 52900:2015(E)**: standard terminology for additive manufacturing – general principles – terminology. Genève: ISO; West Conshohocken: ASTM International, 2016.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4287-1** (2004). International Organization for Standardization: Surface roughness - terminology - Part 1: Surface and its parameters. International Organization for Standardization. Geneva.

KOCHAN, D.; CHUA, C.K. State-of-the-art and future trends in advanced rapid prototyping and manufacturing. **International Journal of Information Technology**, Singapore, v. 1, n. 2, p. 173-184, 1995.

LANA E CRUZ, I. A. **Otimização de parâmetros para prototipagem rápida por deposição de material fundido**. 2012. 115 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

LAUERS, J.S. **Avaliação da influência das variáveis altura da camada, padrão de preenchimento e pigmentação no processo de manufatura aditiva por fusão e deposição de material (FDM) utilizando poliácido láctico (PLA)**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia) – Repositório Institucional do Ministério da Educação, 2021.

LIMA, F.B.F. **Tratamento superficial de peças fabricadas por prototipagem rápida**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

LIU, F.W. **Rapid prototyping and engineering applications**: A toolbox for prototype development. [S.l.]: CRC Press, 2008.

LIU, W. *et al.* Improving mechanical performance of fused deposition modeling lattice structures by a snap-fitting method. **Materials & Design**, v. 181, p. 108065, 2019.

LIZARDO, B. *et al.* Utilização do método de Taguchi para estudo da influência dos parâmetros de fabricação nas propriedades mecânicas de peças em PLA obtidas por manufatura aditiva. *In*: IX CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, Fortaleza, p. 21-25. **Anais...**, ago. 2015.

MAIS POLÍMEROS. **Plástico ABS e suas principais características e aplicações**. 2018. Disponível em: <<http://www.maispolimeros.com.br/2018/09/24/plastico-abs-e-suas-principais-caracteristicas-e-aplicacoes/>>. Acesso em: jun. 2021.

MANFÈ, G.; POZZA, R.; SCARATO, G. **Desenho técnico mecânico**: curso completo para escolas técnicas, v. 2. São Paulo: Hemus, 2004.

MATTIETTO, R. A; MATTA, V. M. Utilização de um delineamento composto central rotacional para avaliação microbiológica de polpas de açaí pasteurizadas. XIX congresso brasileiro de engenharia química, Búzios, RJ. 2012.

MORRISON, R.; BOYD, R. **Química orgânica**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 13. ed., 1996.

PATREZE, C.M.; PALAIO, S.C.S.; ALMEIDA, M.V.L. Desenvolvimento de modelos impressos em 3D para o ensino de Ciências. **Revista ENCITEC**, v. 8.3, p. 70-82, 2018. Acesso em: out. 2020

PEREIRA, F.C. **Caracterização do comportamento em fadiga do plástico ABS produzido por extrusão e manufatura aditiva**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Aeroespacial) – Universidade de Brasília, 2019.

PEREIRA, K.F.R. Reconstrução digital de peças para aplicações industriais. 2011.

Pereira, Fabíola Manhas Verbi, and Edenir Rodrigues Pereira-Filho. "Aplicação de programa computacional livre em planejamento de experimentos: um tutorial." *Química Nova* 41 (2018): 1061-1071.

PÉREZ, M. *et al.* Surface quality enhancement of fused deposition modeling (FDM) printed samples based on the selection of critical printing parameters. **Materials**, v. 11.8, p. 1382, 2018.

POLAK, R.; SEDLÁČEK, F.; RAZ, K. Determination of FDM printer settings with regard to geometrical accuracy. *In*: 28th DAAAM INTERNATIONAL SYMPOSIUM. **Proceedings...**, 2017.

PROMETAL EPIS. **A diferença entre o capacete classe A e classe B.** Prometal EPIS, Pelotas/RS, 12 de julho de 2021. Disponível em: <https://www.prometalepis.com.br/blog/a-diferenca-entre-o-capacete-classe-a-e-classe-b/>. Acesso em: 14 de nov. 2021

RADU CRAHMALIUC. **Integrating CAE and CAD: The spectacular benefits of the cloud.** 2019 Disponível em: <https://www.simscale.com/blog/2015/12/cae-cad-integration-the-spectacular-benefits-of-the-cloud/>. Acesso em: 20 de maio 2019.

RAJA, V.; FERNANDES, K.J. **Reverse engineering: An industrial perspective.** Londres: Springer, 2008.

RAMIREZ, A.S. *et al.* Application of FDM technology to reduce aerodynamic drag. **Rapid Prototyping Journal**, 2019.

Rocha, Keslei Rosendo da, and Arilton Januário Bacelar Júnior. "ANOVA medidas repetidas e seus pressupostos: análise passo a passo de um experimento." *Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia-ISSN: 1984-5693* 10 (2018): 29.

SAMYKANO, M. *et al.* Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters." **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102.9-12, p. 2779-2796, 2019.

SIEMENS, INGENUITY FOR LIFE. **Desenhos CAD: aprenda as principais técnicas.** Siemens, Ingenuity for life. Munique/Alemanha. Disponível em: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/pt/topic/cad-drawings/10514>. Acesso em: 14 de nov. 2021.

SILVA, A.; RIBEIRO, C.T.; DIAS, J. **Desenho técnico moderno.** 4. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2012. 496 p.

SOUZA, D.V.D.; HUPPES, F.S. Projeto de protótipo de extrusora para produção de filamento de impressora 3D. **BS Thesis**, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

STRATASYS. **Experimente a fabricação rápida com moldes de injeção impressos em 3D.** 2013. Disponível em: <http://blog.stratasys.com/fr/2013/08/21/essayez-la-fabrication-rapide-avec-les-moules-a-injection-imprimes-en-3d/>. Acesso em: 15 maio 2019.

TRIBUNA. **Plástico ganha cada vez mais espaço nos carros novos.** 2014. Disponível em: <https://www.tribunapr.com.br/noticias/automoveis/plastico-ganha-cada-vez-mais-espaco-nos-carros-novos/>. Acesso em: 25 maio 2019.

VILLAMIL, M.L.G. Análise de parâmetros de impressão de corpos de provas usando modelagem por deposição de fundido (FDM). *In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, Ponta Grossa. **Anais...**, 30 nov.-02 dez. 2016.

VOLPATO, N (org). **Manufatura aditiva**: tecnologias e aplicações de impressão 3D. São Paulo: Blucher, 2017.

VOLPATO, N. (ed). **Prototipagem rápida**: tecnologias e aplicações. São Paulo: Blucher, 2007.

WORLD WILDLIFE FUND. **Plástico vale ouro**. [2016]. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/reducao_de_impactos2/programa_marinho/plastico_vale_ouro/>. Acesso em: 22 de maio 2019.

Zier, Abdiel Filipe, et al. "ESTUDO DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA POR MEIO DA IMPRESSÃO 3D E SEU EFEITO NA REDUÇÃO DE CUSTOS E PRAZOS DOS PROJETOS DE PRODUTO." Memorial TCC Caderno da Graduação 5.1 (2019): 301-318.