



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Thiago Gomes de Cerqueira

**Termoformagem à vácuo em moldes obtidos por manufatura aditiva pelo
processo de fabricação por filamento fundido (FFF): estudos de rugosidade e
dimensional**

Florianópolis
2023

Thiago Gomes de Cerqueira

Termoformagem à vácuo em moldes obtidos por manufatura aditiva pelo processo de fabricação por filamento fundido (FFF): estudos de rugosidade e dimensional

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Ahrens.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Cerqueira, Thiago Gomes de

Termoformagem à vácuo em moldes obtidos por manufatura aditiva pelo processo de fabricação por filamento fundido (FFF): estudos de rugosidade e dimensional / Thiago Gomes de Cerqueira ; orientador, Carlos Henrique Ahrens, 2023. 102 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Manufatura Aditiva. 3. Fabricação por Filamento Fundido. 4. Termoformagem à vácuo. 5. Rugosidade. I. Ahrens, Carlos Henrique. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Thiago Gomes de Cerqueira

Termoformagem à vácuo em moldes obtidos por manufatura aditiva pelo processo de fabricação por filamento fundido (FFF): estudos de rugosidade e dimensional

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 03 de Agosto de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Tiago L. F. da Costa Pinto, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Aurélio da Costa Sabino Netto, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Henrique Simas
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Dr. Carlos Henrique Ahrens
Orientador

Florianópolis, 2023.

Este trabalho é dedicado à minha família.

AGRADECIMENTOS

À Deus e Nossa Senhora por me abençoar.

Aos meus amados pais Marcos Jose e Maria Helena, minhas irmãs Luiza e Julia, meu querido sobrinho Davi e a minha noiva Hellen, pelo apoio incondicional durante todos esses anos, independente da distância entre nós.

Ao Prof. Dr. Carlos Henrique Ahrens, pela valiosa orientação, incentivo, apoio e confiança durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao amigo Eng. Carlos Eduardo Lustre (*in memoriam*) pela boa convivência durante as disciplinas do mestrado.

Aos amigos do Instituto Senai de Inovação em Sistema de Manufatura e Processamento a Laser, em específico Gustavo, Marcos e Vanessa, pelo apoio e colaboração na realização do trabalho.

Aos demais colegas e amigos que generosamente ofereceram apoio e incentivo a realização desse trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC e ao laboratório NIMMA, pela oportunidade e suporte oferecido para a realização do trabalho.

Obrigado a todos.

“A imaginação é mais importante que o conhecimento, porque o conhecimento é limitado, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro”.

- Albert Einstein

RESUMO

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, desperta interesse na indústria e na academia devido à sua eficiência na construção de objetos complexos, reduzindo o tempo e o desperdício de material. Entre os métodos amplamente utilizados, destaca-se a impressão por filamento fundido (FFF), que possui um potencial promissor na fabricação de moldes para termoformagem à vácuo. Entre os diversos trabalhos que procuram investigar os parâmetros de processo, a espessura de camada é apontada como um fator crucial para a melhoria do acabamento superficial do molde. Compreender esses parâmetros é essencial para aprimorar a qualidade dos produtos termoformados em moldes impressos por FFF. Nesse contexto, foram fabricados três moldes em ABS, utilizando diferentes espessuras de camada: 0,05 mm, 0,15 mm e 0,25 mm, enquanto os demais parâmetros foram fixados. Posteriormente, os moldes foram submetidos a dez ciclos de termoformagem à vácuo, utilizando chapas de PET com espessura de 0,6 mm. O objetivo foi investigar a influência da espessura de camada no acabamento superficial e dimensional dos moldes, além de avaliar a influência da rugosidade dos moldes nos produtos termoformados. Análises foram realizadas nos moldes antes e após os dez ciclos de termoformagem. As análises dos produtos termoformados foram conduzidas nos produtos derivados do primeiro ciclo e décimo ciclo. Para avaliar o acabamento superficial, utilizou-se um rugosímetro, e para as análises dimensionais, empregou-se uma máquina de medição por coordenadas. Os resultados obtidos revelaram que, considerando o desvio padrão, tanto os moldes quanto os produtos termoformados não apresentaram diferenças significativas entre as medições, indicando que o molde suportou os dez ciclos de termoformagem sem deformações. Além disso, observou-se que os produtos termoformados nos moldes com espessura de camada de 0,05 mm apresentaram um acabamento superficial melhor em comparação com os outros moldes, porém, o tempo de impressão do molde é muito superior, quando comparado com os demais. Para a geometria definida neste trabalho, no entanto, ao comparar os produtos termoformados produzidos com moldes de espessuras de camada de 0,15 mm e 0,25 mm, observou-se uma diferença mínima tanto no acabamento superficial quanto no tempo de impressão. Diferente do que é relatado nos trabalhos de pesquisa até o momento, os resultados evidenciaram que é possível obter menores valores de rugosidade R_a e R_t nos moldes fabricados por FFF com espessuras de camada inferiores a 0,2 mm, possibilitando que sejam alcançados valores de R_a nos produtos termoformados típicos dos obtidos para superfícies metálicas resultantes de processos de usinagem.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; Fabricação por Filamento Fundido; Molde; Termoformagem à Vácuo; Produto Termoformado.

ABSTRACT

Additive manufacturing, also known as 3D printing, sparks interest in both the industry and academia due to its efficiency in constructing complex objects, reducing time and material waste. Among the widely used methods, fused filament fabrication (FFF) stands out, showing promising potential in manufacturing molds for vacuum thermoforming. Among the various studies investigating process parameters, layer thickness is considered a crucial factor for improving the surface finish of the mold. Understanding these parameters is essential to enhance the quality of thermoformed products using FFF-printed molds. In this context, three ABS molds were fabricated using different layer thicknesses: 0.05 mm, 0.15 mm, and 0.25 mm, while the remaining parameters were kept constant. Subsequently, the molds were subjected to ten cycles of vacuum thermoforming using 0.6 mm thick PET sheets. The objective was to investigate the influence of layer thickness on the surface finish and dimensional accuracy of the molds, as well as to evaluate the influence of mold roughness on thermoformed products. Analyses were conducted on the molds before and after the ten thermoforming cycles, while the thermoformed products were analyzed after the first and tenth cycles. A surface roughness meter was used to evaluate the surface finish, and a coordinate measuring machine was employed for dimensional analyses. The obtained results revealed that, considering the standard deviation, both the molds and the thermoformed products showed no significant differences between the measurements, indicating that the mold withstood the ten thermoforming cycles without deformation. Furthermore, it was observed that thermoformed products from molds with a layer thickness of 0.05 mm exhibited better surface finish compared to the other molds, although the mold printing time was significantly longer compared to the others. For the geometry defined in this study, however, when comparing thermoformed products produced with molds of layer thicknesses 0.15 mm and 0.25 mm, minimal differences were observed in both surface finish and printing time. Unlike what has been reported in previous research, the results demonstrated that it is possible to achieve lower Ra and Rt roughness values in molds manufactured by FFF with layer thicknesses below 0.2 mm, allowing for Ra values in thermoformed products typical of those obtained for metallic surfaces resulting from machining processes.

Keywords: Additive Manufacturing; Fused Filament Fabrication; Mold; Vacuum Thermoforming; Thermoformed Product.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do molde macho (positivo) e molde fêmea (negativo).....	24
Figura 2 – Termoformagem em moldes macho (positivo) (a) e fêmea (negativo) (b)....	25
Figura 3 – Ângulos de extração indicados para moldes positivos (a) e negativos (b)	26
Figura 4 – Representação do perfil de superfície.....	28
Figura 5 – Representação dos perfis primário, ondulação e rugosidade	28
Figura 6 – Critérios para avaliação de rugosidade	29
Figura 7 – Altura máxima dos picos do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade)	29
Figura 8 – Profundidade máxima do vale do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade)	30
Figura 9 – Altura máxima do perfil de rugosidade (exemplo de um perfil de rugosidade)	30
Figura 10 – Altura dos elementos do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade)....	31
Figura 11 – Largura dos elementos do perfil.....	32
Figura 12 – Representação das principais etapas do processo de manufatura aditiva	34
Figura 13 – Princípio do processo FFF utilizando a máquina da Stratasys Ltd.....	34
Figura 14 – Impressora Cartesiana 3D Ender 3 (a), Impressora Delta 3D Silhouette Alta Plus (b) e Impressora Core XY 3D Ender 5 PRO (c)	35
Figura 15 – Impressora Prusa i3, cartesiana e de estrutura aberta (a) e Impressora Ultimaker S5, cartesiana e de estrutura fechada (b)	35
Figura 16 – Representação da espessura de camada, largura do filamento depositado e <i>overlap</i> no processo FFF	37
Figura 17 – Diferença entre regiões de contato para três níveis de <i>overlap</i>	37
Figura 18 – Diferentes regiões de contato entre duas camadas sobrepostas para diferentes espessuras de camada.....	38
Figura 19 – Padrões de preenchimento disponibilizados no <i>software</i> Simplify3D	38
Figura 20 – Diferentes porcentagens de preenchimento disponibilizados no <i>software</i> Simplify3D	39

Figura 21 – Valores médios de Ra em função dos parâmetros de fabricação investigados por Biglete <i>et al.</i> (2020)	41
Figura 22 – Valor de Rt em função dos parâmetros de fabricação investigados por Biglete <i>et al.</i> (2020)	42
Figura 23 – Molde impresso por FFF (a) e produto termoformado (b), apresentado por Boca <i>et al.</i> (2021)	42
Figura 24 – Moldes fabricados pelo processo FFF com diferentes materiais estudados por Parada; Mayuet; Gámez, (2019).....	44
Figura 25 – Produtos termoformados utilizando material PET em moldes de (a) ABS; (b) Nylstrong; (c) PLA; (d) POM; (e) Shogun estudados por Parada; Mayuet; Gámez, (2019).....	44
Figura 26 – Rugosidade média aritmética (Ra) do molde para cada tipo de material, estudados por Parada; Mayuet; Gámez, (2019).....	45
Figura 27 – Diagrama de correlação entre o Ra do molde e o produto termoformado de acordo com os materiais estudados por Parada; Mayuet; Gámez, (2019).....	45
Figura 28 – Fluxograma geral das fases do trabalho	47
Figura 29 – Geometria e as dimensões gerais do molde	48
Figura 30 – Impressora cartesiana Sethi3D S3	49
Figura 31 – Máquina termoformadora MTF800.....	51
Figura 32 – Sistema de termoformagem da máquina MTF800	52
Figura 33 – Produtos termoformados resultantes do sétimo ciclo de moldagem nos moldes fabricados com as três diferentes espessuras de camada	53
Figura 34 – Microscópio confocal Olympus (OLS4000)	54
Figura 35 – Máquina de medição por coordenadas Mitutoyo Strato Apex 9166	55
Figura 36 – Ilustração do método adotado para medição no diâmetro do topo dos moldes e produtos termoformados.....	56
Figura 37 – Ilustração da fixação dos moldes (a) e dos produtos termoformados (b) para análise dimensional.....	56
Figura 38 – Rugosímetro Taylor Hobson Form Talysurf 60	57
Figura 39 – Suporte utilizado para apoio dos moldes (a) e sistema de medição (apalpador) posicionado em relação a superfície lateral do molde durante as medições de rugosidade lateral (b)	58
Figura 40 – Ilustração da fixação e posicionamento dos produtos termoformados em relação ao apalpador para medição de rugosidade na superfície lateral	59

Figura 41 – Ilustração da fixação e posicionamento dos produtos termoformados em relação ao apalpador para medição de rugosidade na superfície do topo	59
Figura 42 – Vista lateral e vista superior dos moldes fabricados para as três espessuras de camadas empregadas.....	60
Figura 43 – Imagens obtidas no microscópio confocal das superfícies laterais e dos topos dos moldes fabricados por FFF em suas respectivas espessuras de camada 0,05 mm, 0,15 mm e 0,25 mm.....	62
Figura 44 – Dimensões nominais avaliadas no molde	63
Figura 45 – Dimensões teóricas do produto termoformado	65
Figura 46 – Valores de Ra medidos na superfície lateral dos moldes antes e depois dos ciclos de termoformagem à vácuo.....	68
Figura 47 – Valores de Rt medidos na superfície lateral dos moldes antes e depois dos ciclos de termoformagem à vácuo.....	69
Figura 48 – Valores de Ra medidos na superfície do topo dos moldes antes e após os ciclos de termoformagem à vácuo.....	70
Figura 49 – Valores de Rt medidos na superfície do topo dos moldes antes e após os ciclos de termoformagem à vácuo.....	70
Figura 50 – Valores de Ra medidos na superfície lateral dos produtos termoformados do primeiro ciclo e décimo ciclo.....	72
Figura 51 – Valores de Rt medidos na superfície lateral dos produtos termoformados do primeiro ciclo e décimo ciclo.....	72
Figura 52 – Valores de Ra medidos na superfície do topo dos produtos termoformados do primeiro ciclo e décimo ciclo.....	74
Figura 53 – Valores de Rt medidos na superfície do topo dos produtos termoformados do primeiro ciclo e décimo ciclo.....	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais variáveis do processo FFF.....	36
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comprimento de amostragem recomendado para o parâmetro RSm (perfis periódicos).....	33
Tabela 2 – Parâmetros investigados no trabalho de Biglete <i>et al.</i> (2020)	41
Tabela 3 – Especificações do ABS Premium fornecida pelo fabricante 3D Fila.....	49
Tabela 4 – Parâmetros de operação fixados.....	50
Tabela 5 – Parâmetros da máquina fixados.....	50
Tabela 6 – Estimativa do tempo de impressão dos moldes por FFF.....	51
Tabela 7 – Análise dimensional dos moldes antes da termoformagem à vácuo.....	64
Tabela 8 – Análise dimensional dos moldes após dez ciclos de termoformagem à vácuo.....	64
Tabela 9 – Análise dimensional dos produtos termoformados (primeiro ciclo).....	66
Tabela 10 – Análise dimensional dos produtos termoformados (décimo ciclo).....	66
Tabela 11 – Diferença entre os valores médios medidos nos produtos termoformados do primeiro ciclo e os valores médios medidos nos moldes antes da termoformagem à vácuo	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MA	Manufatura Aditiva
FFF	Fabricação por Filamento Fundido
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
3D	Tridimensional
STL	<i>Stereolithography</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
NIMMA	Núcleo de Inovação em Moldagem e Manufatura Aditiva
POSMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UFPR	Universidade Federal do Paraná
LAMSE	Laboratório de Manufatura Aditiva e Engenharia de Superfícies
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
PMMA	Polimetilmetacrilato
PET	Politereftalato de Etileno
PETG	Poliétileno de Tereftalato Glicol
PS	Poliestireno
PC	Policarbonato
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de Vinila
l_v	Comprimento para atingir a velocidade do apalpador
l_e	Comprimento de amostragem (individual)
l_n	Comprimento da parada do apalpador
l_m	Comprimento total de avaliação
l_t	Comprimento total de medição
R_p	Altura máxima do pico do perfil
R_v	Profundidade máxima do vale do perfil
R_z	Altura máxima do perfil
R_c	Altura média dos elementos do perfil
R_t	Altura total do perfil
R_a	Desvio aritmético médio do perfil avaliado

Rq	Desvio médio quadrático do perfil avaliado
Rsk	Fator de assimetria do perfil avaliado
Rku	Fator de achatamento do perfil avaliado
RSm	Largura média dos elementos do perfil

LISTA DE SÍMBOLOS

μm	Micrometros
mm	Milímetros
°	Graus
%	Porcentagem
°C	Graus <i>Celsius</i>
mm/s	Milímetros por segundo
\emptyset	Diâmetro
\emptyset_T	Diâmetro do topo
\emptyset_B	Diâmetro da base
mm ³	Milímetros cúbicos
h	Horas
min	Minutos
±	Desvio Padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	OBJETIVOS	23
2.1	OBJETIVO GERAL	23
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
3	REVISÃO DA LITERATURA	24
3.1	TERMOFORMAGEM À VÁCUO	24
3.1.1	Considerações gerais	24
3.1.2	Materiais tipicamente empregados em moldes para termoformagem à vácuo	27
3.1.3	Qualidade da superfície de moldes para termoformagem à vácuo	27
3.2	MANUFATURA ADITIVA POR FFF	33
3.2.1	Considerações gerais	33
3.2.2	Principais parâmetros de processo da manufatura aditiva por FFF	35
3.2.3	Principais materiais para o processo FFF	39
3.2.4	Fabricação de moldes para termoformagem à vácuo por FFF	40
4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	47
4.1	PRIMEIRA FASE – PROJETO E FABRICAÇÃO DOS MOLDES POR FFF	47
4.2	SEGUNDA FASE – TERMOFORMAGEM À VÁCUO NOS MOLDES FABRICADOS POR FFF.....	51
4.3	TERCEIRA FASE – CARACTERIZAÇÕES DOS MOLDES E PRODUTOS TERMOFORMADOS.....	54
4.3.1	Avaliação qualitativa das superfícies do molde	54
4.3.2	Análise dimensional	54
4.3.3	Ensaio de rugosidade	57
5	RESULTADOS	60
5.1	AVALIAÇÃO QUALITATIVA DOS MOLDES FABRICADOS POR FFF	60
5.2	ANÁLISE DIMENSIONAL DOS MOLDES ANTES E APÓS DEZ CICLOS DE TERMOFORMAGEM À VÁCUO	63
5.3	ANÁLISE DIMENSIONAL DOS PRODUTOS TERMOFORMADOS.....	65
5.4	ENSAIO DE RUGOSIDADE NOS MOLDES FABRICADOS POR FFF	67
5.5	ENSAIO DE RUGOSIDADE NOS PRODUTOS TERMOFORMADOS.....	71

6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
6.1	CONCLUSÕES	76
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
	APÊNDICE A – RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE NA SUPERFÍCIE LATERAL DOS MOLDES ANTES E APÓS DEZ CICLOS DE TERMOFORMAGEM.....	83
	APÊNDICE B – RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE NA SUPERFÍCIE DO TOPO DOS MOLDES ANTES E APÓS DEZ CICLOS DE TERMOFORMAGEM.....	85
	APÊNDICE C – EXEMPLO DO PERFIL DE RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE LATERAL E SUPERFÍCIE DO TOPO DOS MOLDES (ANTES DA TERMOFORMAGEM), EXTRAÍDO DO SOFTWARE TALYPROFILE SILVER 8.2, PARA CADA ESPESSURA DE CAMADA ..	87
	APÊNDICE D – RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE NA SUPERFÍCIE LATERAL DOS PRODUTOS TERMOFORMADOS DO PRIMEIRO E DÉCIMO CICLO DE TERMOFORMAGEM	93
	APÊNDICE E – RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE NA SUPERFÍCIE DO TOPO DOS PRODUTOS TERMOFORMADOS DO PRIMEIRO E DÉCIMO CICLO DE TERMOFORMAGEM	95
	APÊNDICE F – EXEMPLO DO PERFIL DE RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE LATERAL E SUPERFÍCIE DO TOPO DOS PRODUTOS TERMOFORMADOS (PRIMEIRO CICLO), EXTRAÍDO DO SOFTWARE TALYPROFILE SILVER 8.2, PARA CADA ESPESSURA DE CAMADA ..	97

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de manufatura aditiva (MA) tem despertado interesse tanto da indústria quanto da comunidade acadêmica para o desenvolvimento de pesquisas. O processo de impressão tridimensional (3D) possibilita construir geometrias complexas mediante adição sucessiva de camadas a partir de um projeto modelado em um sistema CAD. Ao utilizar da MA para fabricação, conforme a complexidade da peça a ser fabricada, é possível reduzir o tempo necessário de dias para apenas algumas horas, o que resulta na minimização tanto do tempo gasto quanto do desperdício de material, quando comparado a manufatura convencional ou subtrativa. Dizon *et al.*, (2018) destacam a aplicação da manufatura aditiva em produtos para os setores de vestuário, construção, odontologia, medicina, eletrônica, automotivo, robôs, oceanografia, aeroespacial e outros.

Entre os diferentes tipos de processos, o método de fabricação por filamento fundido (FFF) é um dos mais empregados, em função de seu baixo custo de fabricação, diversidade de equipamentos disponíveis e possibilidades de aplicações. Através das diversas aplicações que vem sendo empregadas ou investigadas no contexto da manufatura aditiva por FFF, Nkomo *et al.*, (2017) apresentaram seu potencial para o segmento de moldes para o processo de termoformagem à vácuo. O molde exerce duas funções principais: definir a qualidade da superfície do produto termoformado e assegurar a adequada troca de calor com o produto visando resfriá-lo após sua conformação. Portanto, o acabamento do produto termoformado é influenciado diretamente pela qualidade do molde fabricado (PARADA; MAYUET; GÁMEZ, 2019).

Uma desvantagem da manufatura aditiva por FFF apontada por Nkomo *et al.*, (2017) quando aplicada no contexto de moldes para termoformagem, diz respeito a qualidade do acabamento. Segundo os autores, os moldes apresentam valores de rugosidade dependentes dos parâmetros de fabricação empregados e, muitas vezes, em valores muito elevados, podendo acarretar em imperfeições no produto termoformado. De acordo com Singh *et al.*, (2017), entre os diferentes parâmetros de operação, a espessura de camada é o parâmetro que exerce a maior influência sobre a rugosidade das peças fabricadas por FFF.

Nesse contexto, compreender a influência do parâmetro espessura de camada no dimensional e no acabamento dos produtos termoformados em moldes

fabricados por FFF é um importante tema de investigação, visto com grande potencial a ser explorado.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Com base no exposto, este trabalho tem como objetivo geral avaliar o acabamento superficial e as dimensões de moldes fabricados por manufatura aditiva pelo processo FFF e de produtos neles termoformados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o trabalho, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- I. Avaliar a qualidade das superfícies dos moldes fabricados por FFF, com diferentes valores de espessura de camada;
- II. Investigar a influência da espessura de camada na rugosidade e nas dimensões dos moldes fabricados por FFF;
- III. Avaliar a influência da rugosidade dos moldes fabricados por FFF na rugosidade dos produtos neles termoformados.

3 REVISÃO DA LITERATURA

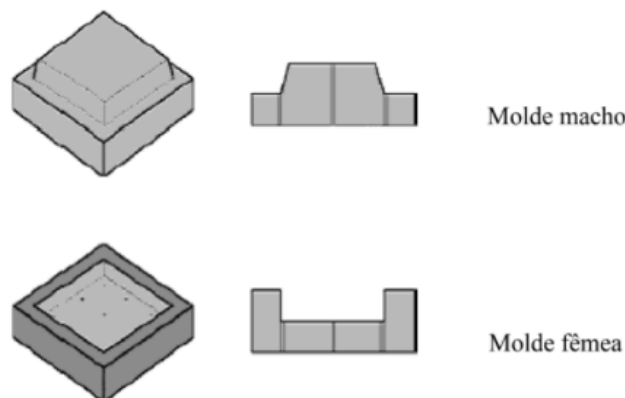
A presente seção apresenta uma revisão da literatura de estudos focados na fabricação dos moldes, termoformagem à vácuo e nos parâmetros que influenciam diretamente a rugosidade dos moldes impressos por manufatura aditiva por FFF.

3.1 TERMOFORMAGEM À VÁCUO

3.1.1 Considerações gerais

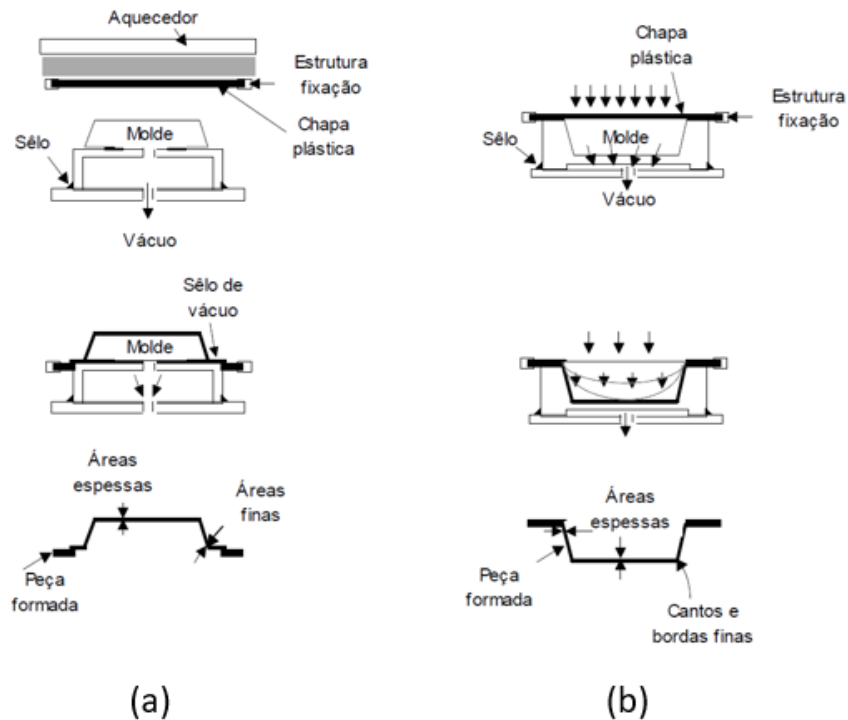
O conceito da termoformagem à vácuo data do século 19 e foi empregado no ambiente industrial pela primeira vez na década de 1950 (LOVE; VALENZA, 2011). Este processo utiliza uma chapa (folha ou lâmina) de algum material polimérico que é aquecida e posteriormente pressionada contra um molde para assim moldar o formato da peça desejada. De acordo com Throne (1999), no processo de termoformagem à vácuo é utilizado uma pressão negativa de sucção para modelar a chapa. Conforme descreveu Malpaga (2012) e ilustrado na Figura 1, os moldes podem ser classificados em dois principais tipos: molde macho (também designado de positivo) e o molde fêmea (também designado de negativo). A Figura 2 ilustra o processo de termoformagem à vácuo para o molde macho e molde fêmea. Durante o processo, para o molde macho, a chapa aquecida é moldada contra suas paredes, já no molde fêmea, a chapa é moldada contra as paredes das cavidades do molde.

Figura 1 – Representação do molde macho (positivo) e molde fêmea (negativo)



Fonte: Malpaga (2012).

Figura 2 – Termoformagem em moldes macho (positivo) (a) e fêmea (negativo) (b)



Fonte: Adaptado de Belofsky (1995).

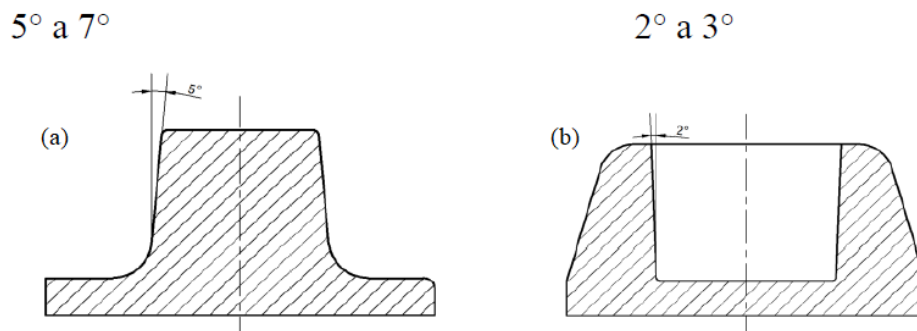
No processo de termoformagem a temperatura exerce papel fundamental para o adequado processamento do polímero. De acordo com Silva (2013), pode ocorrer variações das propriedades do material em decorrência das variações de temperaturas do polímero durante o processo de resfriamento. Com isso, o controle da variação da temperatura do material em todas as fases do processo de termoformagem à vácuo é essencial para se obter resultados almejados.

De acordo com Klein (2009), moldes para termoformagem à vácuo necessitam que sejam fabricados orifícios (furos) em suas superfícies para que o ar seja evacuado rapidamente e a chapa aquecida entre em contato com o molde o mais rápido possível. De acordo com Throne (2008), em moldes positivos, a localização dos furos deve ser em superfícies horizontais planas e ao longo de cantos tridimensionais, enquanto que nos moldes negativos, os furos devem ser localizados nas quinas do molde. Esses furos devem ter diâmetro entre 0,08 mm e 1,0 mm para chapas finas e entre 0,5 mm e 2,0 mm para chapas grossas (Muralisrinivasan, 2010).

A maioria dos moldes são fabricados com ângulo de extração para facilitar a remoção da chapa termoformada. Para os moldes negativos, a angulação

recomendada é de 2° a 3° e para os moldes positivos a angulação recomendada é de 5° a 7° , como mostrado na Figura 3. Além de facilitar a desmoldagem, os ângulos de extração contribuem para que a peça termoformada tenha uma boa qualidade da superfície e assegure uma maior uniformidade da altura da chapa termoformada (Júnior, 2015).

Figura 3 – Ângulos de extração indicados para moldes positivos (a) e negativos (b)



Fonte: Júnior (2015).

Para o processo de termoformagem à vácuo são indicados polímeros termoplásticos, que, ao serem aquecidos para realizar a moldagem, apresentem elevada viscosidade (SERTA; ROCHA, 2012). Segundo Hartman (2014) alguns dos termoplásticos mais empregados no processo de termoformagem são:

- Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS);
- Polimetilmetacrilato (PMMA);
- Politereftalato de Etileno (PET);
- Polietileno de Tereftalato Glicol (PETG);
- Poliestireno (PS);
- Policarbonato (PC);
- Polipropileno (PP);
- Policloreto de Vinila (PVC).

De acordo com Belofsky (1995), cada termoplástico possui condições específicas de moldagem devendo, no entanto, possuir uma boa resistência à deformação ao calor, pois o material da chapa a ser termoformada irá sofrer alongamento e ter variação em sua espessura.

3.1.2 Materiais tipicamente empregados em moldes para termoformagem à vácuo

Diferentes materiais podem ser utilizados na fabricação de moldes para o processo de termoformagem à vácuo, tais como: gesso, madeira, resinas poliméricas com ou sem fibras de vidro e metais, onde se destacam ligas de alumínio. Esses diferentes tipos de materiais podem ser empregados na termoformagem à vácuo, uma vez que neste processo são utilizadas pressões e temperaturas de moldagem relativamente baixas (Gruenwald, 2018).

Throne (2011) classificou de forma geral os moldes de termoformagem à vácuo em duas categorias gerais: moldes protótipos e moldes para produção. Nos moldes protótipos são empregados os materiais com baixa resistência ao calor, sendo utilizados para produção de dezenas ou até centenas de produtos. Nos moldes para produção são empregados os materiais com alta resistência ao calor, utilizados em processos que requerem elevada produção de peças.

De acordo com Nkomo *et al.*, (2017), através do processo FFF é possível fabricar moldes para termoformagem com geometrias personalizadas de forma rápida e econômica. Segundo os autores, os moldes fabricados pelo processo FFF utilizando somente materiais poliméricos são indicados para produção em menor volume, podendo ser uma alternativa vantajosa para a produção de moldes protótipos.

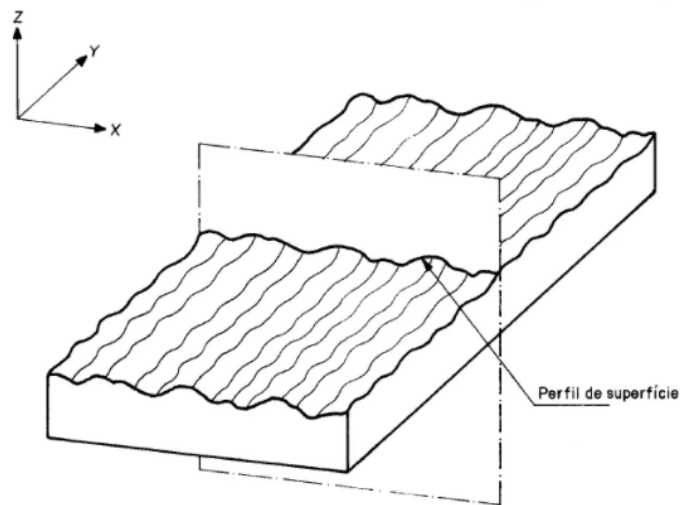
3.1.3 Qualidade da superfície de moldes para termoformagem à vácuo

Um aspecto importante na fabricação de moldes para termoformagem diz respeito a qualidade da sua superfície moldante. Esta deve ter uma menor rugosidade possível, haja visto que é esta que irá impor à peça moldada a qualidade da sua superfície.

Para avaliar a qualidade da superfície é usual que seja adotada a norma ISO 4287:2002. A norma estabelece termos, definições e parâmetros para determinação do estado da superfície (rugosidade, ondulação e perfil primário) pelo método de levantamento de perfil, que consiste em medições específicas dos perfis de uma superfície em um comprimento total de avaliação, também designado por cinco comprimentos de amostragem (*cut-off*). O perfil de superfície, é definido como sendo

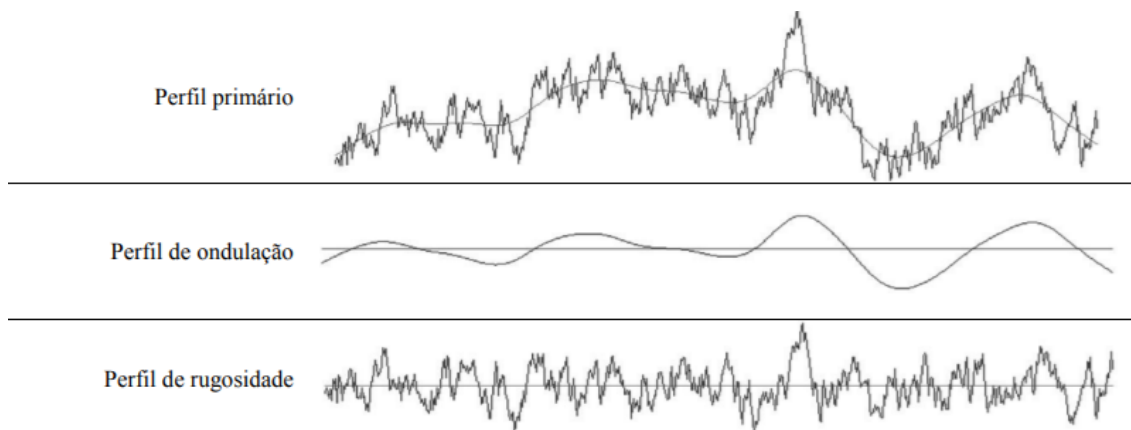
o perfil resultante da interseção da superfície real e um plano específico, como indicado na Figura 4. Nota-se que em prática é usual escolher um plano onde a normal é teoricamente paralela à superfície real e em uma direção apropriada. A norma estabelece em sua terminologia que o estado da superfície é obtido mediante o levantamento de três perfis designados como sendo os perfis primário, de ondulação e de rugosidade (Figura 5).

Figura 4 – Representação do perfil de superfície



Fonte: Norma ISO 4287:2002.

Figura 5 – Representação dos perfis primário, ondulação e rugosidade

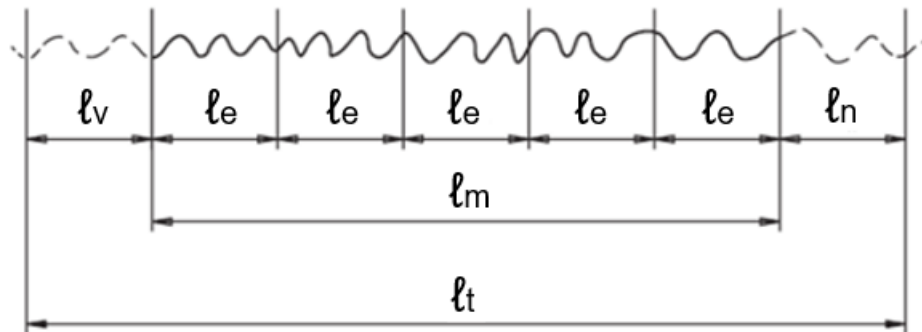


Fonte: Beckert *et al.*, (2012).

A Figura 6 apresenta os critérios para avaliação de rugosidade, onde l_v é o comprimento para atingir a velocidade do apalpador, l_e é o comprimento de

amostragem (*cut-off*), l_n é o comprimento para a parada do apalpador, l_m comprimento total de avaliação e l_t comprimento total de medição.

Figura 6 – Critérios para avaliação de rugosidade

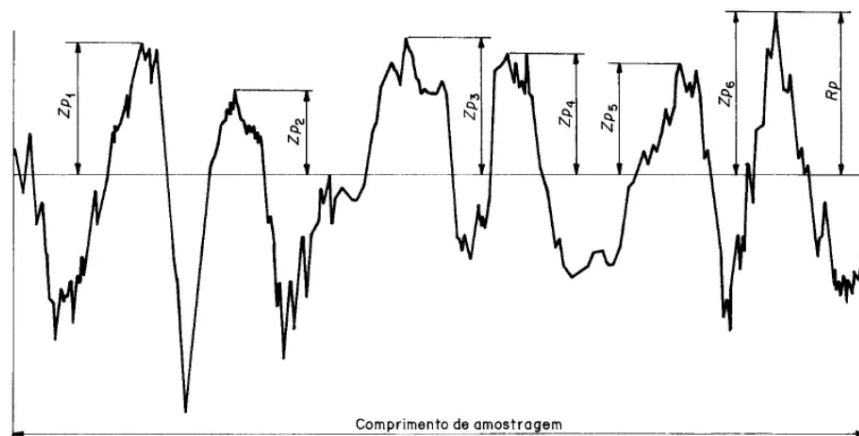


Fonte: Adaptado da norma ISO 6405:1988.

De acordo com a norma ISO 4287:2002 os seguintes parâmetros são empregados para qualificar a qualidade da superfície em avaliação através da rugosidade medida ao longo do comprimento total de avaliação:

- R_p (μm) (altura máxima do pico do perfil): maior altura dos picos do perfil Z_p ao longo do comprimento total de avaliação (Figura 7).

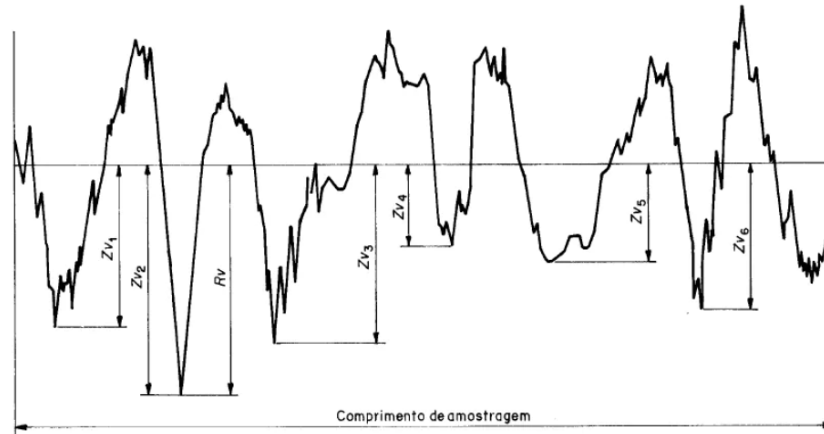
Figura 7 – Altura máxima dos picos do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade)



Fonte: Norma ISO 4287:2002.

- R_v (μm) (profundidade máxima do vale do perfil): maior profundidade do vale dos perfis Z_v ao longo do comprimento total de avaliação (Figura 8).

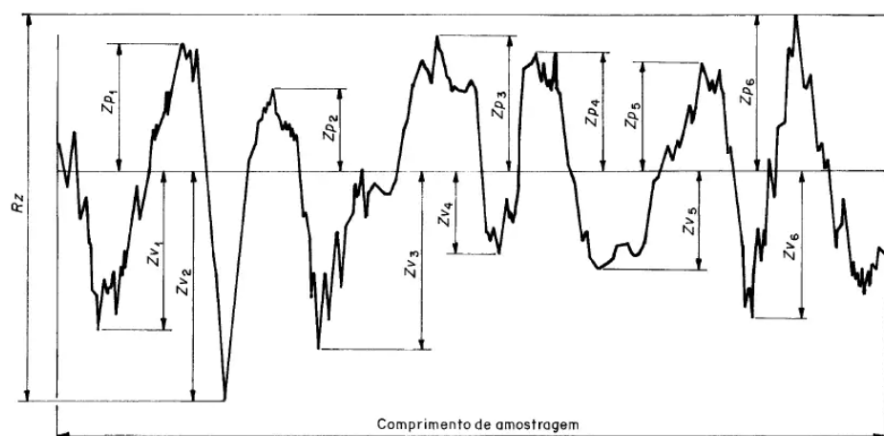
Figura 8 – Profundidade máxima do vale do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade)



Fonte: Norma ISO 4287:2002.

- R_z (μm) (altura máxima do perfil): corresponde a soma da altura máxima do perfil de rugosidade, ou seja, a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais baixo ao longo do comprimento total de avaliação (Figura 9). Este parâmetro possui uma sensibilidade alta a picos ou arranhões profundos (vale).

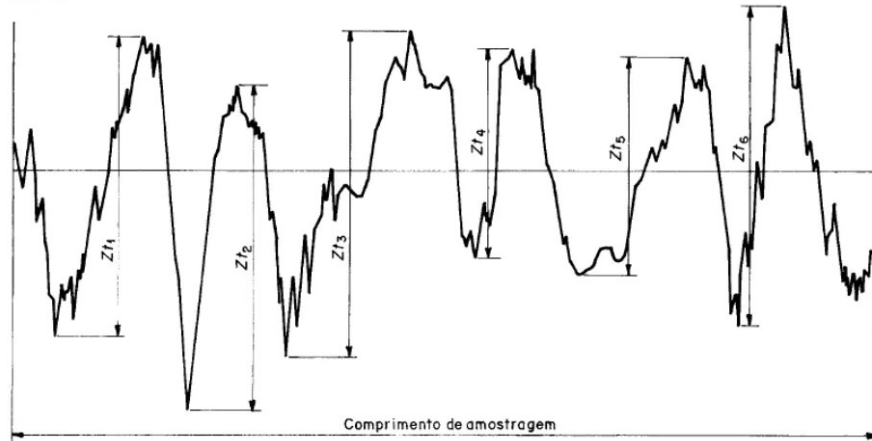
Figura 9 – Altura máxima do perfil de rugosidade (exemplo de um perfil de rugosidade)



Fonte: Norma ISO 4287:2002.

- R_c (μm) (altura média dos elementos do perfil): corresponde ao valor médio das alturas dos elementos do perfil Z_t ao longo do comprimento total de avaliação (Figura 10).

Figura 10 – Altura dos elementos do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade)



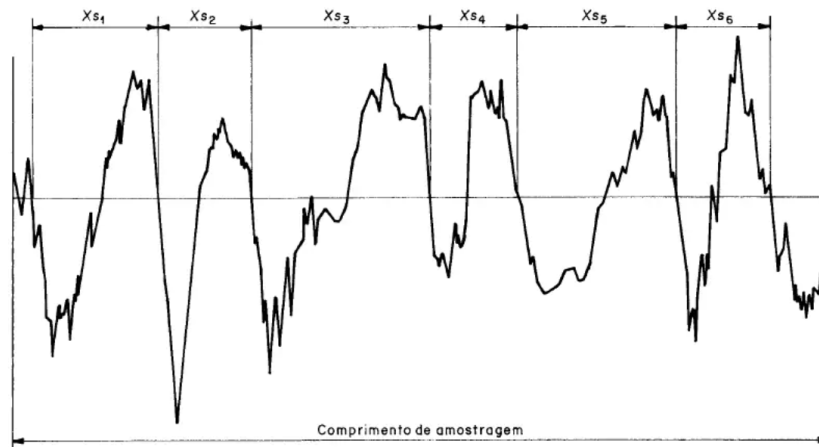
Fonte: Norma ISO 4287:2002.

- R_t (μm) (altura total do perfil): soma das maiores alturas de pico do perfil Z_p e das maiores profundidades dos vales do perfil Z_v ao longo do comprimento total de avaliação.
- R_a (μm) (desvio aritmético médio do perfil avaliado): consiste na rugosidade média aritmética dos valores absolutos das ordenadas $Z(x)$ ao longo do comprimento total de avaliação. É o parâmetro de rugosidade utilizado com frequência para representar a qualidade do acabamento de uma superfície.
- R_q (μm) (desvio médio quadrático do perfil avaliado): raiz quadrada da média dos valores das ordenadas $Z(x)$, ao longo do comprimento total de avaliação.
- R_{sk} (μm) (fator de assimetria do perfil avaliado (skewness)): quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas $Z(x)$ e R_q ao cubo, respectivamente, ao longo do comprimento total de avaliação.
- R_{ku} (μm) (fator de achatamento do perfil avaliado (kurtosis)): quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta

potência e o valor R_q à quarta potência, respectivamente, ao longo do comprimento total de avaliação.

- R_{Sm} (mm) (largura média dos elementos do perfil): valor médio da largura dos elementos do perfil X_s , ao longo do comprimento total de avaliação (Figura 11).

Figura 11 – Largura dos elementos do perfil



Fonte: Norma ISO 4287:2002.

A norma ISO 4288:2008 especifica as regras e procedimentos para medição utilizando instrumento por apalpação, determinando a seleção do comprimento de amostragem (*cut-off*) com base no perfil de rugosidade periódico ou não periódico. No caso da manufatura aditiva, a superfície apresenta o perfil primário periódico por conta das adições de sucessivas camadas. De acordo com a norma, para superfícies com rugosidades desconhecidas, deve-se estimar um valor para o comprimento de amostragem (*cut-off*) e verificar se o valor do parâmetro R_{Sm} encontra-se dentro da faixa estabelecida, em caso de divergência, utilizar o novo valor para o comprimento de amostragem (*cut-off*) com base no valor do parâmetro R_{Sm} encontrado. A Tabela 1 apresenta a faixa de valores dos parâmetros R_{Sm} , os valores de comprimento de amostragem (*cut-off*) e o comprimento total de avaliação.

Tabela 1 - Comprimento de amostragem recomendado para o parâmetro RSm
(perfis periódicos)

RSm (mm)	Comprimento de amostragem "ℓ _e " (mm)	Comprimento total de avaliação "ℓ _m " (mm)
$0,013 < RSm \leq 0,04$	0,08	0,4
$0,04 < RSm \leq 0,13$	0,25	1,25
$0,13 < RSm \leq 0,4$	0,8	4
$0,4 < RSm \leq 1,3$	2,5	12,5
$1,3 < RSm \leq 4$	8	40

Fonte: Adaptado da Norma ISO 4288:2008.

3.2 MANUFATURA ADITIVA POR FFF

3.2.1 Considerações gerais

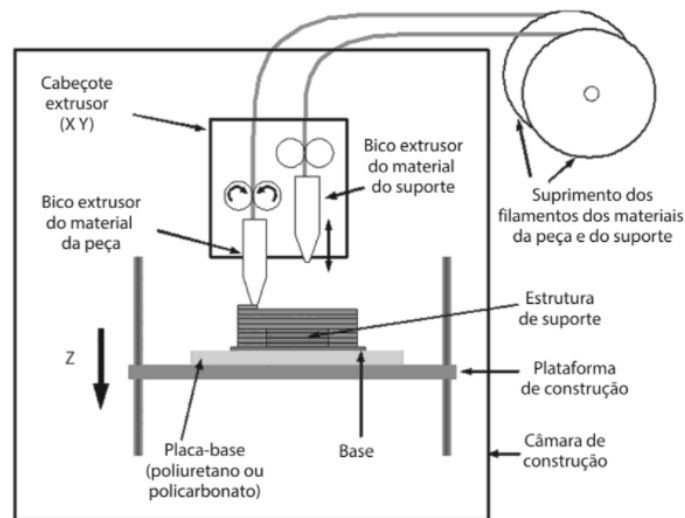
A manufatura aditiva por FFF, também designada por Impressão 3D, é um processo de fabricação que consiste na deposição de camada por camada de material através de informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D. Como mostrado na Figura 12, a fabricação de uma peça através da manufatura aditiva se inicia com a criação do modelo computacional 3D em um *software* de CAD. Posteriormente, o planejamento é realizado por um *software* de fatiamento, no qual é adicionando todos os parâmetros necessários para fabricação. A sequência de fabricação de cada camada obtida no fatiamento é transferida para o equipamento de manufatura aditiva que constrói a peça através da adição sucessiva de cada camada (Volpato, 2017). A Figura 13 apresenta esquematicamente como é fabricado uma peça através do processo FFF que utiliza dois bicos extrusores, um para o material utilizado na fabricação da peça e outro para o material da base e/ou para as estruturas de suporte.

Figura 12 – Representação das principais etapas do processo de manufatura aditiva



Fonte: Volpato (2017).

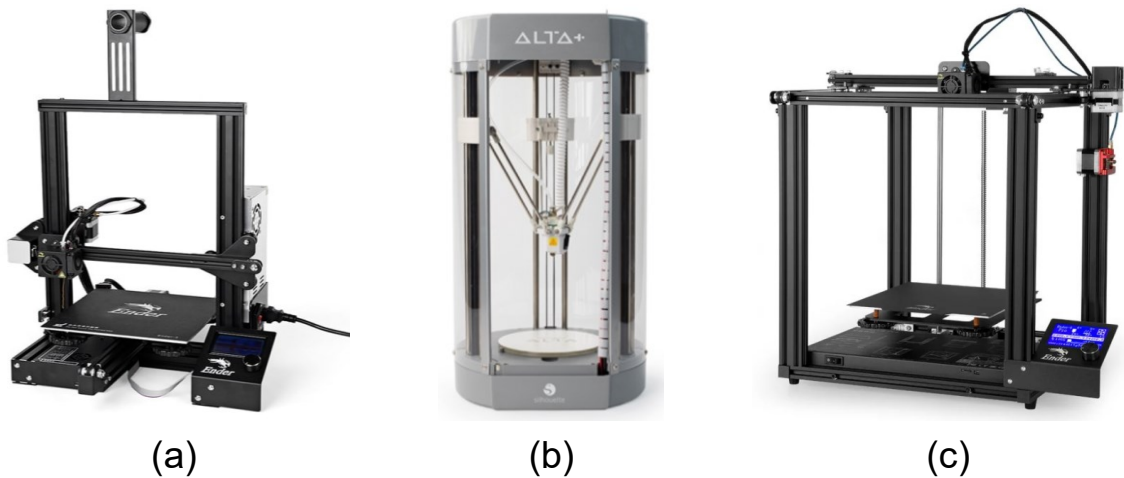
Figura 13 – Princípio do processo FFF utilizando a máquina da Stratasys Ltd



Fonte: Volpato (2017).

De acordo com a movimentação, as impressoras 3D podem ser classificadas em três principais categorias, como mostrado na Figura 14. As impressoras Cartesianas (a) possuem movimentação dos eixos X, Y e Z de forma independente durante a fabricação. Impressoras Delta (b) possuem três eixos acoplados nas guias verticais, garantindo a livre movimentação em qualquer um dos eixos. Impressoras Core XY (c) apresentam um eixo independente (mesa de impressão) com a movimentação do eixo Z e dois eixos acoplados movimentando nos eixos X e Y. Conforme mostrado na figura, a diferença básica está na movimentação dos eixos.

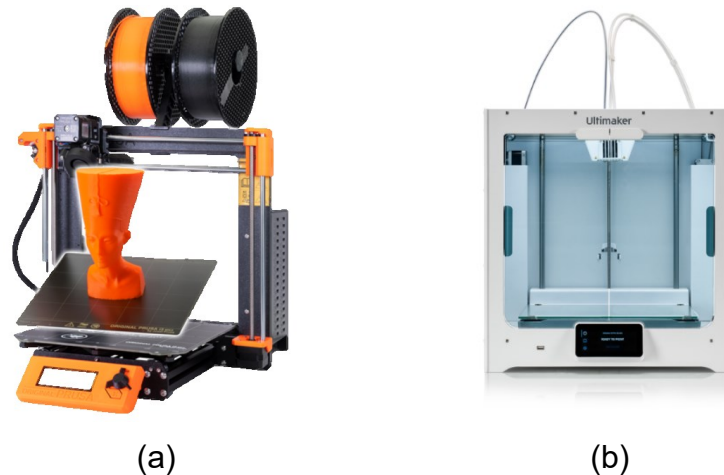
Figura 14 – Impressora Cartesiana 3D Ender 3 (a), Impressora Delta 3D Silhouette Alta Plus (b) e Impressora Core XY 3D Ender 5 PRO (c)



Fonte: 3D Fila (2023) e Silhouette Brasil (2022).

Em termos de arquitetura, a Figura 15 apresenta a classificação das impressoras 3D em: (a) impressoras de estrutura aberta (área de fabricação é desprovida de um ambiente fechado) e (b) impressoras de estrutura fechada.

Figura 15 – Impressora Prusa i3, cartesiana e de estrutura aberta (a) e Impressora Ultimaker S5, cartesiana e de estrutura fechada (b)



Fonte: Prusa 3D (2022) e Ultimaker (2022).

3.2.2 Principais parâmetros de processo da manufatura aditiva por FFF

Segundo Volpato (2017), os parâmetros que afetam o processo FFF podem ser divididos em quatro categorias: parâmetros específicos da máquina, parâmetros específicos de operação, parâmetros específicos do material e parâmetros

específicos da geometria. O Quadro 1 apresenta as principais variáveis do processo, de acordo com cada uma das quatro categorias de parâmetros. A qualidade interna e externa das peças fabricadas pelo processo FFF é determinada pela otimização destas variáveis, que são interdependentes e necessitam ser adequadamente selecionadas para fabricar peças com alta qualidade.

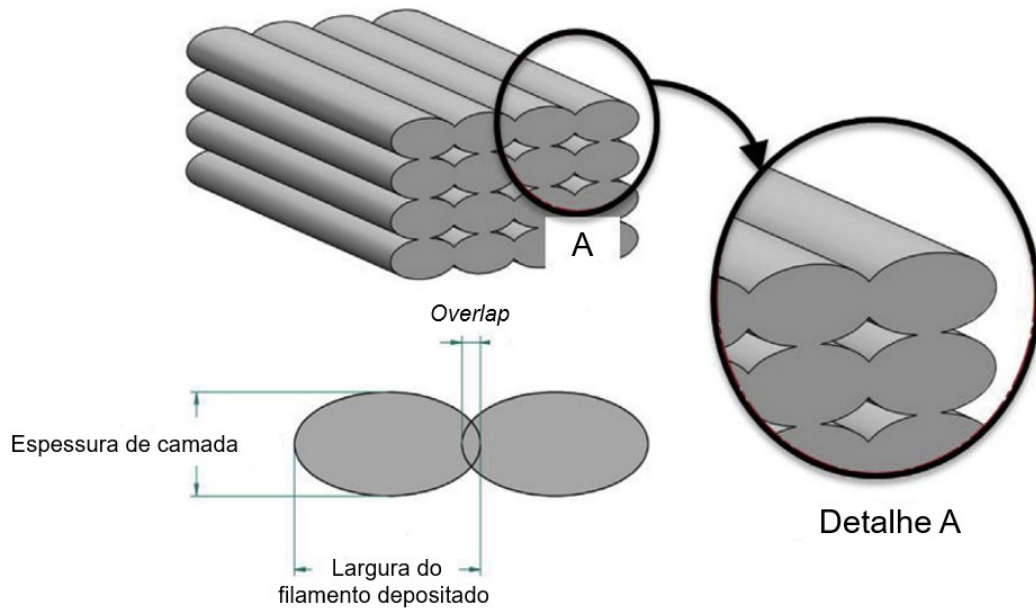
Quadro 1 – Principais variáveis do processo FFF

Parâmetros de Operação	Parâmetros da Máquina	Parâmetros do Material	Parâmetros de Geometria
Espessura da camada	Diâmetro do bico	Viscosidade	Comprimento do vetor de preenchimento
Largura do filamento depositado	Taxa de alimentação do material	Rigidez do filamento	Estrutura de suporte
Velocidade de impressão	Velocidade dos roletes tracionadores	Flexibilidade	Quantidade de trechos de raster
Temperatura de extrusão	Vazão	Condutividade térmica	Tempo entre deposições de camadas
Temperatura da câmara de construção	Diâmetro do filamento	Higroscopia	
Padrão e porcentagem de preenchimento	Convecção no interior da câmara	Características do ligante	

Fonte: Adaptado de Volpato (2017).

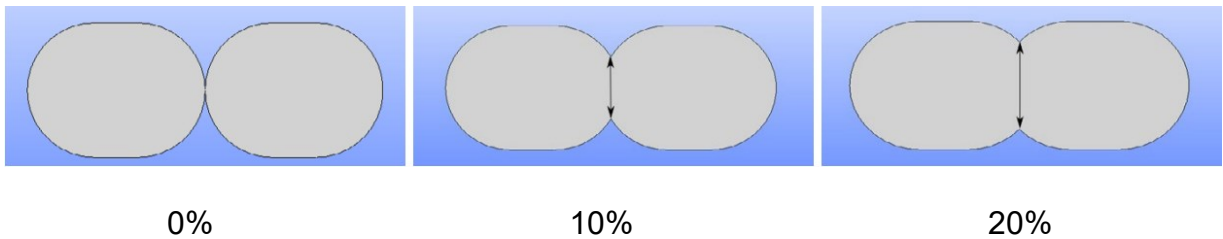
Além das principais variáveis mencionadas anteriormente, Alaimo *et al.*, (2017) destacam uma variável de operação adicional, o *overlap*, indicado na representação da Figura 16. Nos *softwares* de fatiamento, essa variável é expressa em porcentagem e indica a sobreposição entre os filamentos adjacentes depositados em uma mesma camada. A Figura 17 mostra a diferença entre as regiões de contato entre dois filamentos adjacente depositados para três níveis de *overlap*: 0%, 10% e 20%.

Figura 16 – Representação da espessura de camada, largura do filamento depositado e *overlap* no processo FFF



Fonte: Adaptado de Alaimo *et al.* (2017).

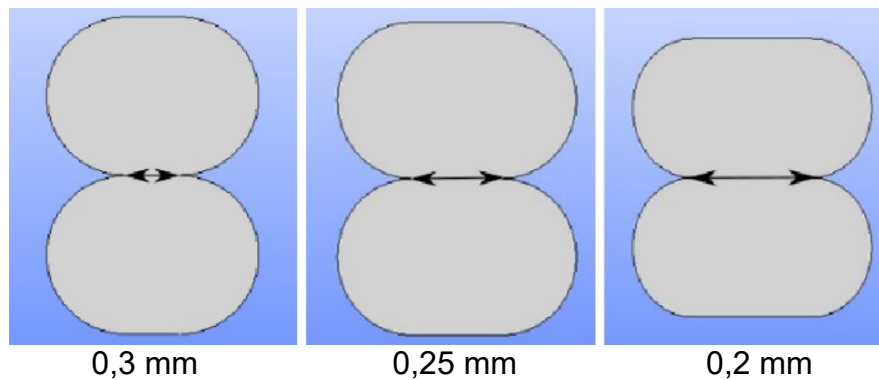
Figura 17 – Diferença entre regiões de contato para três níveis de *overlap*



Fonte: Adaptado de Alaimo *et al.* (2017).

Os autores também observaram que a espessura de camada utilizada afeta a região de contato entre duas camadas depositadas. Quando a espessura de camada é reduzida, o filamento depositado adquire uma forma elíptica, resultando em uma região de contato maior entre as camadas adjacentes sobrepostas. A Figura 18 ilustra diferentes regiões de contato entre duas camadas sobrepostas para três níveis de espessura de camada: 0,3 mm, 0,25 mm e 0,2 mm.

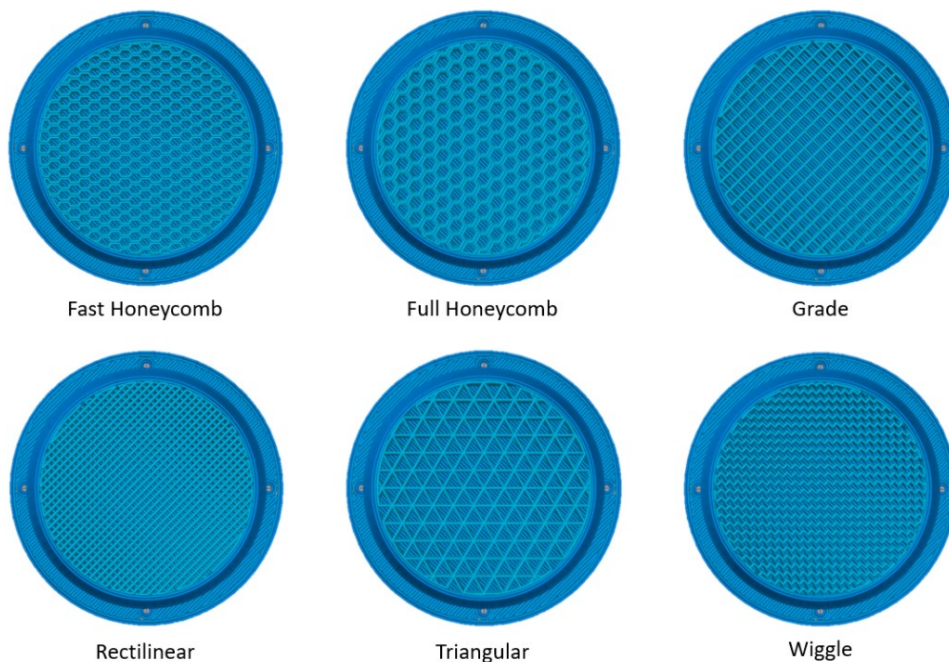
Figura 18 – Diferentes regiões de contato entre duas camadas sobrepostas para diferentes espessuras de camada



Fonte: Adaptado de Alaimo *et al.* (2017).

A título de ilustração, a Figura 19 apresenta os principais padrões de preenchimentos disponíveis no *software* de fatiamento Simplify3D 4.1. Apesar das variedades de padrões, o mais comumente empregado é o *rectilinear*.

Figura 19 – Padrões de preenchimento disponibilizados no *software* Simplify3D

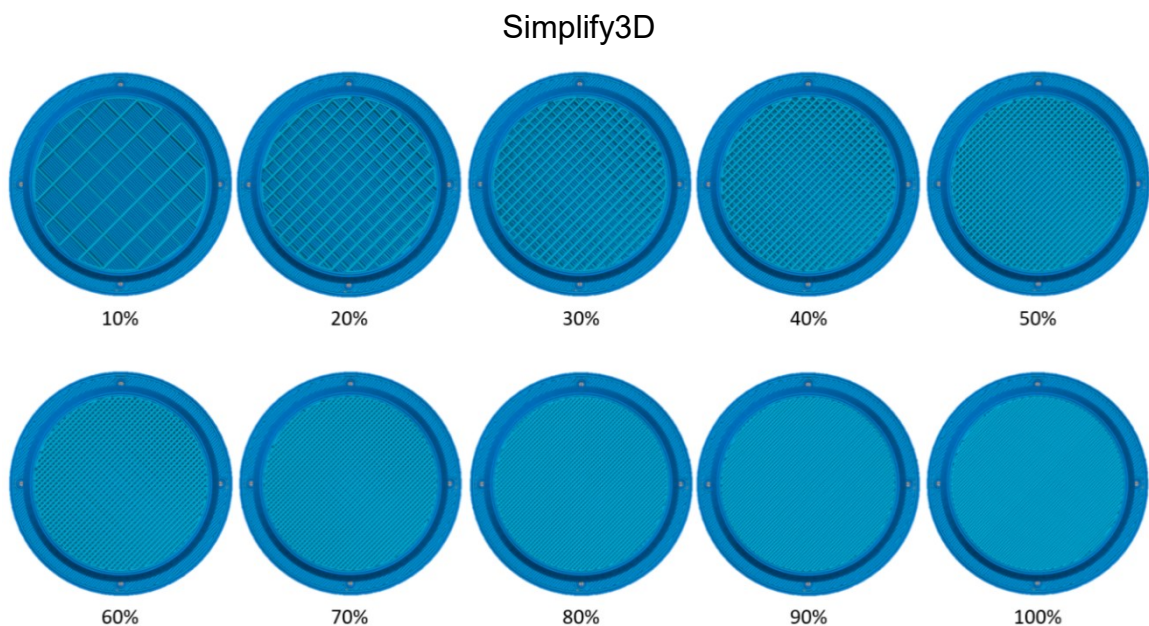


Fonte: Autor (2023).

Um parâmetro de fabricação comumente presente nos *softwares* de impressão 3D e que está relacionado com a variável padrão de preenchimento é a porcentagem de preenchimento. Este parâmetro refere-se ao volume de material a ser utilizado para preencher o interior da peça a ser impressa. Para efeito ilustrativo,

utilizando novamente o *software* de fatiamento Simplify3D 4.1 é possível observar na Figura 20 a diferença na quantidade de material utilizado para cada porcentagem de preenchimento para o padrão *rectilinear*. A porcentagem foi variada de 10 a 100 %. A importância deste parâmetro está no fato de que a porcentagem de preenchimento influi no tempo gasto para impressão, no gasto de material, na densidade do objeto impresso e na sua resistência mecânica.

Figura 20 – Diferentes porcentagens de preenchimento disponibilizados no *software*



Fonte: Autor (2023).

3.2.3 Principais materiais para o processo FFF

Segundo De Andrade *et al.*, (2020) no processo FFF podem ser empregados diferentes tipos de materiais termoplásticos, sem ou com cargas adicionais, que são disponibilizados na forma de filamentos de diâmetro 1,75 mm e 3,0 mm, sendo mais típico o filamento de 1,75 mm.

De acordo com o relatório da Grand View Research (2018) disponível no *site*, o mercado global de filamentos para impressão 3D foi estimado em 471,3 milhões de dólares para o ano de 2019 e com tendência para se expandir com uma taxa de crescimento anual de 18,8% de 2017 a 2020. As aplicações desses filamentos estão sendo impulsionadas pela crescente utilização dos filamentos em vários setores industriais, entre eles o setor aeroespacial. Entre os diversos

materiais que atualmente são comercializados destacam-se os polímeros ABS, PLA e PETG.

Um exemplo da variedade de materiais disponibilizados para a manufatura aditiva por FFF, pode ser obtido do *site* da empresa Stratasys Ltd (2022) que comercializa os seguintes filamentos: ABS-CF10 (com fibra de carbono), ABS-ESD7 (com dissipador de eletricidade estática), ABSi (transparente), ABS-M30 (alta resistência mecânica), ABS-M30i (material biocompatível não implantável), ABSplus, PLA (biodegradável de origem natural e de fontes renováveis), ASA (plástico resistente a raios ultravioletas), FDM Nylon 12 (poliamida com resistência mecânica para aplicações avançada), PC (policarbonato), PC-ABS (policarbonato de alto impacto – engenharia), PC-ISO (norma ISO 10993), ULTEM 1010 (adição de aditivo antichama), ULTEM 9085 (alta relação resistência e peso) e PPSF/PPSU (polifenilsulfona com alta resistência química e ao calor).

3.2.4 Fabricação de moldes para termoformagem à vácuo por FFF

Hartman (2014) apresentou alguns benefícios atribuídos exclusivamente ao processo FFF, como a possibilidade de utilizar variedades de polímeros para impressão, fabricar objetos com geometrias complexas e de diferentes densidades.

Nkomo *et al.*, (2017) afirmam que nos métodos convencionais de fabricação de moldes há uma grande perda de material durante sua fabricação, diferente do que ocorre quando é empregado o processo de manufatura aditiva, onde o desperdício de matéria prima é mínimo.

De acordo com Hartman (2014), a manufatura aditiva por FFF permite a fabricação de moldes variando parâmetros de fabricação como a porcentagem de preenchimento, espessura de camada, velocidade de impressão e temperatura de extrusão, além de fabricar moldes com uma grande variedade de plásticos adequadamente resistentes ao processo de termoformagem, resultando em uma vida longa ao molde.

Apesar destes benefícios, a fabricação de moldes com valores de rugosidade baixos é um desafio a ser alcançado pela manufatura aditiva por FFF. Biglete *et al.*, (2020) utilizaram uma impressora FlashForge 3D Printer Creator Pro de estrutura fechada para fabricar corpos de prova em ABS e avaliar a influência dos parâmetros indicados na Tabela 2 na rugosidade da peça fabricada. Utilizando um

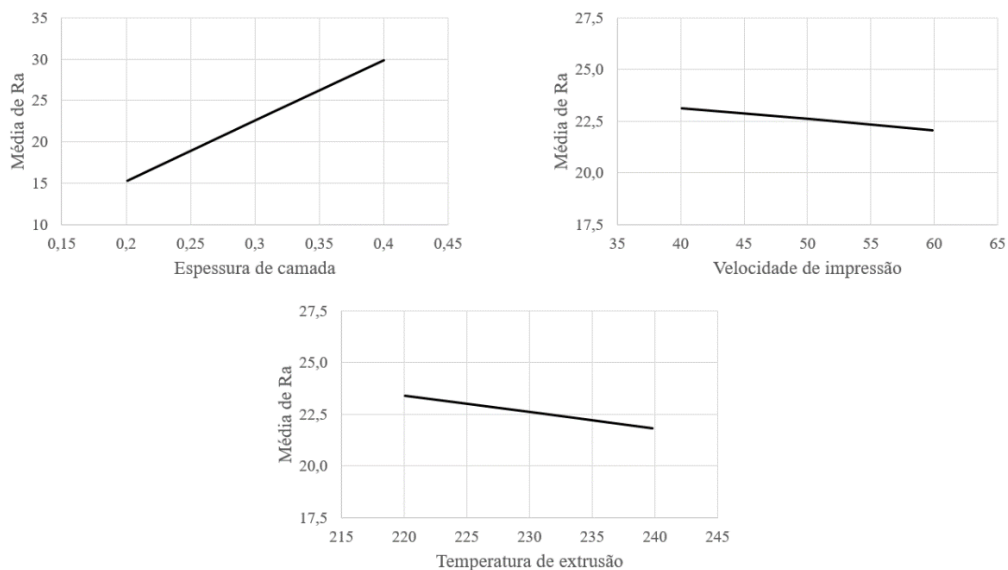
rugosímetro Mitutoyo Surftest SJ-210 e de acordo com a norma ISO 4287 avaliaram os valores de Ra e Rt na superfície externa do corpo de prova. Os autores não indicaram com clareza qual superfície (lateral ou topo) foram realizadas as medições. Os resultados indicaram que os menores valores de rugosidade foram obtidos com os parâmetros temperatura de extrusão 240 °C, velocidade de impressão 60 mm/s e espessura de camada 0,2 mm, como mostrado nas Figura 21 e Figura 22. Os resultados também evidenciaram a maior influência da espessura de camada nos valores de rugosidade. Cujos valores médios de Ra e Rt chegaram em torno de 18 µm e 101 µm, respectivamente, para espessura de camada 0,25 mm.

Tabela 2 – Parâmetros investigados no trabalho de Biglete *et al.* (2020)

Material	Temperatura de extrusão	Velocidade de impressão	Espessura de camada
ABS	220 °C	40 mm/s	0,2 mm
	230 °C	50 mm/s	0,3 mm
	240 °C	60 mm/s	0,4 mm

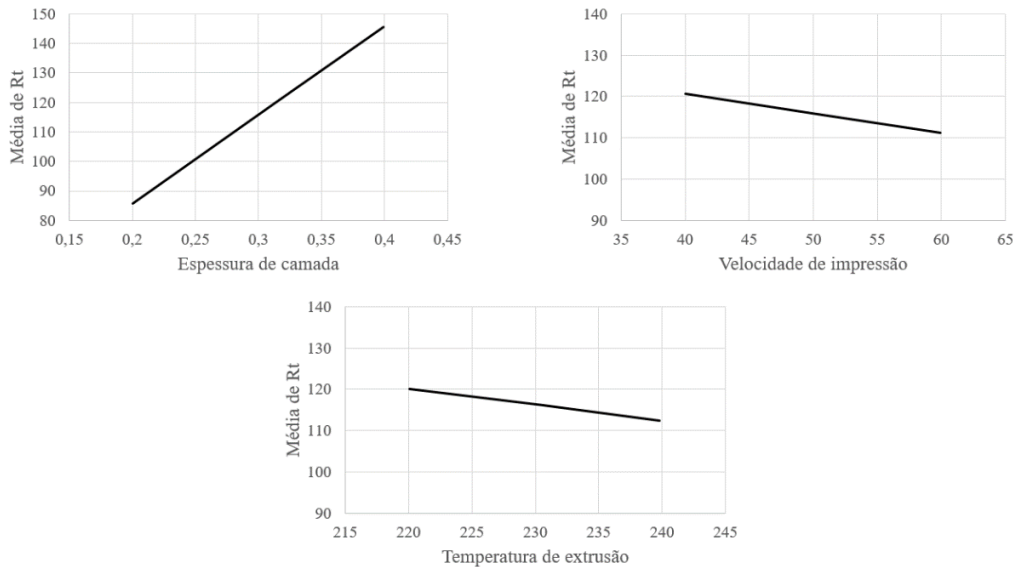
Fonte: Biglete *et al.* (2020).

Figura 21 – Valores médios de Ra em função dos parâmetros de fabricação investigados por Biglete *et al.* (2020)



Fonte: Adaptado de Biglete *et al.* (2020).

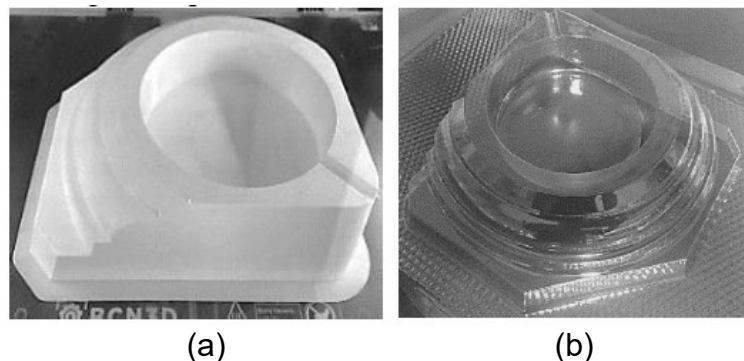
Figura 22 – Valor de Rt em função dos parâmetros de fabricação investigados por Biglete *et al.* (2020)



Fonte: Adaptado de Biglete *et al.* (2020).

Boca; Slătineanu; Sover, (2021), utilizaram a fabricação com filamento fundido (FFF) para imprimir um molde de material PET resistente ao calor, seguido pela realização da termoformagem a vácuo de um único produto termoformado com o material PET (Figura 23). O estudo teve como objetivo destacar as vantagens em relação ao uso da manufatura aditiva para a termoformagem à vácuo. De acordo com os pesquisadores, a técnica FFF demonstrou ser vantajosa para a produção de moldes protótipos, uma vez que permite a personalização do molde e a redução dos custos e do tempo de fabricação. Embora os moldes não possuem as mesmas propriedades e qualidades dos moldes de alumínio.

Figura 23 – Molde impresso por FFF (a) e produto termoformado (b), apresentado por Boca *et al.* (2021)



Fonte: Adaptado de Boca; Slătineanu; Sover, (2021).

Em outro estudo desenvolvido por Boca; Sover; Slătineanu, (2022), foram avaliados dois tipos de moldes. Um utilizando a técnica de fabricação por filamento fundido (FFF) com material PLA e outro utilizando a sinterização seletiva a laser (SLS) com material nylon (PA12), que posteriormente seriam submetidos ao processo de termoformagem, variando o material da chapa (PS e PET) e espessuras da chapa (0,3 mm, 0,6 mm e 0,7 mm). Os moldes fabricados por FFF com o material PLA utilizando uma impressora Ultimaker 2+, de estrutura fechada, apresentaram defeitos em suas superfícies, já na primeira e única termoformagem realizada. Sem especificar os parâmetros empregados na fabricação do molde, os autores atribuíram esse resultado insatisfatório devido à baixa temperatura de transição vítrea do PLA utilizado na fabricação do molde e concluíram que a técnica SLS utilizando o material PA12 mostrou-se mais eficiente.

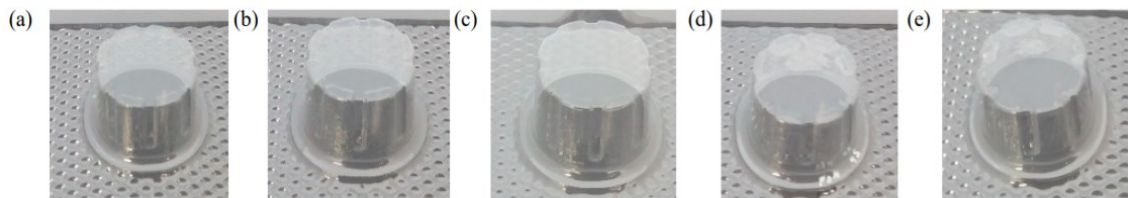
Parada; Mayuet; Gámez, (2019), por sua vez utilizaram impressoras das marcas Zortrax e BQ Withbox, para fabricação de cinco moldes com diferentes materiais (Figura 24) através do processo FFF para posteriormente serem submetidos ao processo de termoformagem. Os materiais utilizados para fabricação dos moldes foram: ABS, PLA, POM (Polioximetileno), Nylstrong (composto de nylon e poliamida) e Shogun (PLA resistente ao calor). O material da chapa utilizado no processo de termoformagem foi o PET com a espessura de 0,5 mm. A Figura 25 mostra os produtos termoformados. A impressora BQ Withbox foi utilizada para fabricar moldes com o filamento PLA, pois, essa impressora trabalha somente com esse filamento. A medição de rugosidade no molde e no produto termoformado foi realizada através de um medidor de rugosidade de mesa digital Mahr, de acordo com a norma ISO 4287. Os autores fabricaram os moldes com os seguintes parâmetros: espessura de camada 0,2 mm, padrão de preenchimento tipo grade com 15% de preenchimento, espessura de parede 1,4 mm, velocidade de impressão 30 mm/s (material POM requer baixas velocidades) e com as temperaturas do bico da extrusora e da mesa de construção estabelecidas de acordo com o sugerido pelos fabricantes dos filamentos.

Figura 24 – Moldes fabricados pelo processo FFF com diferentes materiais estudados por Parada; Mayuet; Gámez, (2019)



Fonte: Parada; Mayuet; Gámez, (2019).

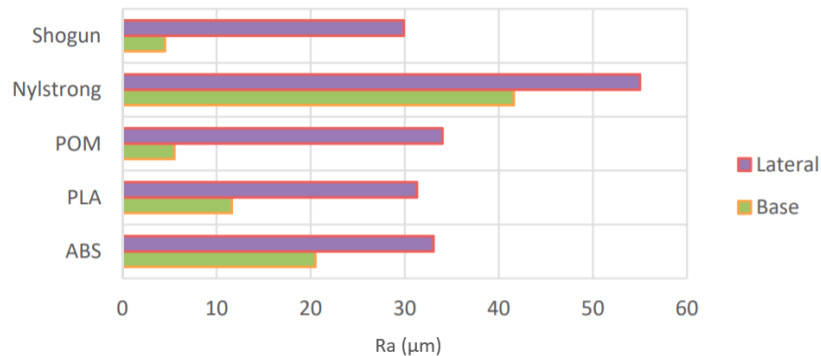
Figura 25 – Produtos termoformados utilizando material PET em moldes de (a) ABS; (b) Nylstrong; (c) PLA; (d) POM; (e) Shogun estudados por Parada; Mayuet; Gámez, (2019)



Fonte: Parada; Mayuet; Gámez, (2019).

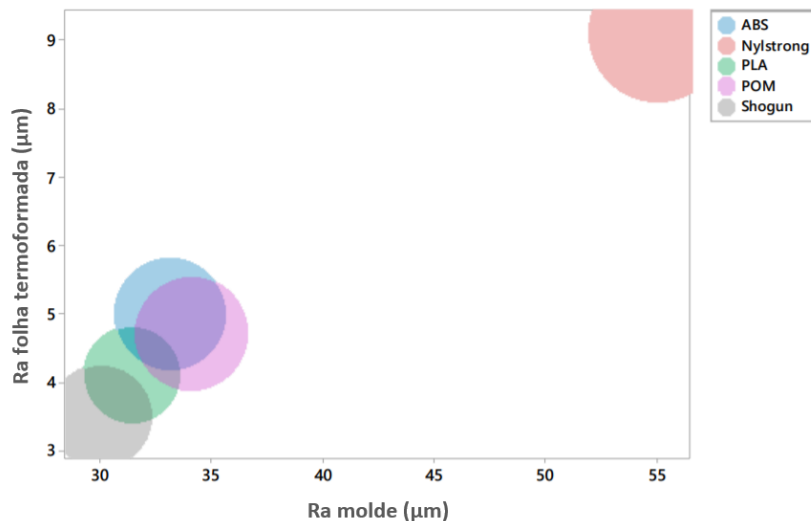
A Figura 26 mostra os valores da rugosidade média aritmética (R_a) da superfície lateral e na superfície superior dos moldes (base). A Figura 27 mostra a correlação entre os valores de rugosidades dos moldes e dos produtos termoformados. Conforme pode ser evidenciado, os autores verificaram diferenças significativas entre os valores de rugosidade medidos na superfície lateral e na superfície superior. Com exceção do material Nylstrong, os valores de rugosidade da superfície lateral dos diferentes materiais empregados nos moldes apresentaram valores mais elevados, em torno de 30 a 35 μm . Na superfície superior dos moldes, a maior rugosidade obtida para o molde de ABS teve o valor médio em torno de 22 μm .

Figura 26 – Rugosidade média aritmética (Ra) do molde para cada tipo de material, estudados por Parada; Mayuet; Gámez, (2019)



Fonte: Adaptado de Parada; Mayuet; Gámez, (2019).

Figura 27 – Diagrama de correlação entre o Ra do molde e o produto termoformado de acordo com os materiais estudados por Parada; Mayuet; Gámez, (2019)



Fonte: Adaptado de Parada; Mayuet; Gámez, (2019).

De acordo com os autores, os resultados obtidos com os produtos termoformados de PET com espessura de 0,5 mm foram considerados satisfatórios, apresentando valores de Ra em torno de 3 a 5,8 μm , medidos nas regiões externas dos produtos termoformados. Os maiores valores de rugosidade foram obtidos nos produtos termoformados no molde de ABS, que resultaram em um valor médio de Ra em torno de 5 μm .

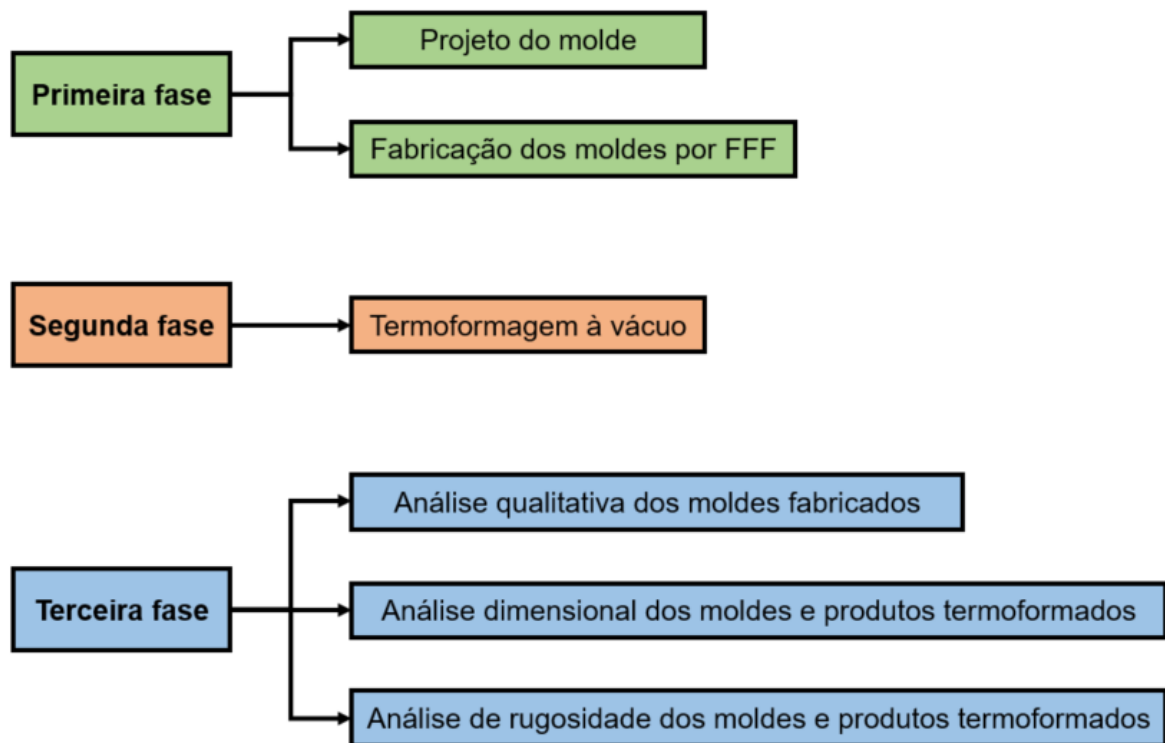
Conforme observado na literatura, as pesquisas relacionadas ao emprego de moldes impressos por FFF para o processo de termoformagem tem um grande potencial de crescimento, evidenciando a possibilidade de ampliação no campo de

investigação dos parâmetros de operação, por exemplo, empregando valores de espessuras de camada menores que 0,2 mm. Igualmente foi possível observar que praticamente os trabalhos se limitam a avaliar os produtos termoformados em um único ciclo de fabricação sem apresentar resultados sobre possíveis diferenças de valores de rugosidade ou dimensional obtidos após um certo número de ciclos de termoformagem realizados.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia adotada foi constituída de três fases, apresentada no fluxograma na Figura 28, cada fase correspondendo a um conjunto de procedimentos experimentais realizados e descritos a seguir.

Figura 28 – Fluxograma geral das fases do trabalho

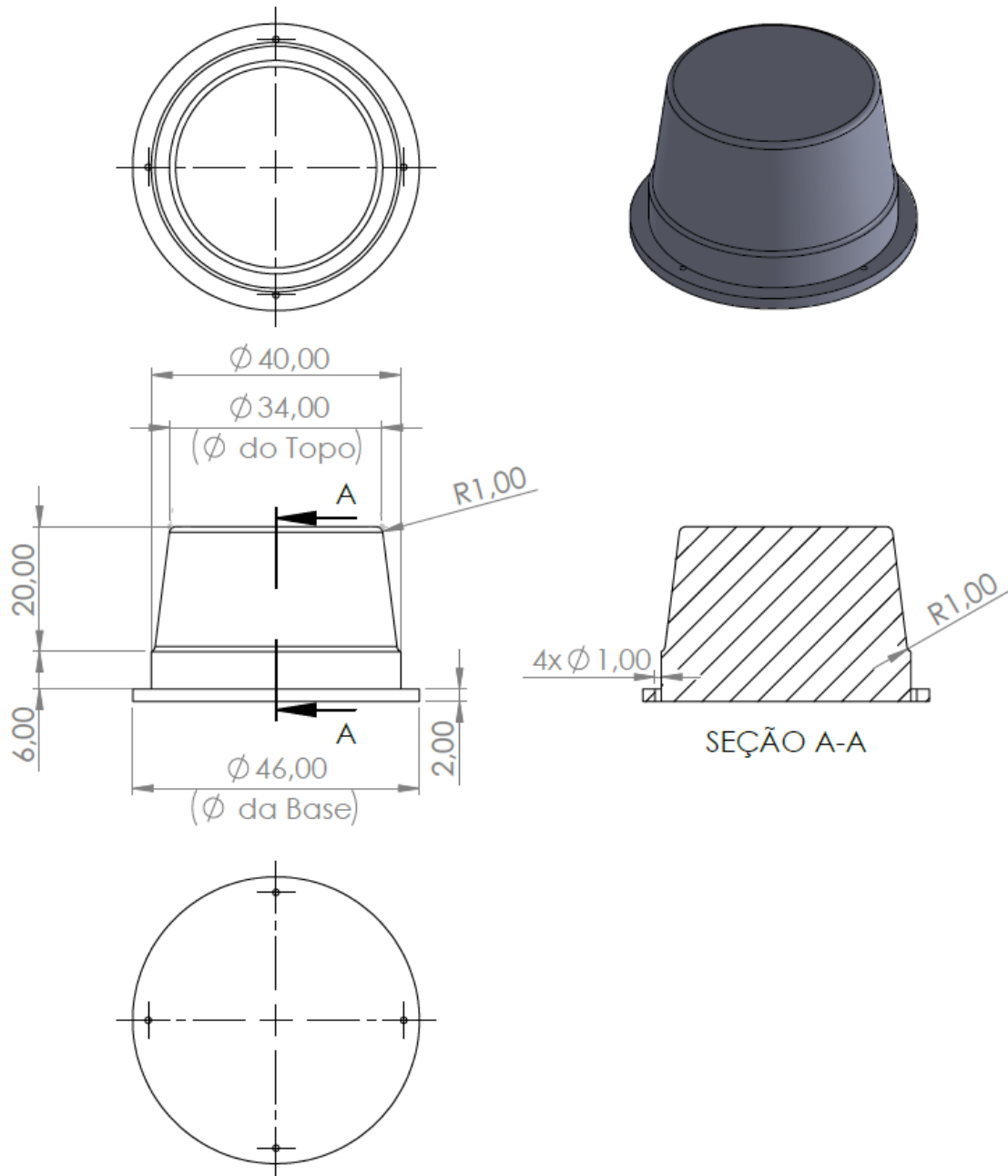


Fonte: Autor (2023).

4.1 PRIMEIRA FASE – PROJETO E FABRICAÇÃO DOS MOLDES POR FFF

O projeto do molde foi realizado utilizando o *software SolidWorks*, cuja a geometria e dimensões são apresentadas na Figura 29. A geometria foi inspirada em uma cápsula de café expresso e projetada com dimensões típicas às empregadas na fabricação por FFF e termoformagem à vácuo. Posteriormente, o projeto foi convertido para o formato STL para realizar o fatiamento, onde foi utilizado o *software Simplify3D 4.1*.

Figura 29 – Geometria e as dimensões gerais do molde



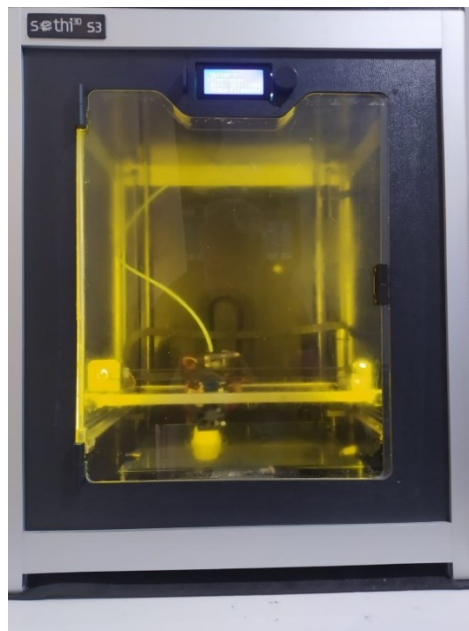
Fonte: Autor (2023).

Para auxiliar na evacuação do ar durante o processo de termoformagem à vácuo, o molde foi projetado com quatro orifícios de diâmetro igual a 1 mm na parte inferior e com cantos arredondados na superfície superior.

Foi fabricado um molde para cada valor de espessura de camada, sendo eles: 0,05 mm, 0,15 mm e 0,25 mm. Os moldes foram fabricados na empresa GT Projetos, utilizando a impressora cartesiana Sethi3D S3 (Figura 30), de estrutura

fechada, que dispõe de uma área de construção de 270 x 270 x 320 mm³. A impressora trabalha com diferentes plásticos de engenharia, com temperatura máxima de extrusão 260 °C, temperaturas máxima da mesa 120 °C, espessuras de camada entre 0,05 mm a 0,3 mm e velocidade máxima de impressão 150 mm/s. O equipamento conta com o dispositivo de nivelamento automático de qualidade e alta precisão *Smart Level*.

Figura 30 – Impressora cartesiana Sethi3D S3



Fonte: Autor (2023).

Os moldes foram fabricados com o material ABS Premium da 3D Fila, cujas especificações do filamento estão apresentadas na Tabela 3. A escolha por este tipo de material se deveu a sua ampla utilização no processo de FFF e possibilidade de avaliar comparativamente os resultados deste trabalho com o de outros pesquisadores.

Tabela 3 – Especificações do ABS Premium fornecida pelo fabricante 3D Fila

Diâmetro	1,75 mm
Temperatura de transição vítrea	107 °C
Temperatura do bico da extrusora	205 °C ~ 245 °C
Temperatura mínima da mesa	60 °C ~ 90 °C

Fonte: 3D Fila (2023).

Para a fabricação dos moldes, alguns parâmetros variáveis do processo foram fixados. A Tabela 4 apresenta os parâmetros de operação e a Tabela 5 apresenta os parâmetros da máquina que foram fixados durante a impressão. Os parâmetros velocidade de impressão, temperatura do bico da extrusora e temperatura da mesa foram estabelecidos entre a faixa de valores indicados pelo fabricante e de acordo com os parâmetros otimizados da empresa GT Projetos para o material ABS, evitando trabalhar com os valores máximos fornecidos pelo fabricante.

Tabela 4 – Parâmetros de operação fixados

Parâmetros de operação	Material ABS
Velocidade de impressão	70 mm/s
Temperatura de extrusão	235 °C
Temperatura da mesa	110 °C
Temperatura da câmara de construção	35-45 °C
Largura do filamento depositado	0,48 mm
Padrão de preenchimento	<i>Rectilinear</i>
Porcentagem de preenchimento	50 %
<i>Overlap</i>	20 %
Ângulo de preenchimento	45 / -45 °

Fonte: Autor (2023).

Tabela 5 – Parâmetros da máquina fixados

Parâmetros da máquina	Material ABS
Diâmetro do bico	0,4 mm
Taxa de alimentação do material	100 %
Diâmetro do filamento	1,75 mm

Fonte: Autor (2023).

A Tabela 6 apresenta uma estimativa do tempo de fabricação dos moldes, valores coletados do *software Simplify3D 4.1*. Nota-se que o valor da espessura de camada influencia no tempo gasto para impressão, o que é esperado, pois menor

espessura resulta no aumento do número total de camadas necessárias para imprimir o molde.

Tabela 6 – Estimativa do tempo de impressão dos moldes por FFF

Espessura de camada	Estimativa do tempo de impressão para os moldes em ABS
0,05 mm	4h e 13 min
0,15 mm	1h e 24 min
0,25 mm	52 min

Fonte: Autor (2023).

4.2 SEGUNDA FASE – TERMOFORMAGEM À VÁCUO NOS MOLDES FABRICADOS POR FFF

Na segunda fase foi realizado a termoformagem à vácuo com os moldes fabricados na fase anterior. A termoformagem à vácuo foi realizada na empresa Plastibras, situada em Joinville – Santa Catarina, utilizando a máquina MTF 800 (Figura 31). A máquina é destinada para produções em grandes escalas, sendo possível trabalhar com diferentes chapas poliméricas (PS, PVC, PET e outros).

Figura 31 – Máquina termoformadora MTF800

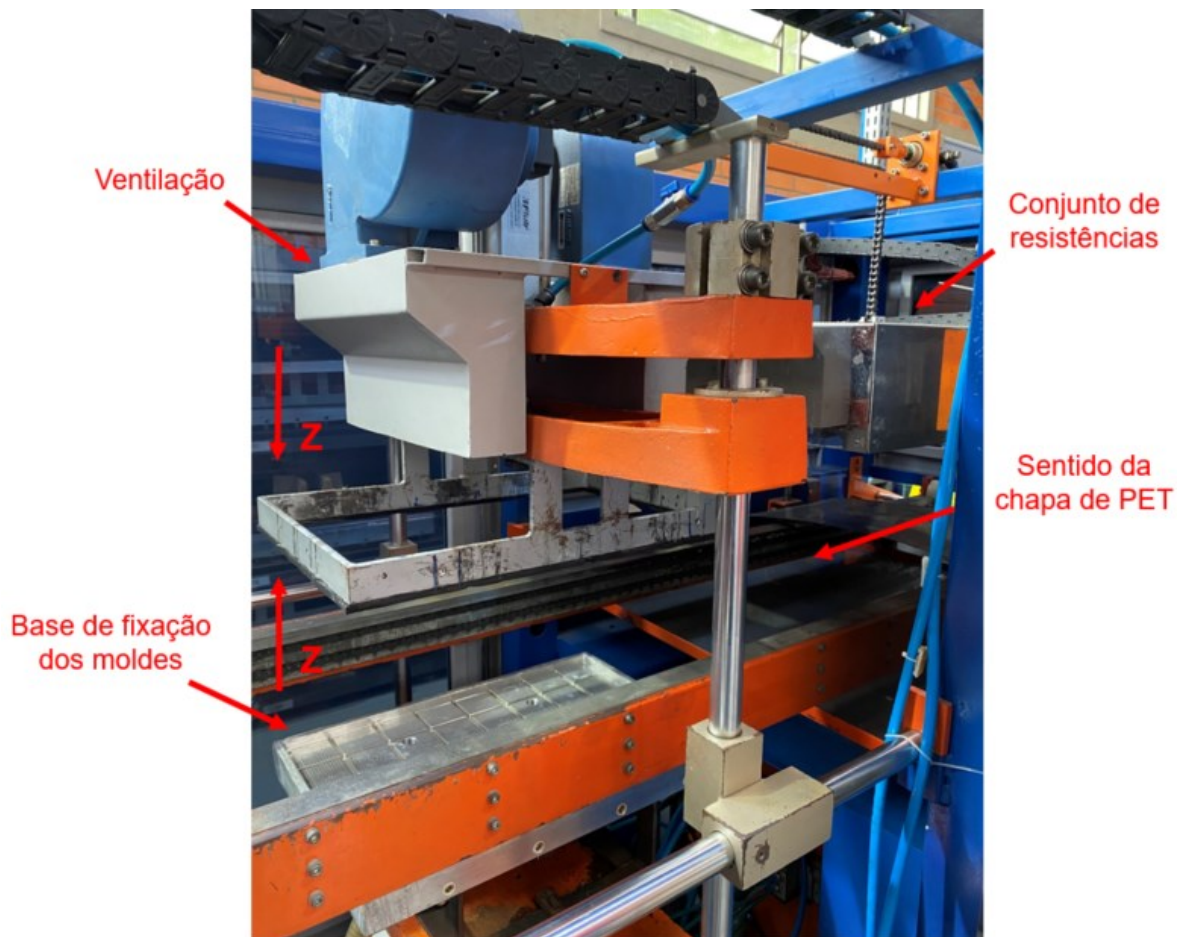


Fonte: Autor (2023).

As chapas utilizadas neste processo de termoformagem à vácuo foram de PET com espessura de 0,6 mm. Material escolhido por sua ampla utilização nesse processo, por apresentar elevada resistência ao impacto e alta transparência, bem como por ter sido utilizado por outros pesquisadores e permitir a avaliação comparativa entre os resultados de medição de rugosidade.

A Figura 32 ilustra o sistema de termoformagem da máquina MTF800, descrevendo os principais componentes. A capacidade da bomba de vácuo é de 40m³h, operando a uma pressão de 6 bar.

Figura 32 – Sistema de termoformagem da máquina MTF800



Fonte: Autor (2023).

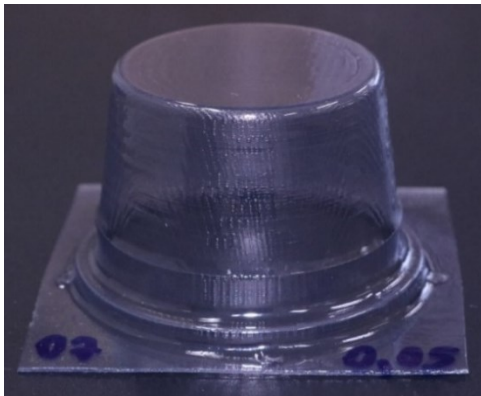
O processo de termoformagem à vácuo neste equipamento ocorre de forma sequencial, mediante o posicionamento da chapa em diferentes estações de operação, cada uma responsável por realizar uma etapa do processo na máquina, na seguinte ordem: aquecimento da chapa, moldagem à vácuo, resfriamento do produto moldado, finalizando com a desmoldagem.

O aquecimento da chapa é realizado por meio de um conjunto de resistências em cerâmica presentes no equipamento, que transfere calor para a superfície superior da chapa polimérica. A temperatura utilizada para o aquecimento da chapa foi ajustada em 500°C e mantida constante para cada ciclo. O tempo de aquecimento da chapa foi de 15 segundos e a moldagem, resfriamento e desmoldagem também 15 segundos, ocorrendo de forma sequencial.

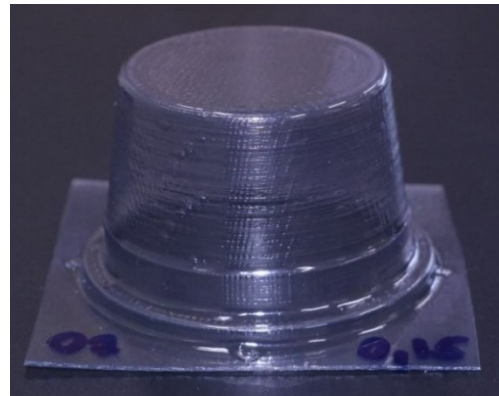
Foram realizados dez ciclos de termoformagem à vácuo em cada molde. Os três moldes foram fixados em uma única placa de MDF, se constituindo de um bloco único de moldes machos (positivos) e possibilitando a termoformagem dos três moldes simultaneamente a partir de uma única chapa de PET, resultando em três produtos termoformados por ciclo.

Os produtos resultantes em cada chapa foram recortados individualmente e separados para posterior análises. A título de exemplo, a Figura 33 mostra os produtos termoformados que resultaram do sétimo ciclo.

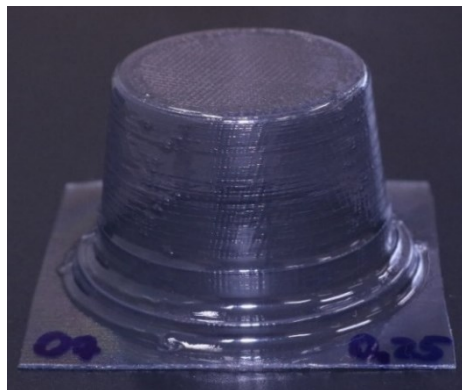
Figura 33 – Produtos termoformados resultantes do sétimo ciclo de moldagem nos moldes fabricados com as três diferentes espessuras de camada



0,05 mm



0,15 mm



0,25 mm

Fonte: Autor (2023).

4.3 TERCEIRA FASE – CARACTERIZAÇÕES DOS MOLDES E PRODUTOS TERMOFORMADOS

4.3.1 Avaliação qualitativa das superfícies do molde

Em todos os moldes fabricados foram avaliados qualitativamente as superfícies laterais e superfícies dos tops antes de serem submetidos ao processo de termoformagem à vácuo.

Foram avaliados qualitativamente através de critérios visuais e de imagens fornecidas pelo microscópio confocal Olympus (OLS4000), Figura 34, disponibilizado pelo Laboratório de Manufatura Aditiva e Engenharia de Superfícies (LAMSE) localizado na Universidade Federal do Paraná, situada em Curitiba – Paraná (UFPR).

Figura 34 – Microscópio confocal Olympus (OLS4000)



Fonte: Autor (2023).

4.3.2 Análise dimensional

As análises dimensionais foram realizadas utilizando a máquina de medição por coordenadas Mitutoyo Strato Apex 9166 (Figura 35), disponibilizada no Instituto Senai de Inovação em Manufatura e Processamento a Laser, situada em Joinville – Santa Catarina, que apresenta um erro máximo de medição de 0,7 μm para os eixos x, y e z.

Figura 35 – Máquina de medição por coordenadas Mitutoyo Strato Apex 9166



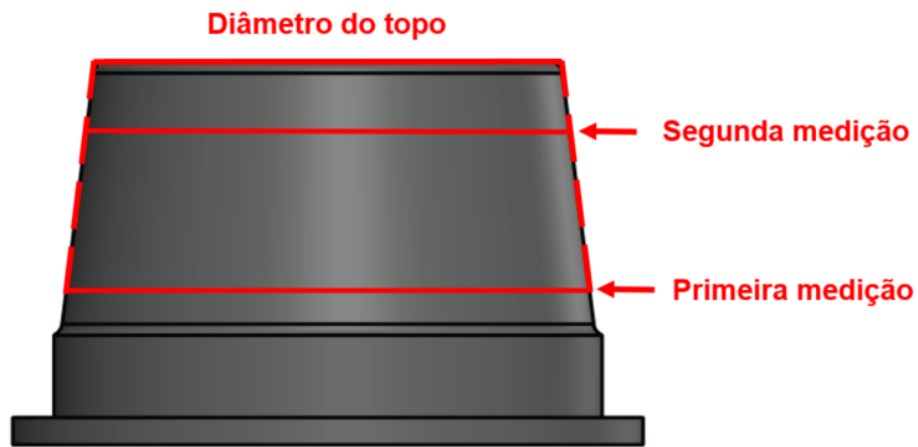
Fonte: Autor (2023).

Para a análise dimensional dos moldes produzidos por FFF e dos produtos termoformados, foram efetuadas medições no diâmetro do topo (\varnothing_T) e diâmetro da base (\varnothing_B), bem como na altura. Todas as dimensões foram medidas com base em seus valores nominais, previamente definidos na primeira fase do trabalho. Para cada dimensão, foram realizadas três medições, a partir das quais foram calculadas a média e o desvio padrão

Para o diâmetro da base, foram registrados quatro pontos distintos a fim de medir as coordenadas em cada um deles. Quanto à altura, foram registrados quatro pontos no diâmetro do topo e outros quatro na mesa de medição, obtendo a medida correspondente.

Já para realizar as medições no diâmetro do topo, foi empregado o método ilustrado na Figura 36. Na superfície lateral do molde que apresenta um ângulo ao longo de sua altura, foram realizadas duas medições distintas ao longo do diâmetro, indicadas pelas linhas cheias. Essas medições permitiram que o *software* projetasse um cone direcionado ao infinito, representado pelas linhas tracejadas. O cone foi limitado pelo valor da altura do molde, resultando no diâmetro do topo, representado pela linha cheia na parte superior.

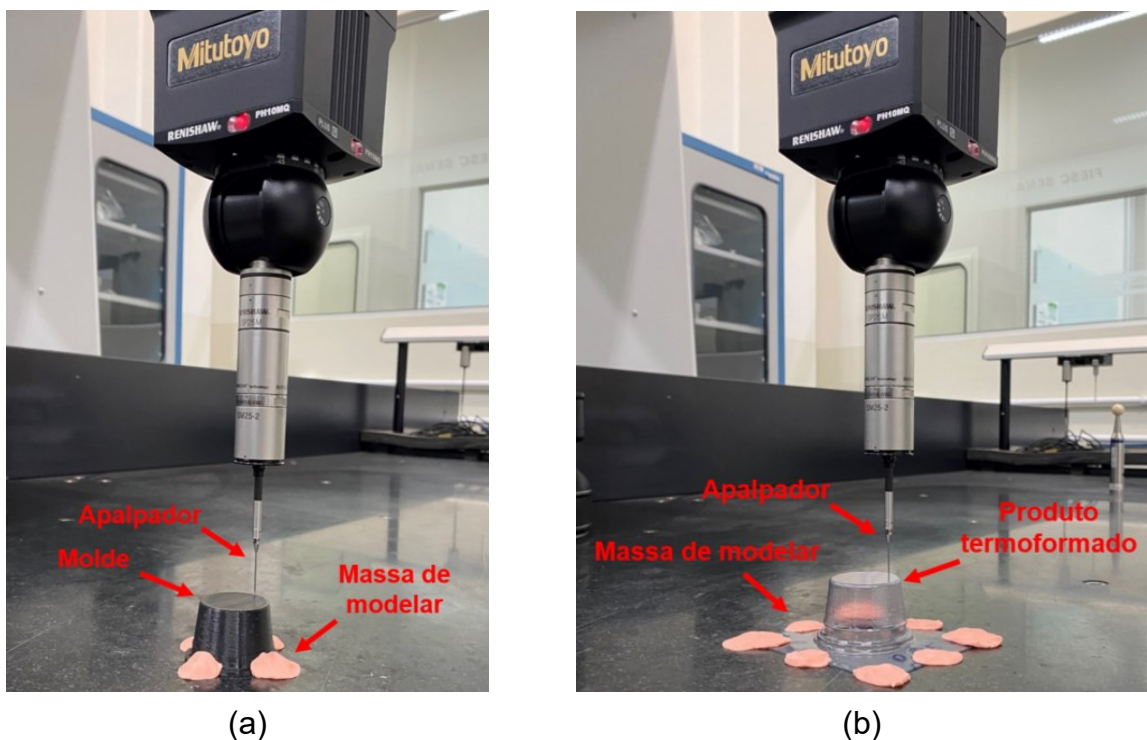
Figura 36 – Ilustração do método adotado para medição no diâmetro do topo dos moldes e produtos termoformados



Fonte: Autor (2023).

A Figura 37 ilustra a fixação adotada para os moldes e para os produtos termoformados. Em ambos os casos foram utilizados massa de modelar para garantir a fixação na mesa de granito, seguindo recomendação do corpo técnico onde a medição foi realizada.

Figura 37 – Ilustração da fixação dos moldes (a) e dos produtos termoformados (b) para análise dimensional



Fonte: Autor (2023).

4.3.3 Ensaio de rugosidade

Os ensaios de rugosidade foram realizados utilizando o rugosímetro Taylor Hobson Form Talysurf 60 (Figura 38), disponibilizado no Instituto Senai de Inovação em Manufatura e Processamento a Laser, situada em Joinville – Santa Catarina. As medições foram realizadas utilizando um apalpador padrão com ponta de diamante de 2 μm de diâmetro, utilizando igualmente massa de modelar para fixação das peças na mesa de granito do equipamento.

Figura 38 – Rugosímetro Taylor Hobson Form Talysurf 60



Fonte: Autor (2023).

Os valores medidos foram avaliados sob as condições das normas ISO 4287:2002 e ISO 4288:2008, dos quais são definidos os parâmetros de rugosidade e os métodos para medição utilizando instrumento de apalpação.

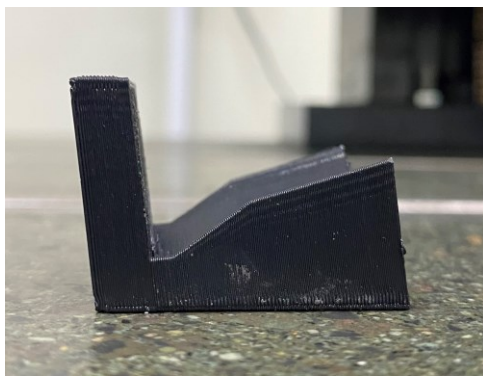
O equipamento foi empregado para medir os perfis primários de rugosidade. Em seguida, os perfis foram extraídos e analisados no *software TalyProfile Silver 8.2*, também da *Taylor Hobson*, a fim de se obter os valores de rugosidade R_a , R_t e R_{Sm} .

Com isso, definiu-se a direção de medição de rugosidade, a qual foi determinada como perpendicular à direção do filamento depositado. As medições de rugosidade foram realizadas na superfície lateral e na superfície do topo, tanto para os moldes como para os produtos termoformados. No caso dos moldes, as

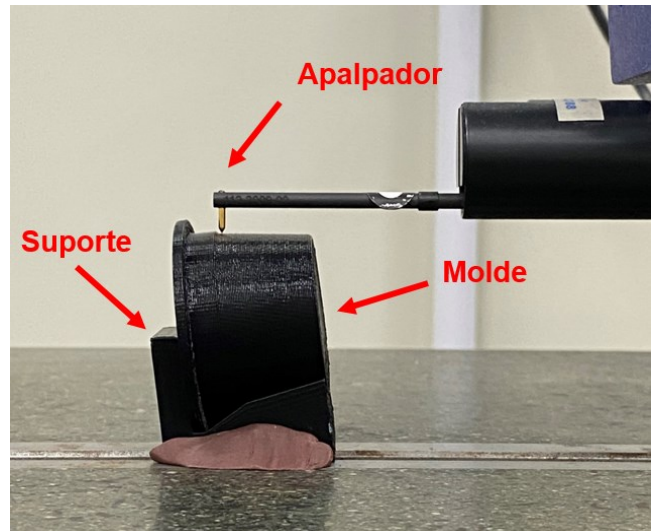
medições de rugosidade foram realizadas antes e após dez ciclos de termoformagem à vácuo. Já para os produtos termoformados, as medições foram nos produtos do primeiro e décimo ciclo. Em cada superfície de avaliação foram realizadas cinco medições para o cálculo da média e do desvio padrão.

Para possibilitar as medições de rugosidade na superfície lateral do molde, foi fabricado por FFF um suporte com geometria específica, conforme indicado na Figura 39, assegurando que a superfície lateral fosse mantida perpendicular em relação ao apalpador durante as medições.

Figura 39 – Suporte utilizado para apoio dos moldes (a) e sistema de medição (apalpador) posicionado em relação a superfície lateral do molde durante as medições de rugosidade lateral (b)



(a)

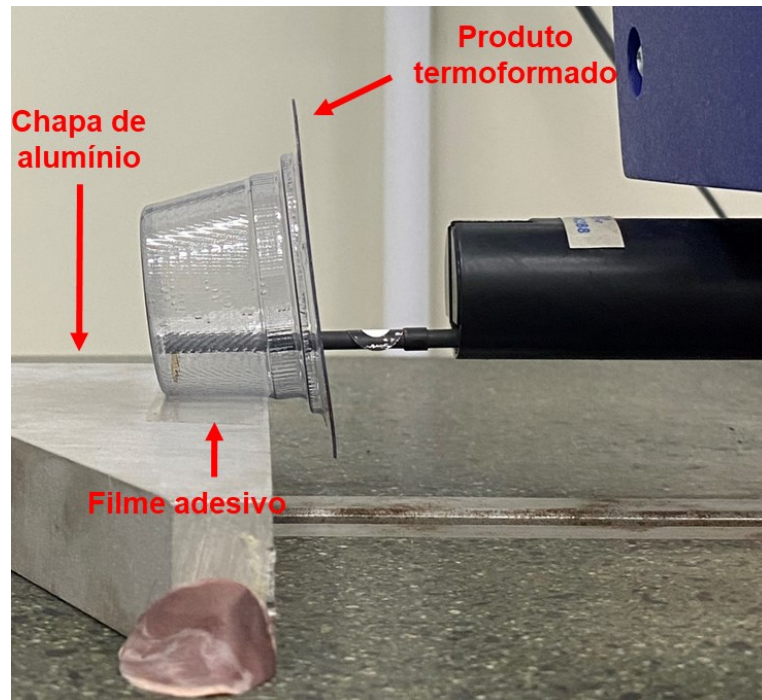


(b)

Fonte: Autor (2023).

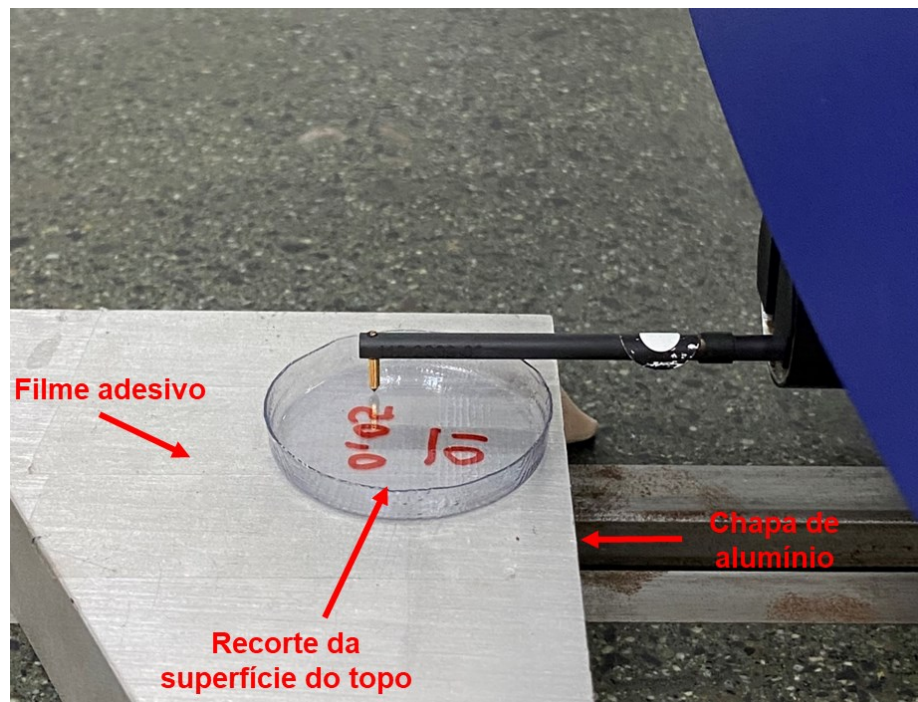
Para medir a rugosidade interna dos produtos termoformados, a superfície do topo precisou ser recortada para permitir que o apalpador percorresse a região de avaliação. A fixação para realizar a medição foi realizada utilizando uma chapa de alumínio de superfície plana, massa de modelar para fixa-la e filme adesivo transparente de dupla face para fixar o produto termoformado na chapa de alumínio. A Figura 40 e a Figura 41 mostram como a fixação para as medições nas superfícies laterais e nas superfícies dos topos dos produtos termoformados, respectivamente, foram realizadas. Para ambos os casos, a superfície plana da chapa de alumínio foi utilizada como base.

Figura 40 – Ilustração da fixação e posicionamento dos produtos termoformados em relação ao apalpador para medição de rugosidade na superfície lateral



Fonte: Autor (2023).

Figura 41 – Ilustração da fixação e posicionamento dos produtos termoformados em relação ao apalpador para medição de rugosidade na superfície do topo



Fonte: Autor (2023).

5 RESULTADOS

5.1 AVALIAÇÃO QUALITATIVA DOS MOLDES FABRICADOS POR FFF

As vistas laterais (coluna da esquerda) e superiores (coluna da direita) dos moldes fabricados por FFF, para diferentes espessuras de camadas empregadas no trabalho, são apresentadas na Figura 42.

Figura 42 – Vista lateral e vista superior dos moldes fabricados para as três espessuras de camadas empregadas



Fonte: Autor (2023).

Conforme observado e esperado, à medida que a espessura da camada aumentou, os moldes apresentaram um pior acabamento superficial. Ao analisar as imagens da Figura 42, tanto na vista lateral quanto na vista superior, é possível notar que as regiões de contato entre as camadas depositadas diminuiu à medida que a espessura da camada foi aumentada, resultando em um espaço maior entre as camadas (conforme mencionado na revisão da literatura e ilustrada na Figura 16).

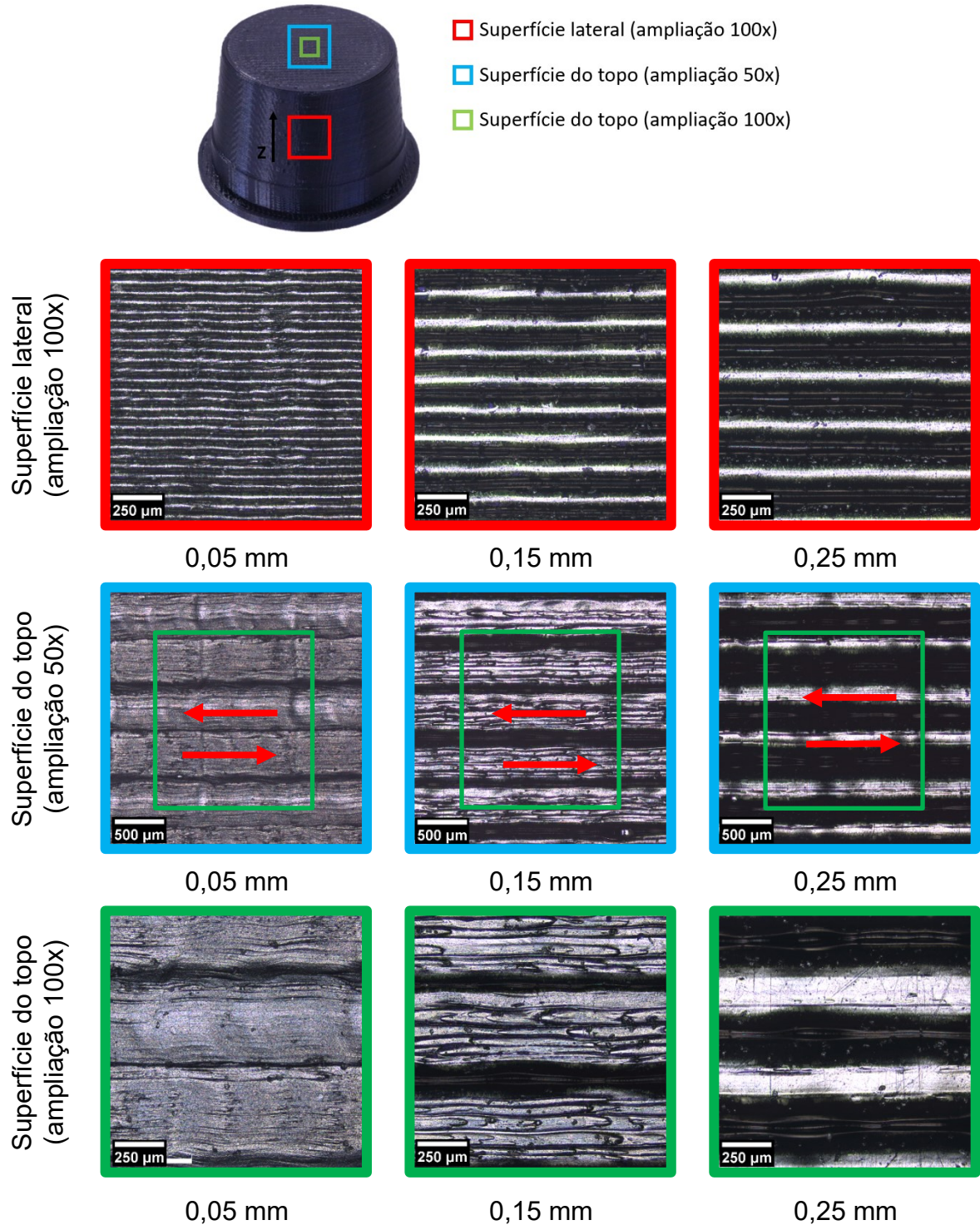
Um outro aspecto relevante a se considerar é o brilho dos moldes. O molde que possui uma espessura de camada de 0,05 mm apresenta um aspecto mais opaco em comparação aos demais, que são mais brilhantes. Essa diferença de brilho pode ser atribuída à dispersão da luz, na qual é possível visualizar o formato elíptico (curvatura) dos filamentos depositados nas camadas mais espessas.

Na Figura 43 são apresentadas imagens das superfícies laterais e superfícies dos topos dos moldes, ampliadas em 50 e 100 vezes, realizada antes da termoformagem à vácuo. As imagens foram obtidas utilizando o microscópio confocal Olympus (OLS4000), para os três valores de espessuras de camada. As imagens mostram regiões escuras e regiões claras. As regiões escuras referem-se as regiões profundas (vales) enquanto as regiões mais claras, referem-se as regiões mais altas (picos) da superfície em análise.

Nas imagens das superfícies laterais (Figura 43), é possível analisar as camadas depositadas no eixo Z de fabricação, em um ponto específico do molde. As imagens também mostram regiões claras e regiões com manchas escuras verticais e linhas escuras predominantemente horizontais indicando presença de pequenas irregularidades na formação das espessuras das camadas. Essas irregularidades são mais visíveis na imagem que representa a espessura de camada de 0,05 mm.

Já nas imagens das superfícies de topo (Figura 43), especialmente com ampliação de 50x, é possível visualizar a direção na qual o filamento foi depositado. Além disso, as imagens evidenciaram também as características geométricas do filamento depositado.

Figura 43 – Imagens obtidas no microscópio confocal das superfícies laterais e dos topos dos moldes fabricados por FFF em suas respectivas espessuras de camada 0,05 mm, 0,15 mm e 0,25 mm



Fonte: Autor (2023).

As imagens da superfície do topo para a espessura de camada de 0,05 mm apresentaram uma qualidade superior, possivelmente atribuída ao maior

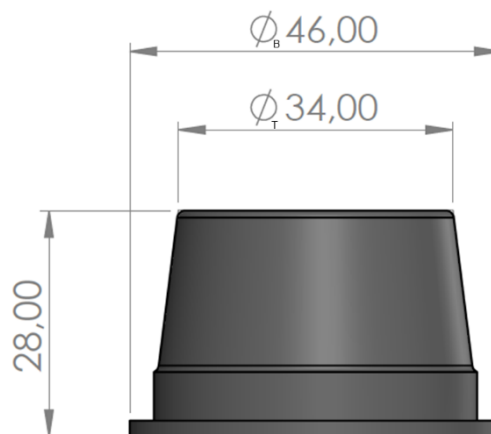
"achatamento" das camadas, evidenciadas pelas menores larguras das regiões escuras, quando comparadas com as imagens referentes as espessuras de 0,15 mm e 0,25 mm. No caso da espessura de camada 0,15 mm, é possível visualizar irregularidades ao longo do filamento depositado. Em todas as imagens das superfícies de topo, também é possível observar a sobreposição (*overlap*) dos filamentos depositados, indicadas pelas diversas regiões escuras (predominantemente mediante a formação de linhas horizontais, mais visíveis para as espessuras maiores).

Essas irregularidades podem ser atribuídas em decorrência da dificuldade de controlar a viscosidade e a contração do material ABS no resfriamento do filamento após ter sido depositado durante a fabricação dos moldes, especialmente para as espessuras maiores que resultaram em um menor achatamento entre as camadas.

5.2 ANÁLISE DIMENSIONAL DOS MOLDES ANTES E APÓS DEZ CICLOS DE TERMOFORMAGEM À VÁCUO

A análise dimensional dos moldes foi realizada antes e após dez ciclos de termoformagem a vácuo, com finalidade de avaliar se houve deformações em pontos específicos dos moldes. A Figura 44 apresenta as dimensões nominais das regiões que foram efetuadas as medições para cada molde, quais sejam: diâmetro do topo (\varnothing_T) = 34 mm, diâmetro da base (\varnothing_B) = 46 mm e altura = 28 mm.

Figura 44 – Dimensões nominais avaliadas no molde



Fonte: Autor (2023).

As Tabela 7 e Tabela 8 apresentam os valores médios medidos nos moldes para o diâmetro do topo (\varnothing_T), diâmetro da base (\varnothing_B) e altura, para cada espessura de camada. Três medições foram realizadas para cada cota, com a média e o desvio padrão.

Tabela 7 – Análise dimensional dos moldes antes da termoformagem à vácuo

Espessura de camada	0,05 mm	0,15 mm	0,25 mm
\varnothing_T (mm)	33,957 ± 0,020	33,958 ± 0,015	33,975 ± 0,016
\varnothing_B (mm)	45,805 ± 0,025	45,828 ± 0,027	45,857 ± 0,016
Altura (mm)	27,828 ± 0,028	27,792 ± 0,027	27,810 ± 0,023

Fonte: Autor (2023).

Tabela 8 – Análise dimensional dos moldes após dez ciclos de termoformagem à vácuo

Espessura de camada	0,05 mm	0,15 mm	0,25 mm
\varnothing_T (mm)	33,961 ± 0,018	33,935 ± 0,024	33,966 ± 0,017
\varnothing_B (mm)	45,799 ± 0,016	45,830 ± 0,019	45,846 ± 0,024
Altura (mm)	27,839 ± 0,046	27,780 ± 0,024	27,801 ± 0,017

Fonte: Autor (2023).

Os resultados das análises dimensionais revelaram que, considerando os desvios padrões das medições, não houve diferença significativa entre os valores medidos antes e após dez ciclos de termoformagem à vácuo. Independente da espessura de camada, todos eles apresentaram valores médios aproximados de $\varnothing_T = 33,9$ mm, $\varnothing_B = 45,8$ mm e altura 27,8 mm.

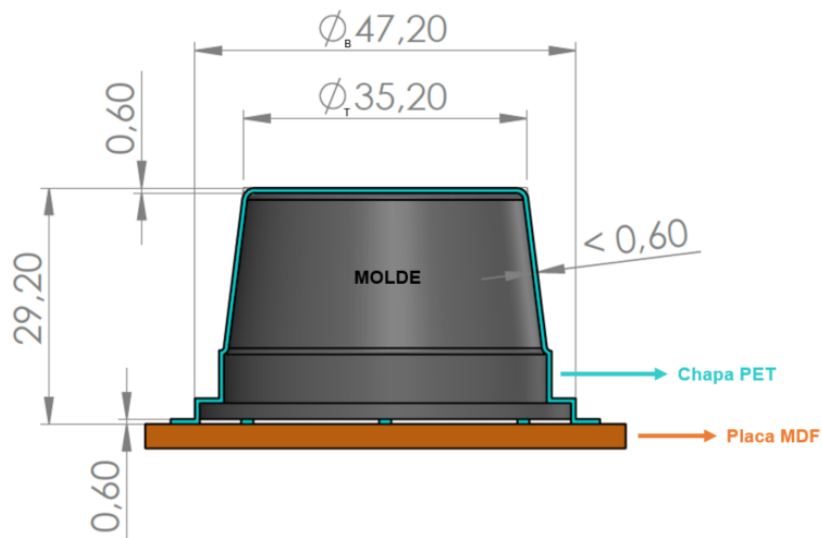
Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que, após dez ciclos de termoformagem, o molde não apresentou deformações nas regiões medidas. Além disso, constatou-se que a espessura da camada não exerceu influência significativa nas dimensões do molde, quando comparadas entre si.

Todos os valores medidos resultaram menores que os valores nominais especificados no projeto do molde, evidenciando a presença dos efeitos de contração, provavelmente do material ABS durante o processo de fabricação por FFF, mencionados no item 5.1.

5.3 ANÁLISE DIMENSIONAL DOS PRODUTOS TERMOFORMADOS

A Figura 45 representa o produto termoformado, exibindo suas dimensões teóricas correspondentes. Em teoria, ao considerar uma chapa de PET com 0,6 mm de espessura, o diâmetro nominal teórico do topo (\varnothing_T) e da base (\varnothing_B) aumentariam em 1,2 mm. Para auxiliar a evacuação do ar durante a fixação dos moldes na placa de MDF, pequenos recortes de chapa de PET com 0,6 mm de espessura foram colados na parte inferior do molde, criando um espaço adicional entre o molde e a placa de MDF. Como resultado, a altura também seria aumentada em 1,2 mm.

Figura 45 – Dimensões teóricas do produto termoformado



Fonte: Autor (2023).

As Tabela 9 e Tabela 10 apresentam os valores médios medidos para o diâmetro do topo (\varnothing_T), diâmetro da base (\varnothing_B) e altura de cada produto termoformado para as diferentes espessuras de camada do molde, correspondentes ao primeiro e décimo ciclo de termoformagem, respectivamente. Três medições foram realizadas em cada cota, com média e desvio padrão. É importante destacar que os valores médios medidos se encontram acima do valor nominal em virtude da espessura de 0,6 mm da chapa de PET utilizada no processo de termoformagem à vácuo.

Tabela 9 – Análise dimensional dos produtos termoformados (primeiro ciclo)

Espessura de camada	0,05 mm	0,15 mm	0,25 mm
\varnothing_T (mm)	34,239 ± 0,041	34,236 ± 0,040	34,242 ± 0,033
\varnothing_B (mm)	46,585 ± 0,041	46,698 ± 0,018	46,725 ± 0,033
Altura (mm)	29,290 ± 0,064	29,185 ± 0,038	29,275 ± 0,070

Fonte: Autor (2023).

Tabela 10 – Análise dimensional dos produtos termoformados (décimo ciclo)

Espessura de camada	0,05 mm	0,15 mm	0,25 mm
\varnothing_T (mm)	34,247 ± 0,042	34,256 ± 0,057	34,213 ± 0,017
\varnothing_B (mm)	46,599 ± 0,024	46,703 ± 0,009	46,776 ± 0,023
Altura (mm)	29,314 ± 0,040	29,219 ± 0,022	29,284 ± 0,034

Fonte: Autor (2023).

Considerando os desvios padrões das medições realizadas no primeiro e décimo ciclo para cada espessura de camada, é possível afirmar que não houve diferença significativa nos resultados obtidos das medições realizadas nos produtos termoformados entre os ciclos.

Conforme mencionado na revisão bibliográfica, diferentes áreas do produto termoformado apresentam níveis distintos de estiramento resultantes do processo de termoformagem à vácuo, especialmente ao longo da espessura lateral dos produtos termoformados. Para tentar quantificar essa diferença, a Tabela 11 mostra as disparidades entre os valores médios medidos nos produtos termoformados no primeiro ciclo e os valores médios medidos nos moldes antes da termoformagem a vácuo, para cada espessura de camada.

Tabela 11 – Diferença entre os valores médios medidos nos produtos termoformados do primeiro ciclo e os valores médios medidos nos moldes antes da termoformagem à vácuo

Espessura de camada	0,05 mm	0,15 mm	0,25 mm
Diferença no \varnothing_T (mm)	0,282	0,278	0,267
Diferença no \varnothing_B (mm)	0,780	0,870	0,868
Diferença na Altura (mm)	1,462	1,393	1,465

Fonte: Autor (2023).

Observou-se uma redução significativa nos valores médios medidos para o diâmetro de topo (\varnothing_T) em comparação com os demais, resultando na espessura final do produto nessa região em torno de 0,16 mm. Essa redução era esperada, uma vez que o diâmetro do topo é a primeira região do molde que entra em contato com a chapa e inicia o estiramento reduzindo a sua espessura original. A diferença encontrada no diâmetro da base (\varnothing_B) refletiu na espessura final do produto nessa região em torno de 0,4 mm. Quanto à diferença na altura, ela foi superior ao valor teórico estabelecido de 1,2 mm. Essa diferença foi aproximadamente 0,2 mm acima do previsto. É possível que esse resultado possa ter sido afetado pela presença de resíduos de cola, utilizada para fixar os recortes na superfície inferior do molde e na placa de MDF.

5.4 ENSAIO DE RUGOSIDADE NOS MOLDES FABRICADOS POR FFF

O ensaio de rugosidade foi conduzido antes e após dez ciclos de termoformagem à vácuo, com objetivo de avaliar se as superfícies dos moldes sofreram deformações ou apresentaram irregularidades após os dez ciclos. Foram selecionados os parâmetros Ra e Rt para avaliar a rugosidade, parâmetros utilizados no estudo de Biglete *et al.* (2020). Além disso, o parâmetro RSm foi selecionado para estabelecer o comprimento de amostragem (*cut-off*).

De acordo com a norma ISO 4288, a definição dos parâmetros de medição da rugosidade está correlacionada à escolha apropriada do comprimento de amostragem (l_e) "*cut-off*". Como o valor de rugosidade é desconhecido, e seguindo recomendações da norma, um valor de comprimento de amostragem foi selecionado arbitrariamente com base na Tabela 1 e o correspondente valor do parâmetro RSm indicado na tabela foi verificado mediante um teste de medição visando confirmar ou não se o valor resultante do teste está compreendido entre os valores indicados na faixa de valores para aquele comprimento de amostragem. Caso o valor não estiver contido na faixa em questão, a partir dele é possível estabelecer um novo valor para o comprimento de amostragem a ser realizado nos ensaios de avaliação.

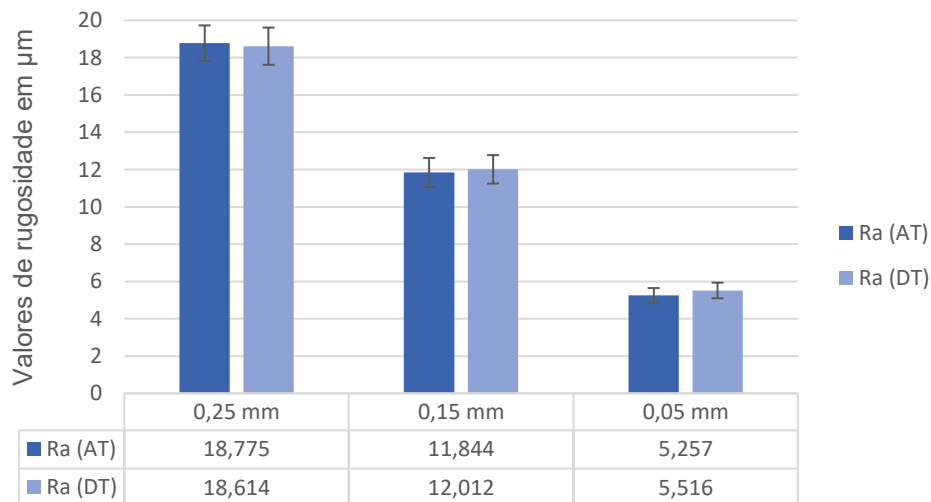
Desta forma, para realizar os ensaios de rugosidade nas superfícies laterais, o comprimento de amostragem foi de $l_e = 0,25$ mm para o molde de espessura de camada de 0,05 mm e $l_e = 0,8$ mm para as demais espessuras. Já nas superfícies

do topo dos moldes, o comprimento de amostragem adequado neste caso foi de $l_e = 2,5$ mm para todas as espessuras de camada. Os comprimentos de amostragem foram iguais para os ensaios realizados antes e após dez ciclos de termoformagem à vácuo. A velocidade de medição do apalpador foi 0,25 mm/s para todos os casos.

A Figura 46 exibe os resultados de Ra e a Figura 47 mostra os resultados de Rt, medidos nas superfícies laterais dos moldes antes e após os ciclos de termoformagem a vácuo. A sigla “AT” representa o termo “Antes da Termoformagem”, enquanto a sigla “DT” representa o termo “Depois da Termoformagem”. Os valores das cinco medições na superfície lateral dos moldes antes e após dez ciclos de termoformagem para cada parâmetro e espessura de camada, com a média e desvio padrão encontram-se no apêndice A.

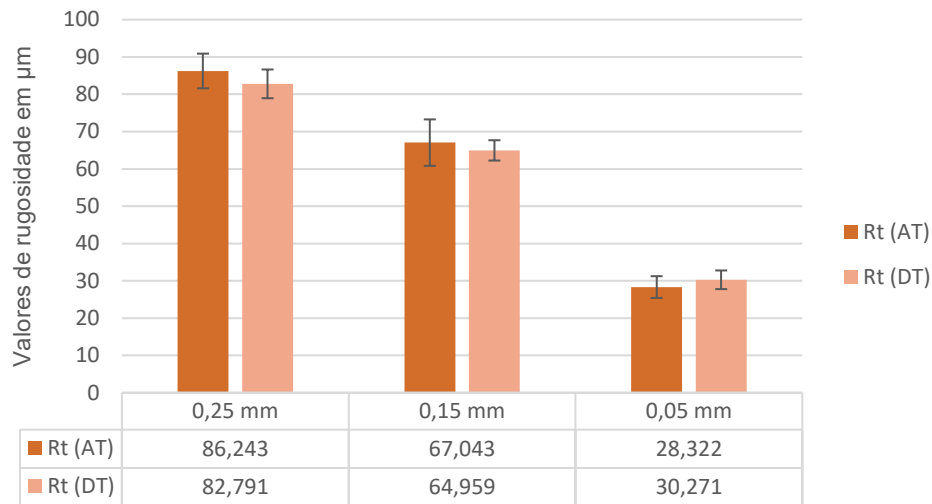
Como esperado, menores valores de espessura da camada resultaram em menores valores de rugosidade Ra e Rt, em decorrência do aumento da qualidade do acabamento superficial do molde, já discutido no item 5.1, avaliação qualitativa dos moldes fabricados por FFF.

Figura 46 – Valores de Ra medidos na superfície lateral dos moldes antes e depois dos ciclos de termoformagem à vácuo



Fonte: Autor (2023).

Figura 47 – Valores de Rt medidos na superfície lateral dos moldes antes e depois dos ciclos de termoformagem à vácuo



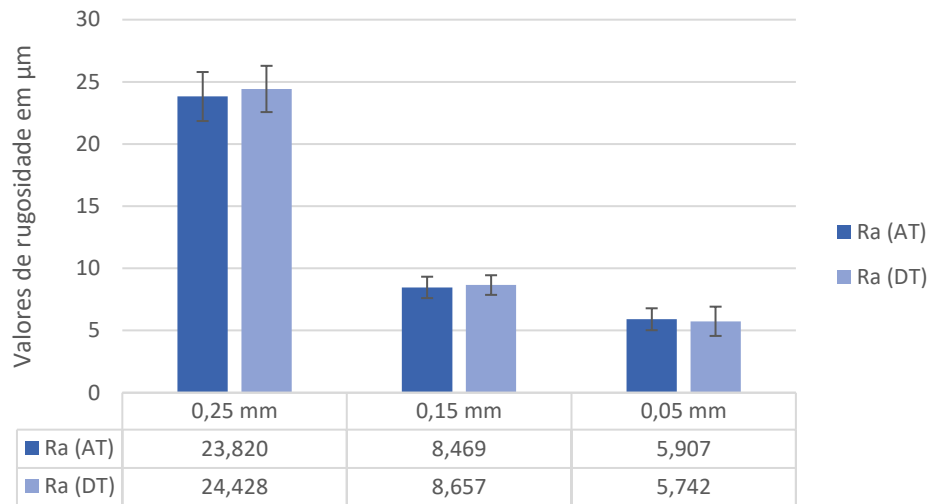
Fonte: Autor (2023).

De maneira geral, considerando os valores médios das medições antes e após os ciclos de termoformagem da superfície lateral dos moldes, verificou-se uma redução de aproximadamente 36% no valor de Ra ao comparar a espessura de camada 0,25 mm com a espessura de camada 0,15 mm. A redução do valor de Ra entre as espessuras de camada 0,15 mm e 0,05 mm foi de aproximadamente 55%. Em relação ao valor de Rt, observou-se uma redução de 22% ao comparar a espessura de camada 0,25 mm com a espessura de camada 0,15 mm e aproximadamente 56% ao comparar as espessuras 0,15 mm e 0,05 mm.

Com base nos valores dos desvios padrões, para cada espessura de camada, os valores de Ra e Rt medidos na superfície lateral dos moldes antes da termoformagem e após o término dos dez ciclos de moldagem, sugerem que não houve deformações significativas na superfície lateral dos moldes após sua utilização nos dez ciclos de termoformagem à vácuo.

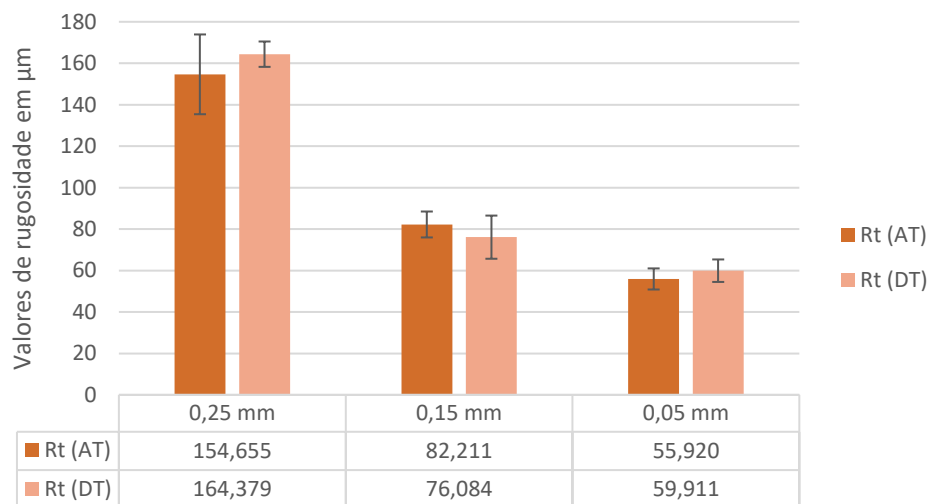
A Figura 48 mostra os resultados de Ra e a Figura 49 apresenta os resultados de Rt, referente a medição na superfície do topo dos moldes antes e após os dez ciclos de termoformagem à vácuo. O apêndice B apresenta os valores das cinco medições na superfície do topo dos moldes antes e após dez ciclos de termoformagem para cada parâmetro e espessura de camada, com a média e desvio padrão.

Figura 48 – Valores de Ra medidos na superfície do topo dos moldes antes e após os ciclos de termoformagem à vácuo



Fonte: Autor (2023).

Figura 49 – Valores de Rt medidos na superfície do topo dos moldes antes e após os ciclos de termoformagem à vácuo



Fonte: Autor (2023).

Considerando os valores médios das medições de rugosidade da superfície do topo dos moldes antes e após os ciclos de termoformagem, foi constatado uma redução de aproximadamente 64% no valor de Ra ao comparar a espessura de camada 0,25 mm com a espessura de camada 0,15 mm e uma redução de 32% no valor de Ra entre as espessuras de camada 0,15 mm e 0,05 mm. Em relação ao valor de Rt, verificou-se uma redução de aproximadamente 50% comparando as

espessuras de camada 0,25 mm e 0,15 mm e uma redução de 27% comparando as espessuras de camada 0,15 mm e 0,05 mm.

Com base nos valores dos desvios padrões das medições realizadas em cada espessura de camada, os valores de Ra e Rt medidos na superfície do topo dos moldes antes e após os dez ciclos de termoformagem sugerem alterações insignificantes na qualidade das superfícies após o término dos ciclos de termoformagem. Para todas espessuras de camada, os resultados de rugosidade mostraram que na superfície do topo, os valores de Ra e Rt, foram todos superiores que os obtidos na superfície lateral.

Os resultados obtidos para a espessura de camada 0,25 mm apresentaram maiores valores de Ra e Rt, possivelmente por conta da diminuição da região de contato entre os filamentos depositados, evidenciando mais os picos e os vales presentes na superfície, como já discutido no item 5.1, avaliação qualitativa dos moldes fabricados por FFF.

Os valores de Ra e Rt obtidos para a espessura de camada 0,25 mm, foram similares aos relatados pelos autores Biglete *et al.* (2020) e Parada; Mayuet; Gámez, (2019), mencionados na revisão da literatura, sugerindo a mesma faixa de valores, apesar do emprego de diferentes tipos de impressoras 3D.

A título de ilustração, no apêndice C é apresentado o resultado de uma medição de perfil de rugosidade para cada espessura de camada, da superfície lateral e superfície do topo dos moldes antes da termoformagem à vácuo, extraído do *software TalyProfile Silver 8.2*.

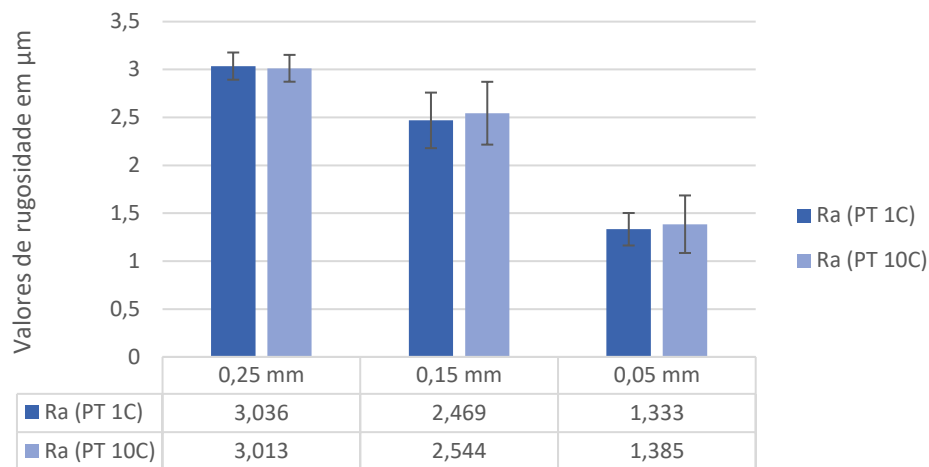
5.5 ENSAIO DE RUGOSIDADE NOS PRODUTOS TERMOFORMADOS

Seguindo a mesma sistemática utilizada para medição de rugosidade nos moldes fabricados por FFF, foram realizados ensaios de rugosidade nas superfícies internas dos produtos termoformados do primeiro e décimo ciclo.

Nas superfícies laterais, o comprimento de amostragem considerado adequado para realizar as medições de rugosidade foi de $\ell_e = 0,8$ mm para todas as espessuras de camada. Nas superfícies dos topos dos produtos termoformados do primeiro e décimo ciclo foi de $\ell_e = 2,5$ mm, igualmente para todas as espessuras de camada. A velocidade de medição do apalpador foi mantida em 0,25 mm/s.

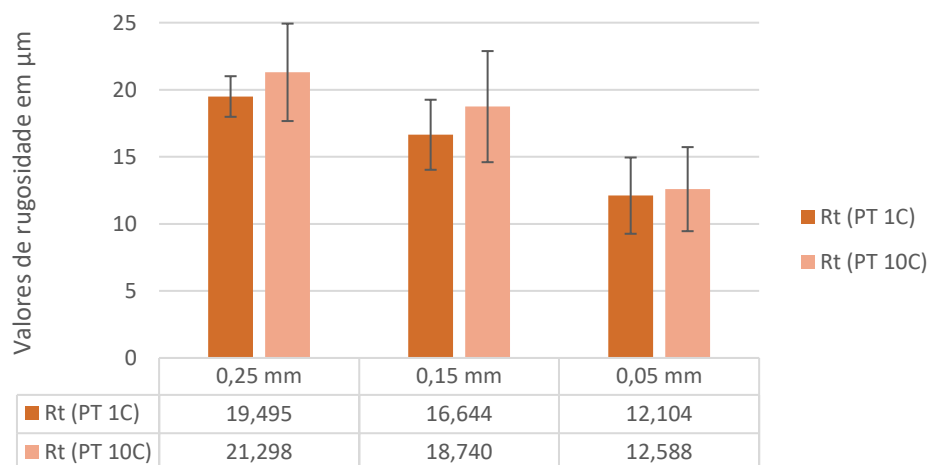
A Figura 50 apresenta os resultados de Ra e a Figura 51 exibe os resultados de Rt, medidos na superfície lateral dos produtos termoformados do primeiro e décimo ciclo. A sigla “PT 1C” representa o termo “Produtos Termoformados do Primeiro Ciclo”, enquanto a sigla “PT 10C” representa o termo “Produtos Termoformados do Décimo Ciclo”. O apêndice D apresenta os valores das cinco medições na superfície lateral dos produtos termoformados no primeiro e décimo ciclo de termoformagem para cada parâmetro e espessura de camada, com a média e desvio padrão.

Figura 50 – Valores de Ra medidos na superfície lateral dos produtos termoformados do primeiro ciclo e décimo ciclo



Fonte: Autor (2023).

Figura 51 – Valores de Rt medidos na superfície lateral dos produtos termoformados do primeiro ciclo e décimo ciclo



Fonte: Autor (2023).

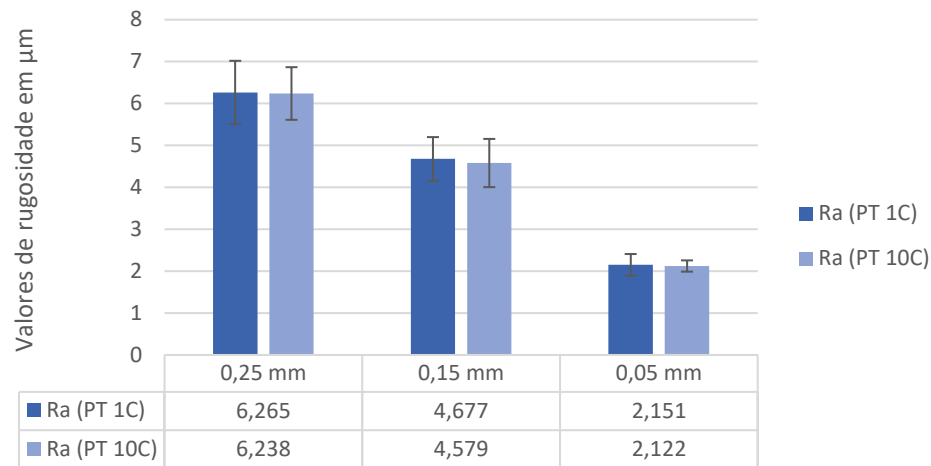
Durante o processo de moldagem, desvios de planeza nas superfícies dos moldes representam um desafio ao tentar controlar a rugosidade dos produtos termoformados.

Observando os valores médios de R_a das medições de rugosidade da superfície lateral dos produtos termoformados do primeiro e décimo ciclo da Figura 50, foi observado uma redução de aproximadamente 17% ao comparar os produtos termoformados nos moldes com as espessuras de camada 0,25 mm e 0,15 mm e uma redução de 46% no valor de R_a quando comparado os produtos termoformados nos moldes com espessuras de camada 0,15 mm e 0,05 mm. Analisando os valores médios de R_t da Figura 51, observou uma redução em torno de 13% quando comparado os produtos termoformados nos moldes com as espessuras de camada 0,25 mm e 0,15 mm e uma redução de aproximadamente 30% ao comparar os produtos termoformados nos moldes com as espessuras de camada 0,15 mm e 0,05 mm.

Ao analisar todas as espessuras de camada, é possível observar uma redução nos valores de R_a medidos na superfície lateral dos produtos termoformados em relação aos valores de R_a resultantes na superfície lateral dos moldes. Considerando os valores médios de R_a , constatou-se uma redução percentual aproximadamente de 75% para a espessura de camada 0,05 mm, 79% para a espessura de camada 0,15 mm e 84% para a espessura de camada 0,25 mm. A redução dos valores de R_t medidos na superfície lateral dos produtos termoformados com os valores de R_t resultante na superfície lateral dos moldes, foi em torno de 58% para a espessura de camada 0,05 mm, 73% para a espessura de camada 0,15 mm e 76% para espessura de camada 0,25 mm.

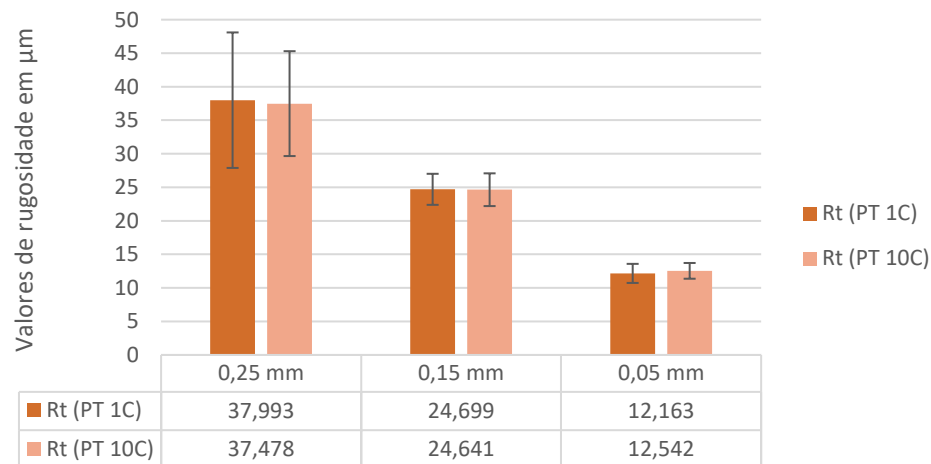
A Figura 52 exhibe os resultados de R_a e a Figura 53 apresenta os resultados de R_t , das medições realizadas na superfície do topo dos produtos termoformados do primeiro e décimo ciclo. O apêndice E apresenta os valores das cinco medições na superfície do topo dos produtos termoformados no primeiro e décimo ciclo de termoformagem para cada parâmetro e espessura de camada, com a média e desvio padrão.

Figura 52 – Valores de Ra medidos na superfície do topo dos produtos termoformados do primeiro ciclo e décimo ciclo



Fonte: Autor (2023).

Figura 53 – Valores de Rt medidos na superfície do topo dos produtos termoformados do primeiro ciclo e décimo ciclo



Fonte: Autor (2023).

Observando os valores médios de Ra das medições de rugosidade da superfície do topo dos produtos termoformados no primeiro e décimo ciclo da Figura 52, constatou-se uma redução de aproximadamente 26% ao comparar os produtos termoformados nos moldes com as espessuras de camada 0,25 mm e 0,15 mm e uma redução de 54% no valor de Ra quando comparado os produtos termoformados nos moldes com espessuras de camada 0,15 mm e 0,05 mm. Para os valores médios de Rt da Figura 53, houve uma redução em torno de 35% quando comparado os produtos termoformados nos moldes com as espessuras de camada

0,25 mm e 0,15 mm e uma redução de aproximadamente 50% ao comparar os produtos termoformados nos moldes com as espessuras de camada 0,15 mm e 0,05 mm.

Observou-se também uma redução proporcional do valor de Ra da superfície do topo dos produtos termoformados em relação à superfície do topo dos moldes. Essa redução foi de aproximadamente 63% para uma espessura de camada de 0,05 mm, 46% para uma espessura de camada de 0,15 mm e 74% para uma espessura de camada de 0,25 mm. Para o valor de Rt, essa diferença foi de 79% para espessura de camada 0,05 mm, 69% para espessura de camada 0,15 mm e 76% para espessura de camada 0,25 mm.

A título de ilustração, no apêndice F é apresentado uma medição de perfil de rugosidade para cada espessura de camada, da superfície lateral e superfície do topo dos produtos termoformado do primeiro ciclo, extraído do *software TalyProfile Silver 8.2*.

Apesar de envolver equipamentos e parâmetros diferentes, Parada *et al.* (2019) obtiveram valores de Ra médio variando entre 4,3 μm a 5,8 μm , na superfície externa dos produtos termoformados em PET sobre moldes em ABS. Neste trabalho, ao reduzir a espessura de camada, os valores médios de Ra na superfície lateral e superfície do topo foram inferiores aos valores encontrados pelos autores. Vale ressaltar que as medições deste trabalho foram realizadas na superfície interna dos produtos termoformados, que entram em contato direto com as superfícies dos moldes. Os valores médios de Ra da superfície lateral e superfície do topo variaram entre 2,4 μm e 4,6 μm para espessura de camada 0,15 mm e entre 1,3 μm e 2,1 μm para espessura de camada 0,05 mm.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

Ao reduzir as espessuras das camadas durante a fabricação dos moldes, observou-se uma redução nos valores de rugosidade. Para a espessura de camada de 0,25 mm, os valores aproximados de R_a ficaram entre 18,5 μm e 24 μm , enquanto para a espessura de camada 0,15 mm ficaram entre 8,5 μm e 12 μm . Para a espessura de camada 0,05 mm, houve uma redução ainda maior, ficando em torno de 5,3 μm e 5,8 μm . Essas reduções nos valores de rugosidade tiveram um impacto correspondente nos produtos termoformados obtidos.

Os resultados da análise qualitativa das superfícies dos moldes por meio do microscópio confocal revelaram uma redução nas regiões de contato entre os filamentos depositados à medida que a espessura da camada foi aumentada. Ao utilizar o *overlap* de 20%, os espaços (vales) entre os filamentos depositados tiveram um aumento significativo quando o molde foi fabricado com a espessura de camadas 0,25 mm.

Com base nas análises dimensionais realizadas nos moldes, utilizando esse conjunto específico de parâmetros e impressora, é possível afirmar que a espessura da camada não exerceu influência significativa nas dimensões do molde fabricado. Os resultados das análises dimensionais realizadas tanto antes quanto após os dez ciclos de termoformagem demonstraram que, considerando os desvios padrões, os valores médios medidos das dimensões avaliadas não sofreram variação. Com isso, é possível afirmar que o molde resistiu aos ciclos propostos sem sofrer deformações.

A análise dimensional dos produtos termoformados evidenciaram que estes apresentaram diferentes níveis de estiramento em diferentes regiões do molde, fenômeno difícil de controlar no processo de termoformagem à vácuo. Os valores médios medidos nos produtos termoformados, tanto no primeiro quanto no décimo ciclo de termoformagem nos moldes de diferentes espessuras de camada, permaneceram na mesma faixa de valores, não apresentando diferenças significativas entre si. As medições da altura do produto termoformado, resultaram em valores superiores aos esperados, podendo ser justificados pela presença de resíduos da cola utilizada para fixação dos recortes na superfície inferior do molde e na placa de MDF.

Nos moldes fabricados por FFF, tanto na superfície lateral quanto na superfície de topo, menores espessuras de camada resultaram em menores valores de rugosidade Ra e Rt, com os maiores valores obtidos na superfície do topo. Os dez ciclos de moldagem aos quais os moldes de ABS foram submetidos, não afetaram os valores de rugosidade, que se mantiveram dentro das mesmas faixas de valores para cada espessura de camada utilizada na fabricação dos moldes. Essa mesma situação foi observada nas análises de rugosidade nos produtos termoformados em PET. Além disso, os resultados mostraram uma diminuição do valor de rugosidade dos produtos termoformados quando foi utilizada uma espessura de camada menor para a fabricação do molde por FFF resultando em valores de Ra de 2,1 μm , tipicamente encontrados em superfícies metálicas obtidas por processos de usinagem em geral, ao fabricar o molde com espessura de camada 0,05 mm. No entanto, o tempo médio necessário para fabricação do respectivo molde, foi de quatro vezes maior que o do molde de 0,15 mm de espessura de camada. A diferença de rugosidade entre os produtos termoformados nas espessuras de camada 0,15 mm e 0,25 mm foram pequenas e a diferença de tempo de impressão entre os moldes foi de 32 min.

Por fim, neste estudo foi comprovado que é possível obter valores de rugosidade reduzidos tanto no molde quanto no produto termoformado ao utilizar espessuras de camada inferiores a 0,2 mm. Neste contexto, a escolha da espessura de camada a ser utilizada na fabricação do molde deve resultar de uma relação de compromisso entre a qualidade desejada para o produto termoformado e o tempo de fabricação do molde por FFF.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar a qualidade superficial de moldes fabricados por FFF para termoformagem à vácuo, comparando resultados para diferentes tipos de materiais do molde e das chapas poliméricas;
- Avaliar o acabamento superficial de moldes fabricados por FFF para termoformagem à vácuo, realizando acabamento com vapor de acetona;
- Avaliar a influência do número de ciclos de moldagem na qualidade das superfícies do molde fabricado por FFF e dos produtos termoformados, visando compreender o comportamento térmico dos materiais durante o processo de termoformagem.
- Investigar a influência de outros parâmetros do processo de impressão por FFF na qualidade das superfícies do molde e produtos obtidos por termoformagem à vácuo.

REFERÊNCIAS

3D Fila (Soluções em impressão 3D). Disponível em: <www.3dfila.com.br/categoria-produto/imprensa-3d/imprensa-3d-de-filamento-fdm>. Acesso em: 25 mar. 2023.

ABNT. NBR ISO 4287:2002. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade : Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. **Nbr Iso 4287**, p. 18, 2002.

ABNT. NBR ISO 4288:2008. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade : Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. **Nbr Iso 4288**, p. 16, 2008.

ABNT. NBR ISO 6405:1988. Rugosidade das superfícies. **Nbr Iso 6405**, p. 6, 1988.

ALAIMO, G. et al. Influence of meso-structure and chemical composition on FDM 3D-printed parts. **Composites Part B: Engineering**, v. 113, p. 371–380, 2017.

BECKERT, Suelf F. et al. **Contribuições para utilização das normas atualizadas de rugosidade.** Conem, 2012.

BELOFSKY, H. **Plastics: Product Design and Process Engineering.** 1. ed. Munich, Vienna, New York: Hanser Publishers, 1995.

BIGLETE, E. R. et al. Surface Roughness Analysis of 3D Printed Parts Using Response Surface Modeling. **2020 11th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium, ICSGRC 2020 - Proceedings**, p. 191–196, 2020.

BOCA, M. A.; SLATINEANU, L.; SOVER, A. Development of moulds for thermoforming using FFF additive manufacturing and axiomatic design. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1174, n. 1, p. 012016, 2021.

BOCA, M. A.; SOVER, A.; SLĂTINEANU, L. Theoretical and experimental research on the quality of thermoformed foils using 3D-printed plastic moulds. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1235, n. 1, p. 012065, 2022.

DE ANDRADE, D. C. et al. Construção De Equipamento De Baixo Custo Para Enrolar Filamentos De Impressoras 3D. **Química Nova**, v. 43, n. 4, p. 480–485, 2020.

DIZON, J. R. C. et al. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. **Additive Manufacturing**, v. 20, p. 44–67, 2018.

Grand View Research. Disponível em: <www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-printing-filament-market>. Acesso em: 14 mar. 2022.

GRUENWALD, G. **Thermoforming: a plastics processing guide**. 2. ed. Abingdon UK: Routledge, 2018.

HARTMAN, C. **Benefits of 3D Printing Vacuum Form Molds**. p. 1–5, 2014.

JÚNIOR, Yrurá Garcia. **Análise exploratória da termoformagem a vácuo em embalagens blister por termográfica e análise de regressão**. Universidade do Estado de Minas Gerais, p. 96, 2015.

KLEIN, P. **Fundamentals of plastics thermoforming**. 1. ed. Athens: Morgan and Claypool, 2009.

LOVE, T. S.; VALENZA, F. Utilize Vacuum Forming to Make Interdisciplinary Connections. **Technology and Engineering Teacher**, v. 71, n. 3, p. 30–34, 2011.

MALPAGA, Isaac. **Estudo de caso comparativo de viabilidade técnica e econômica entre processos de termoformagem e injeção plástica**. Faculdade Politécnica de Jundiaí, p.106, 2012.

MURALISRINIVASAN, N.S. **Update on troubleshooting in thermoforming**. 1. ed. United Kingdom, EUA: Smithers Rapra, 2010.

NKOMO, N. et al. A Study of Applications of 3D printing technology and potential applications in the plastic thermoforming industry. **IOSR Journal of Engineering**, v. 07, p. 1–16, 2017.

PARADA, L. R; MAYUET, P. F.; GÁMEZ, A. J. Industrial product design: Study of FDM technology for the manufacture of thermoformed prototypes. **Procedia Manufacturing**, v. 41, p. 587–593, 2019.

Prusa 3D. Disponível em: <www.prusa3d.com/product/original-prusa-i3-mk3s-3d-printer-kit>. Acesso em: 25 mar. 2023.

SERTA, G. V.; ROCHA, J. DOS S. **Termoformadora a Vácuo Automatizada**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, p. 135, 2012.

Silhouette Brasil. Disponível em: <www.loja.silhouettebrasil.com.br/impressora-3d-silhouette-alta-plus-05974-p992138>. Acesso em: 25 mar. 2022.

SILVA, Heron Madeira da. **Desenvolvimento de uma termoformadora compacta para produtos descartáveis**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, p. 142, 2013.

SINGH, R. et al. Investigation for surface finish improvement of FDM parts by vapor smoothing process. **Composites Part B: Engineering**, v. 111, p. 228–234, 2017.

Stratasys Ltd. Disponível em: <www.stratasys.com>. Acesso em: 27 mar. 2022.

THRONE, J. L. **Technology of thermoforming**. 2. ed. New York: Hanser Publications, 1999.

THRONE, J. Thermoforming. In: KUTZ, M. Applied plastics engineering handbook: processing and materials. 1. ed, part III, chapter 19, Waltham, EUA: Elsevier. 2011.

THRONE, J. L. **Understanding thermoforming**. 2. ed. OH: Hanser Publications, 2008.

Ultimaker. Disponível em: <www.ultimaker.com/3d-printers/s-series/ultimaker-s5>. Acesso em: 25 mar. 2022.

VOLPATO, Neri. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D**. 1. ed. [S. l.]: Blucher, 2017.

**APÊNDICE A – RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE NA
SUPERFÍCIE LATERAL DOS MOLDES ANTES E APÓS DEZ CICLOS DE
TERMOFORMAGEM**

Tabela A. 1 – Medições realizadas na superfície lateral do molde com espessura de camada de 0,05 mm, antes da termoformagem à vácuo

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	4,701	5,550	5,440	5,002	5,591	5,257	0,389
Rt (µm)	23,766	27,743	31,307	28,443	30,349	28,322	2,921
RSm (mm)	0,064	0,069	0,066	0,070	0,071	0,068	0,003

Fonte: Autor (2023).

Tabela A. 2 – Medições realizadas na superfície lateral do molde com espessura de camada de 0,15 mm, antes da termoformagem à vácuo

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	12,498	12,821	11,028	11,589	11,286	11,844	0,779
Rt (µm)	70,501	72,230	69,040	66,985	56,458	67,043	6,223
RSm (mm)	0,188	0,178	0,155	0,169	0,151	0,168	0,016

Fonte: Autor (2023).

Tabela A. 3 – Medições realizadas na superfície lateral do molde com espessura de camada de 0,25 mm, antes da termoformagem à vácuo

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	19,025	20,301	17,891	18,153	18,505	18,775	0,953
Rt (µm)	87,832	92,620	79,817	86,155	84,793	86,243	4,653
RSm (mm)	0,250	0,251	0,250	0,249	0,248	0,250	0,001

Fonte: Autor (2023).

Tabela A. 4 – Medições realizadas na superfície lateral do molde com espessura de camada de 0,05 mm, após dez ciclos de termoformagem à vácuo

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	4,949	6,113	5,604	5,378	5,536	5,516	0,420
Rt (µm)	26,217	29,815	30,766	32,062	32,494	30,271	2,502
RSm (mm)	0,064	0,093	0,067	0,068	0,066	0,072	0,012

Fonte: Autor (2023).

Tabela A. 5 – Medições realizadas na superfície lateral do molde com espessura de camada de 0,15 mm, após dez ciclos de termoformagem à vácuo

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	12,677	12,958	11,213	11,696	11,514	12,012	0,762
Rt (µm)	69,309	64,531	63,327	62,186	65,441	64,959	2,724
RSm (mm)	0,169	0,149	0,155	0,155	0,154	0,157	0,008

Fonte: Autor (2023).

Tabela A. 6 – Medições realizadas na superfície lateral do molde com espessura de camada de 0,25 mm, após dez ciclos de termoformagem à vácuo

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	18,804	20,241	17,708	17,972	18,345	18,614	0,999
Rt (µm)	84,383	88,887	80,059	80,203	80,423	82,791	3,856
RSm (mm)	0,250	0,251	0,250	0,247	0,249	0,249	0,002

Fonte: Autor (2023).

**APÊNDICE B – RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE NA
SUPERFÍCIE DO TOPO DOS MOLDES ANTES E APÓS DEZ CICLOS DE
TERMOFORMAGEM**

Tabela B. 1 – Medições realizadas na superfície do topo do molde com espessura de camada de 0,05 mm, antes da termoformagem à vácuo

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	6,947	6,341	6,267	5,097	4,882	5,907	0,881
Rt (µm)	62,782	50,324	57,814	57,246	51,431	55,920	5,097
RSm (mm)	0,841	0,822	0,811	0,590	0,601	0,733	0,126

Fonte: Autor (2023).

Tabela B. 2 – Medições realizadas na superfície do topo do molde com espessura de camada de 0,15 mm, antes da termoformagem à vácuo

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	8,321	7,239	8,997	8,267	9,521	8,469	0,860
Rt (µm)	76,115	81,863	87,823	76,007	89,244	82,211	6,260
RSm (mm)	0,406	0,363	0,443	0,426	0,474	0,422	0,041

Fonte: Autor (2023).

Tabela B. 3 – Medições realizadas na superfície do topo do molde com espessura de camada de 0,25 mm, antes da termoformagem à vácuo

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	23,639	23,623	20,871	24,702	26,267	23,820	1,970
Rt (µm)	155,985	152,360	123,631	170,177	171,122	154,655	19,246
RSm (mm)	0,473	0,473	0,474	0,476	0,474	0,474	0,001

Fonte: Autor (2023).

Tabela B. 4 – Medições realizadas na superfície do topo do molde com espessura de camada de 0,05 mm, após dez ciclos de termoformagem à vácuo

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	4,006	5,719	6,196	7,251	5,540	5,742	1,177
Rt (µm)	66,694	52,911	56,085	62,153	61,710	59,911	5,429
RSm (mm)	0,511	0,905	0,817	0,877	0,779	0,778	0,157

Fonte: Autor (2023).

Tabela B. 5 – Medições realizadas na superfície do topo do molde com espessura de camada de 0,15 mm, após dez ciclos de termoformagem à vácuo

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	7,797	8,035	9,625	9,302	8,529	8,657	0,790
Rt (µm)	69,253	67,025	74,466	93,479	76,195	76,084	10,416
RSm (mm)	0,600	0,545	0,599	0,436	0,401	0,516	0,093

Fonte: Autor (2023).

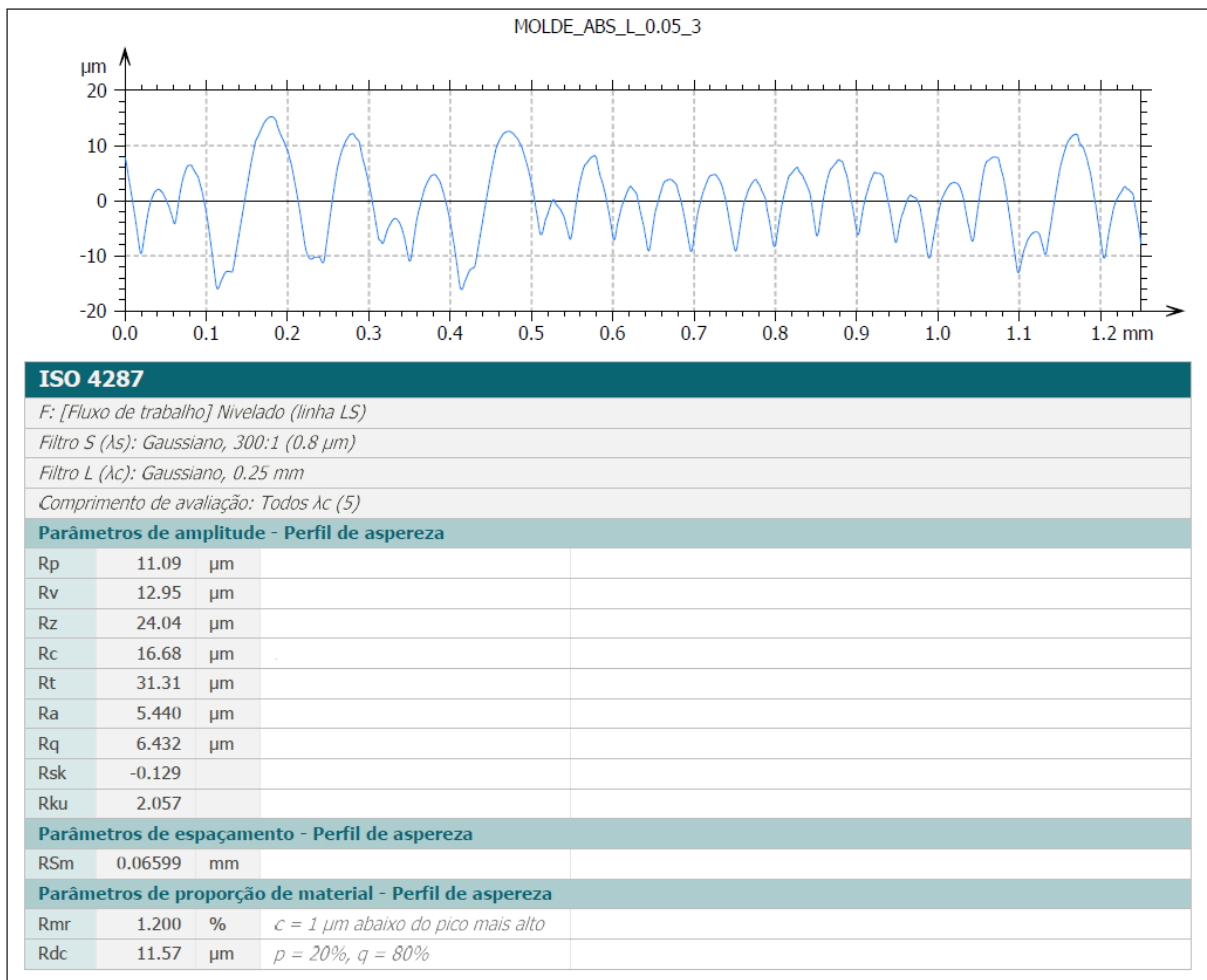
Tabela B. 6 – Medições realizadas na superfície do topo do molde com espessura de camada de 0,25 mm, após dez ciclos de termoformagem à vácuo

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	22,994	27,607	23,627	24,499	23,410	24,428	1,860
Rt (µm)	166,738	170,636	154,246	165,994	164,279	164,379	6,124
RSm (mm)	0,458	0,473	0,473	0,471	0,472	0,469	0,006

Fonte: Autor (2023).

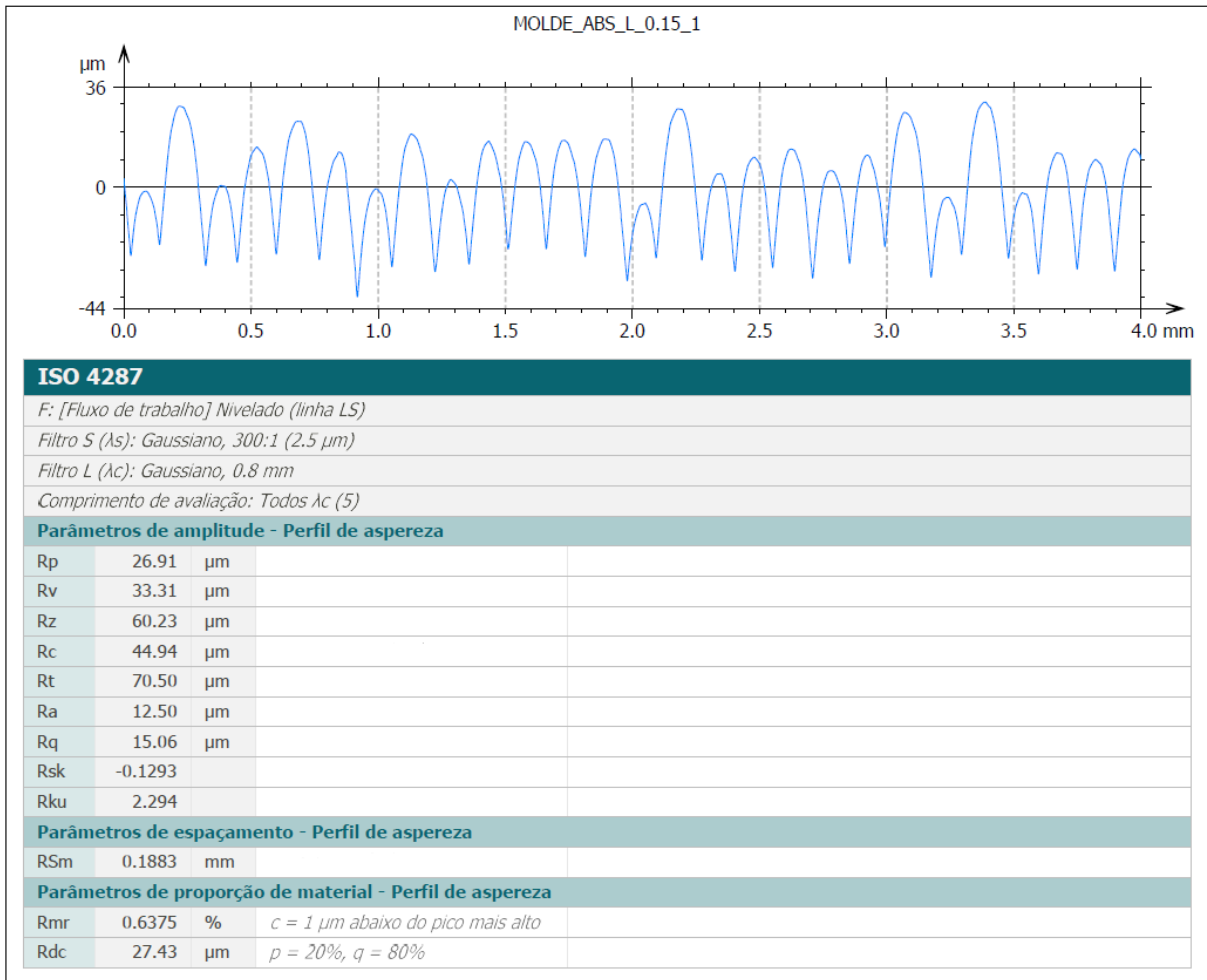
**APÊNDICE C – EXEMPLO DO PERFIL DE RUGOSIDADE DA
SUPERFÍCIE LATERAL E SUPERFÍCIE DO TOPO DOS MOLDES (ANTES DA
TERMOFORMAGEM), EXTRAÍDO DO SOFTWARE TALYPROFILE SILVER 8.2,
PARA CADA ESPESSURA DE CAMADA**

Figura C. 1 – Exemplo do perfil de rugosidade de uma medição na superfície lateral do molde com espessura de camada de 0,05 mm



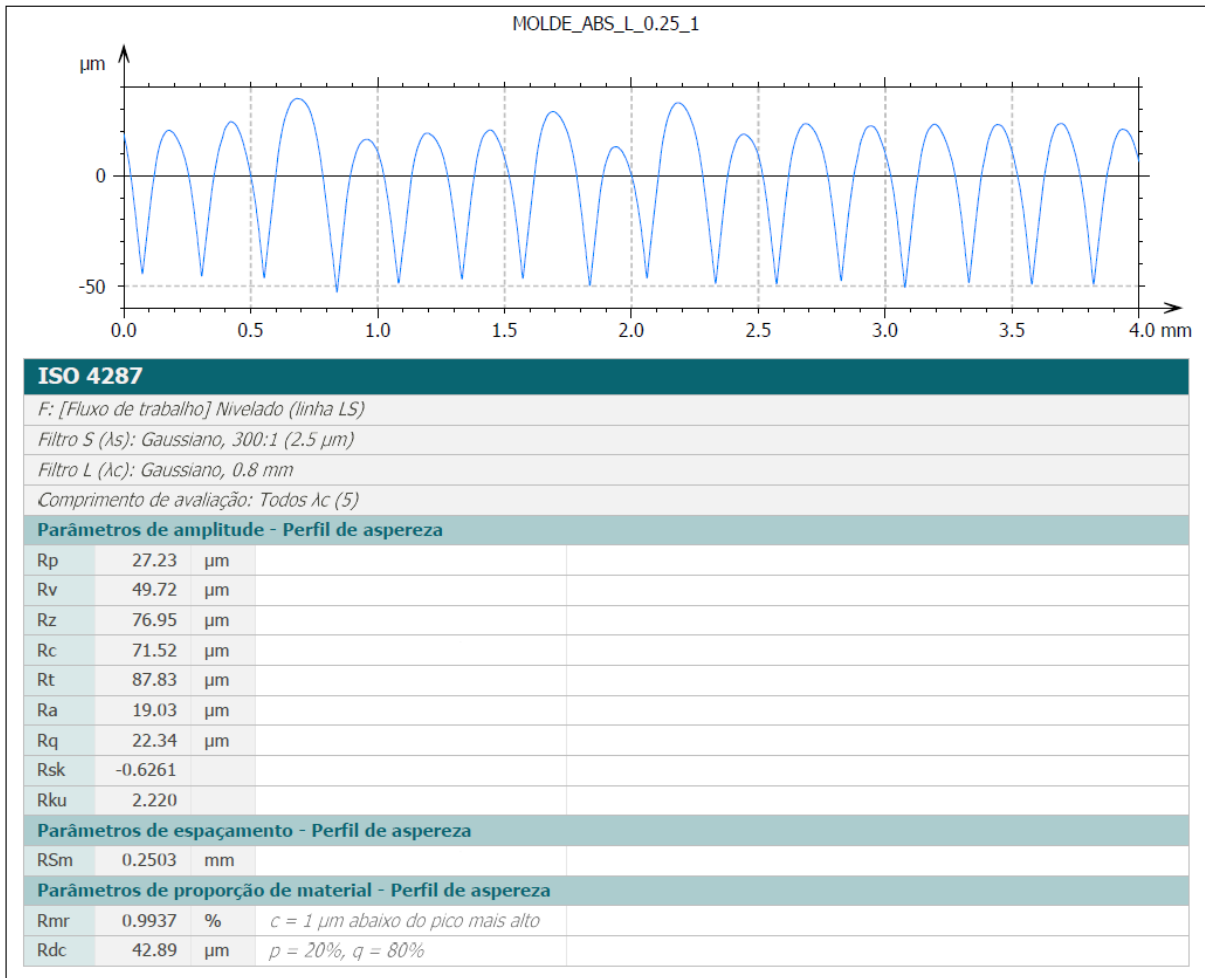
Fonte: Autor (2023).

Figura C. 2 – Exemplo do perfil de rugosidade de uma medição na superfície lateral do molde com espessura de camada de 0,15 mm



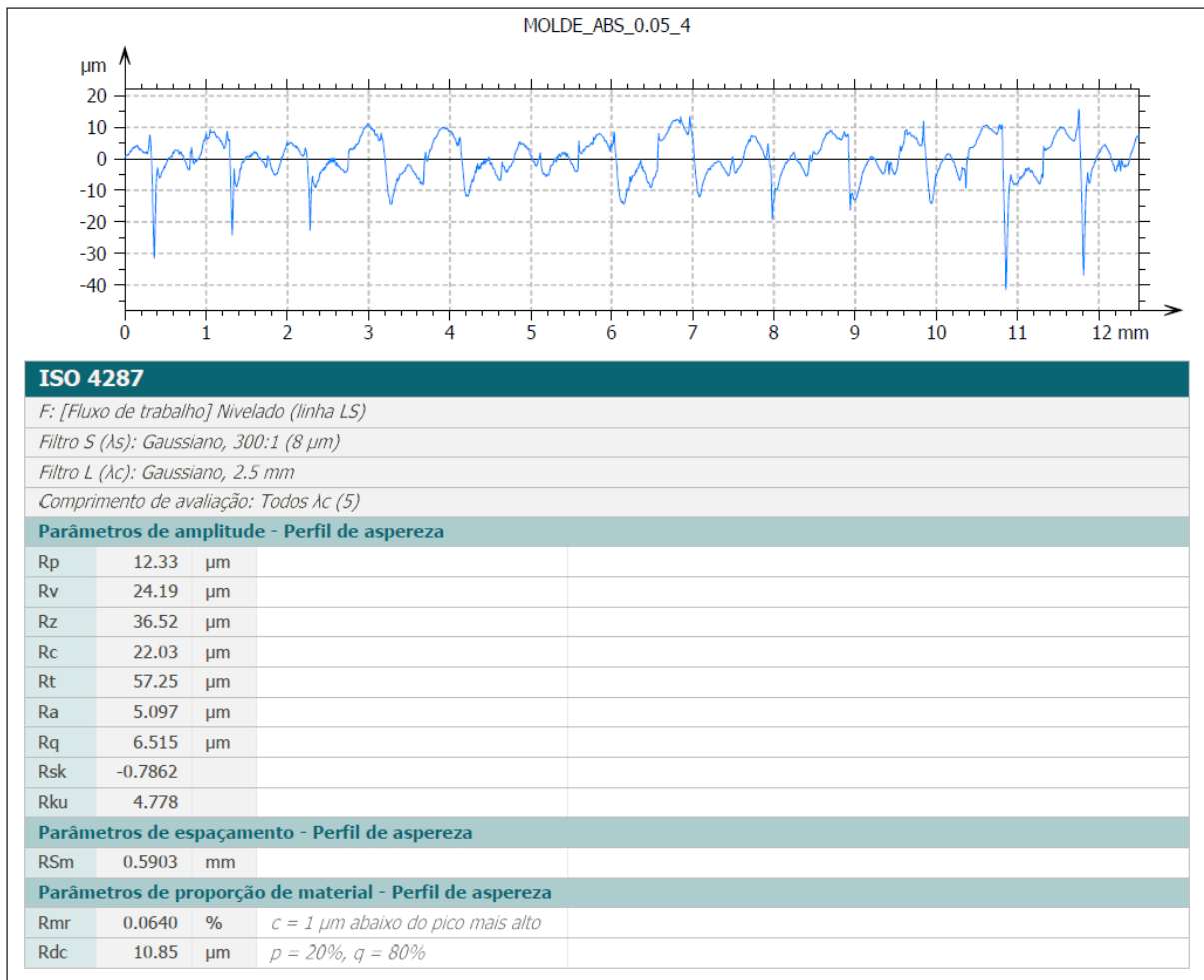
Fonte: Autor (2023).

Figura C. 3 – Exemplo do perfil de rugosidade de uma medição na superfície lateral do molde com espessura de camada de 0,25 mm



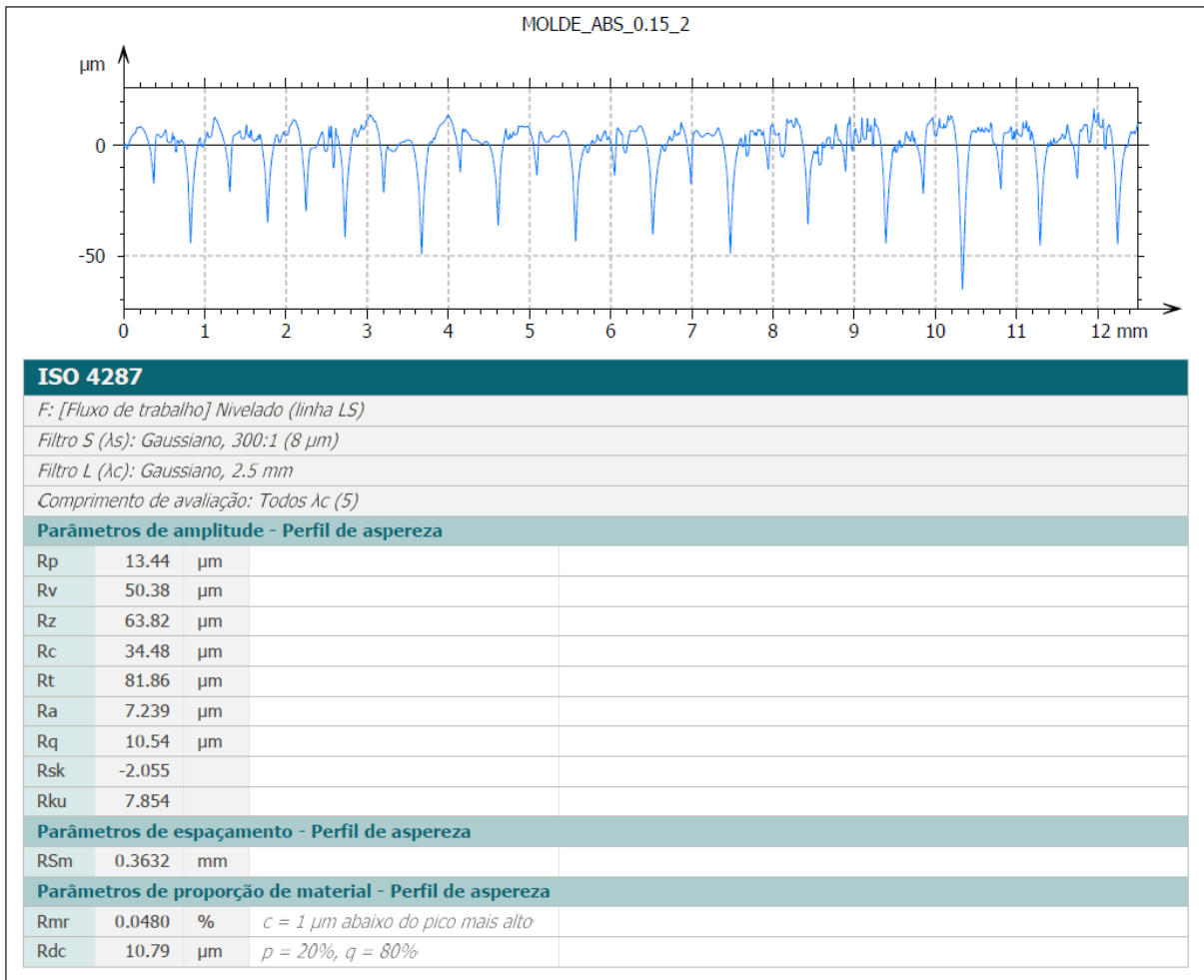
Fonte: Autor (2023).

Figura C. 4 – Exemplo do perfil de rugosidade de uma medição na superfície do topo do molde com espessura de camada de 0,05 mm



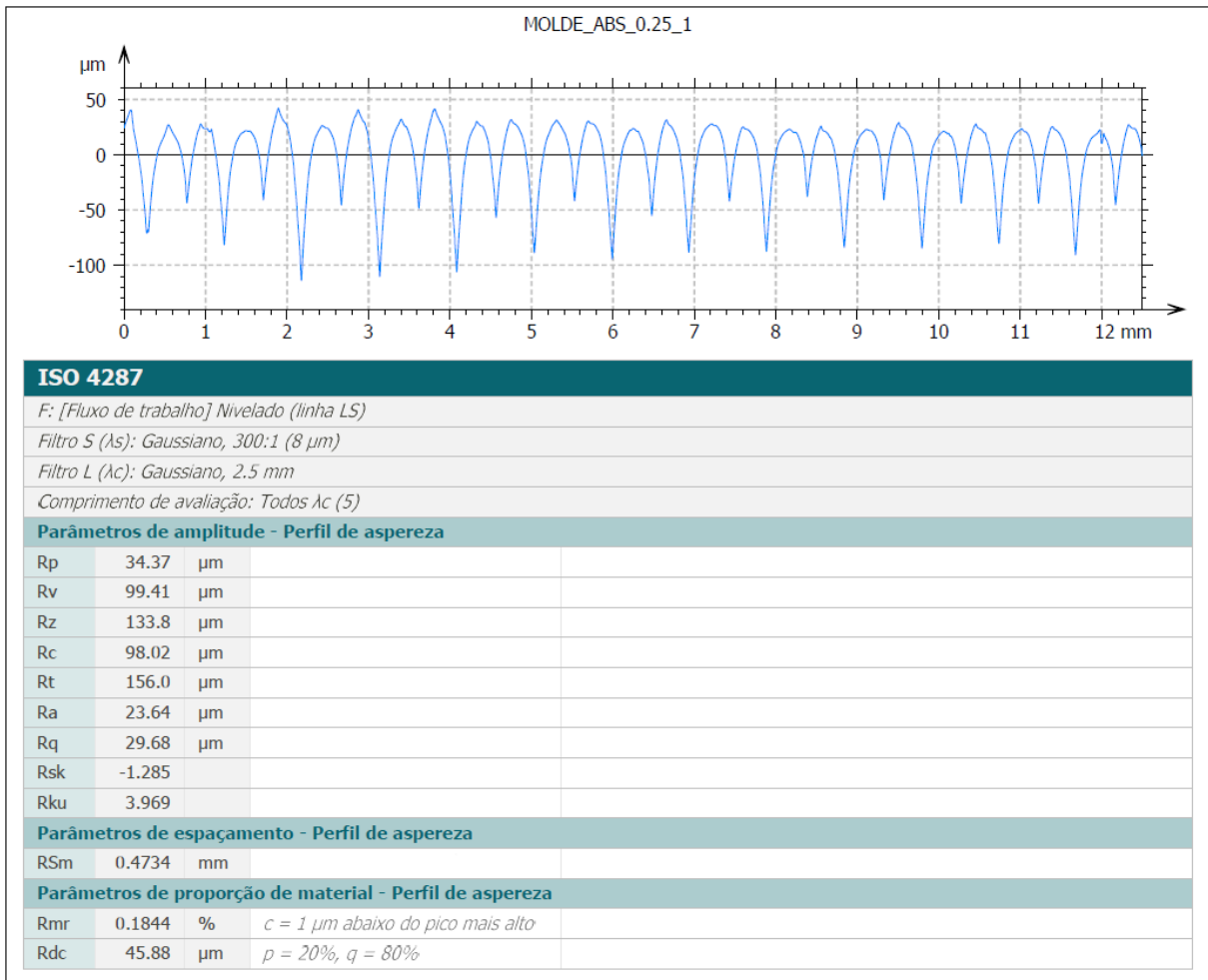
Fonte: Autor (2023).

Figura C. 5 – Exemplo do perfil de rugosidade de uma medição na superfície do topo do molde com espessura de camada de 0,15 mm



Fonte: Autor (2023).

Figura C. 6 – Exemplo do perfil de rugosidade de uma medição na superfície do topo do molde com espessura de camada de 0,25 mm



Fonte: Autor (2023).

**APÊNDICE D – RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE NA
SUPERFÍCIE LATERAL DOS PRODUTOS TERMOFORMADOS DO PRIMEIRO E
DÉCIMO CICLO DE TERMOFORMAGEM**

Tabela D. 1 – Resultado das medições de rugosidade na superfície lateral do produto termoformado no molde com espessura de camada 0,05 mm (primeiro ciclo)

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	1,438	1,195	1,227	1,581	1,223	1,333	0,170
Rt (µm)	9,298	10,909	16,870	11,845	11,600	12,104	2,843
RSm (mm)	0,326	0,372	0,327	0,376	0,379	0,356	0,027

Fonte: Autor (2023).

Tabela D. 2 – Resultado das medições de rugosidade na superfície lateral do produto termoformado no molde com espessura de camada 0,15 mm (primeiro ciclo)

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	2,722	2,682	2,459	1,993	2,489	2,469	0,290
Rt (µm)	20,906	17,060	15,164	14,139	15,950	16,644	2,612
RSm (mm)	0,378	0,350	0,250	0,362	0,331	0,334	0,050

Fonte: Autor (2023).

Tabela D. 3 – Resultado das medições de rugosidade na superfície lateral do produto termoformado no molde com espessura de camada 0,25 mm (primeiro ciclo)

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	3,129	2,869	2,892	3,159	3,128	3,036	0,142
Rt (µm)	18,000	18,703	19,998	18,897	21,878	19,495	1,513
RSm (mm)	0,317	0,319	0,350	0,341	0,311	0,328	0,017

Fonte: Autor (2023).

Tabela D. 4 – Resultado das medições de rugosidade na superfície lateral do produto termoformado no molde com espessura de camada 0,05 mm (décimo ciclo)

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (μm)	1,653	1,177	1,192	1,768	1,136	1,385	0,300
Rt (μm)	18,080	10,930	11,150	12,240	10,540	12,588	3,134
RSm (mm)	0,313	0,346	0,205	0,308	0,276	0,290	0,054

Fonte: Autor (2023).

Tabela D. 5 – Resultado das medições de rugosidade na superfície lateral do produto termoformado no molde com espessura de camada 0,15 mm (décimo ciclo)

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (μm)	2,772	2,776	2,481	2,693	1,998	2,544	0,328
Rt (μm)	24,130	21,780	15,710	17,850	14,230	18,470	4,141
RSm (mm)	0,365	0,296	0,317	0,305	0,279	0,313	0,033

Fonte: Autor (2023).

Tabela D. 6 – Resultado das medições de rugosidade na superfície lateral do produto termoformado no molde com espessura de camada 0,25 mm (décimo ciclo)

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (μm)	3,011	3,035	2,870	2,915	3,232	3,013	0,140
Rt (μm)	17,290	21,540	26,480	22,690	18,490	21,298	3,633
RSm (mm)	0,361	0,375	0,322	0,320	0,384	0,353	0,030

Fonte: Autor (2023).

**APÊNDICE E – RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE NA
SUPERFÍCIE DO TOPO DOS PRODUTOS TERMOFORMADOS DO PRIMEIRO E
DÉCIMO CICLO DE TERMOFORMAGEM**

Tabela E. 1 – Resultado das medições de rugosidade na superfície do topo do produto termoformado no molde com espessura de camada 0,05 mm (primeiro ciclo)

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	1,886	2,009	2,354	2,490	2,019	2,151	0,257
Rt (µm)	10,011	11,488	12,784	12,970	13,560	12,163	1,421
RSm (mm)	0,872	0,869	0,943	0,953	0,883	0,904	0,040

Fonte: Autor (2023).

Tabela E. 2 – Resultado das medições de rugosidade na superfície do topo do produto termoformado no molde com espessura de camada 0,15 mm (primeiro ciclo)

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	5,058	4,762	5,006	4,784	3,776	4,677	0,521
Rt (µm)	25,500	24,590	25,502	20,868	27,036	24,699	2,315
RSm (mm)	0,737	0,667	0,595	0,585	0,482	0,613	0,096

Fonte: Autor (2023).

Tabela E. 3 – Resultado das medições de rugosidade na superfície do topo do produto termoformado no molde com espessura de camada 0,25 mm (primeiro ciclo)

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (µm)	7,395	6,636	5,843	5,944	5,508	6,265	0,753
Rt (µm)	51,710	45,635	32,658	28,420	31,540	37,993	10,103
RSm (mm)	0,475	0,473	0,474	0,470	0,469	0,472	0,003

Fonte: Autor (2023).

Tabela E. 4 – Resultado das medições de rugosidade na superfície do topo do produto termoformado no molde com espessura de camada 0,05 mm (décimo ciclo)

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (μm)	2,067	2,269	2,102	1,938	2,236	2,122	0,134
Rt (μm)	13,477	14,061	11,359	12,132	11,681	12,542	1,172
RSm (mm)	1,030	0,889	0,878	0,822	0,825	0,889	0,085

Fonte: Autor (2023).

Tabela E. 5 – Resultado das medições de rugosidade na superfície do topo do produto termoformado no molde com espessura de camada 0,15 mm (décimo ciclo)

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (μm)	4,076	4,866	5,129	4,974	3,850	4,579	0,576
Rt (μm)	25,423	25,928	25,553	26,002	20,298	24,641	2,440
RSm (mm)	0,479	0,487	0,470	0,481	0,423	0,468	0,026

Fonte: Autor (2023).

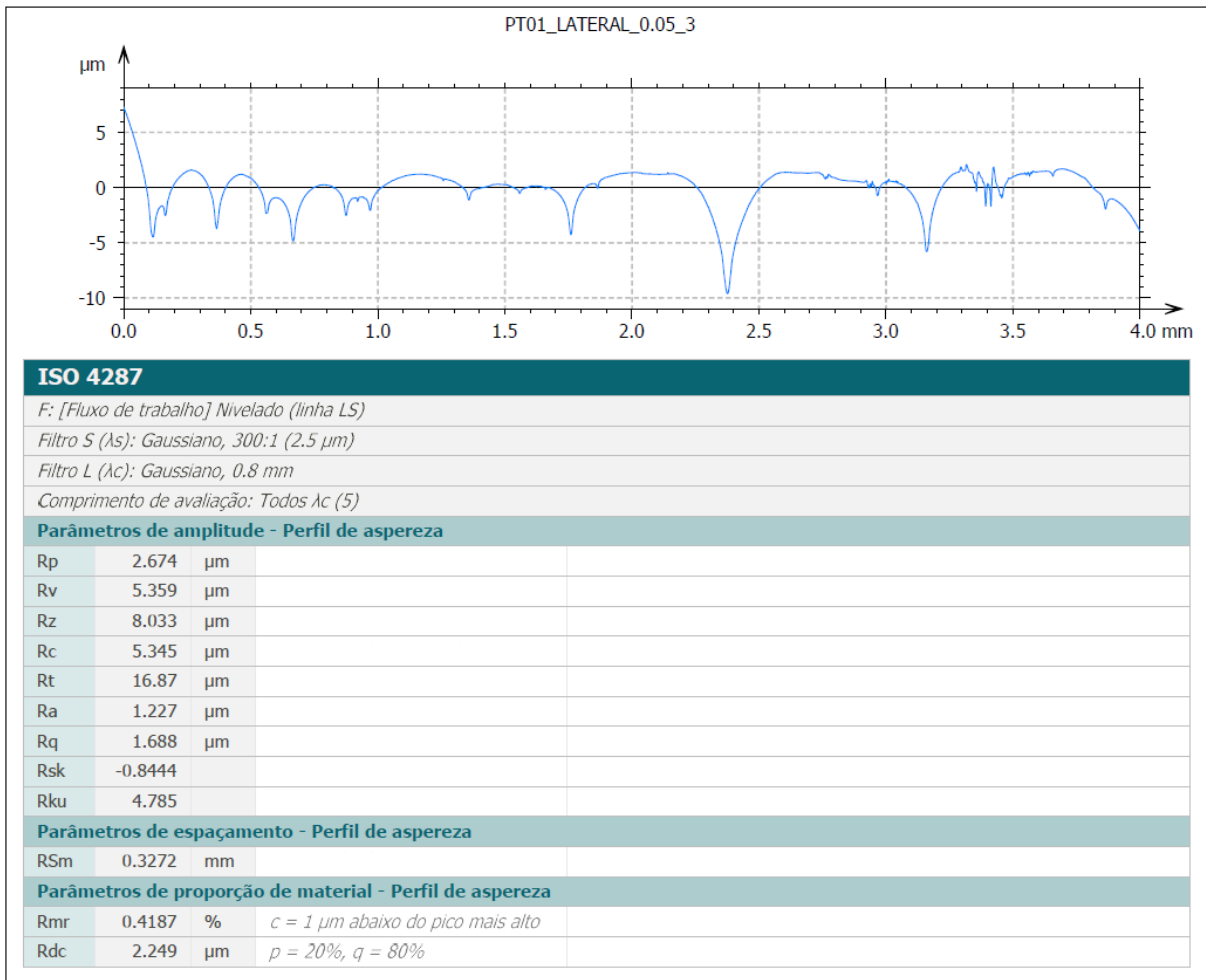
Tabela E. 6 – Resultado das medições de rugosidade na superfície do topo do produto termoformado no molde com espessura de camada 0,25 mm (décimo ciclo)

Medições	1	2	3	4	5	Média	D. Padrão
Ra (μm)	6,946	6,780	5,744	6,217	5,505	6,238	0,628
Rt (μm)	47,245	44,361	33,861	32,327	29,598	37,478	7,818
RSm (mm)	0,470	0,474	0,471	0,470	0,473	0,472	0,002

Fonte: Autor (2023).

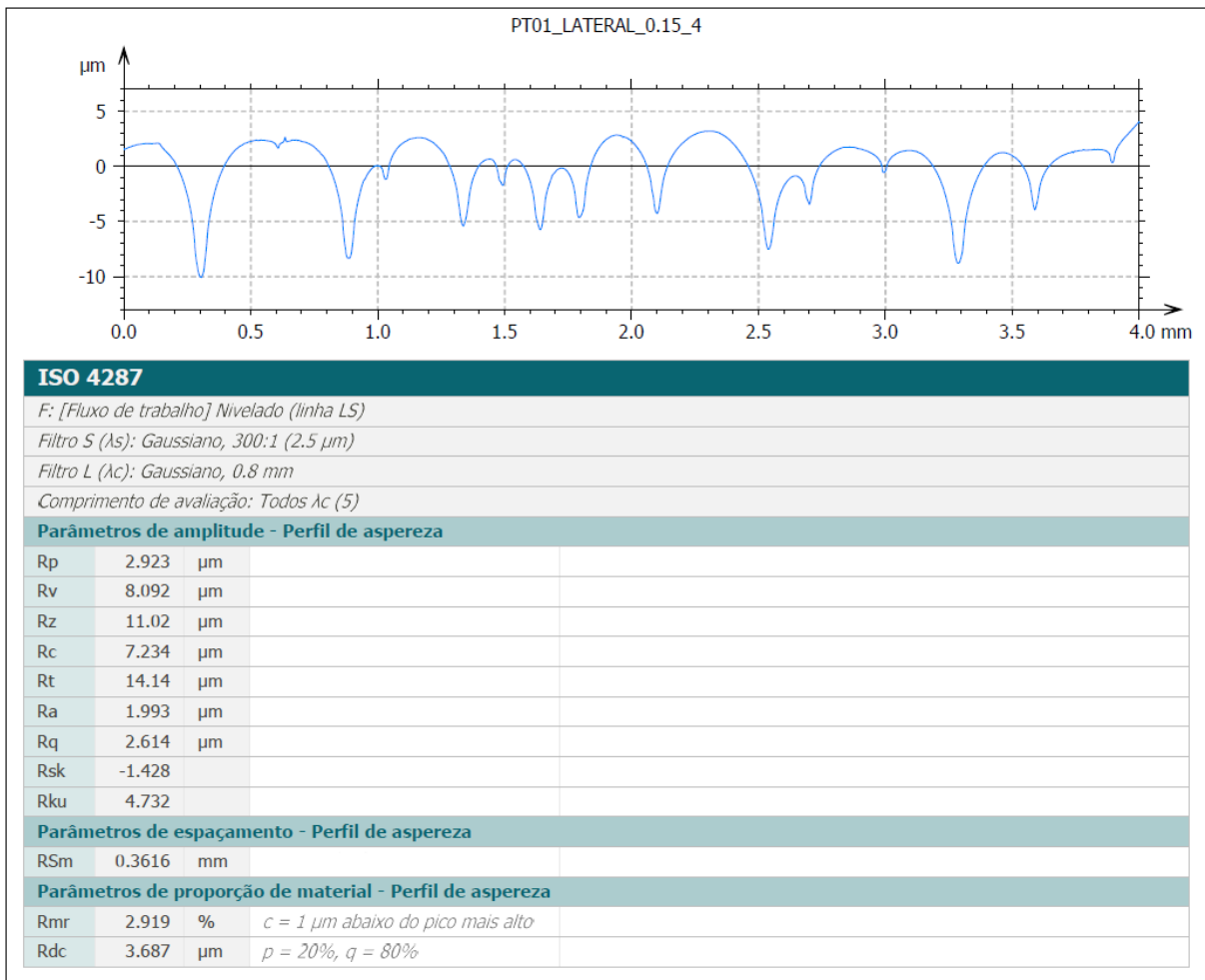
APÊNDICE F – EXEMPLO DO PERFIL DE RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE LATERAL E SUPERFÍCIE DO TOPO DOS PRODUTOS TERMOFORMADOS (PRIMEIRO CICLO), EXTRAÍDO DO SOFTWARE TALYPROFILE SILVER 8.2, PARA CADA ESPESSURA DE CAMADA

Figura F. 1 – Exemplo do perfil de rugosidade de uma medição na superfície lateral do produto termofomado no molde com espessura de camada 0,05 mm



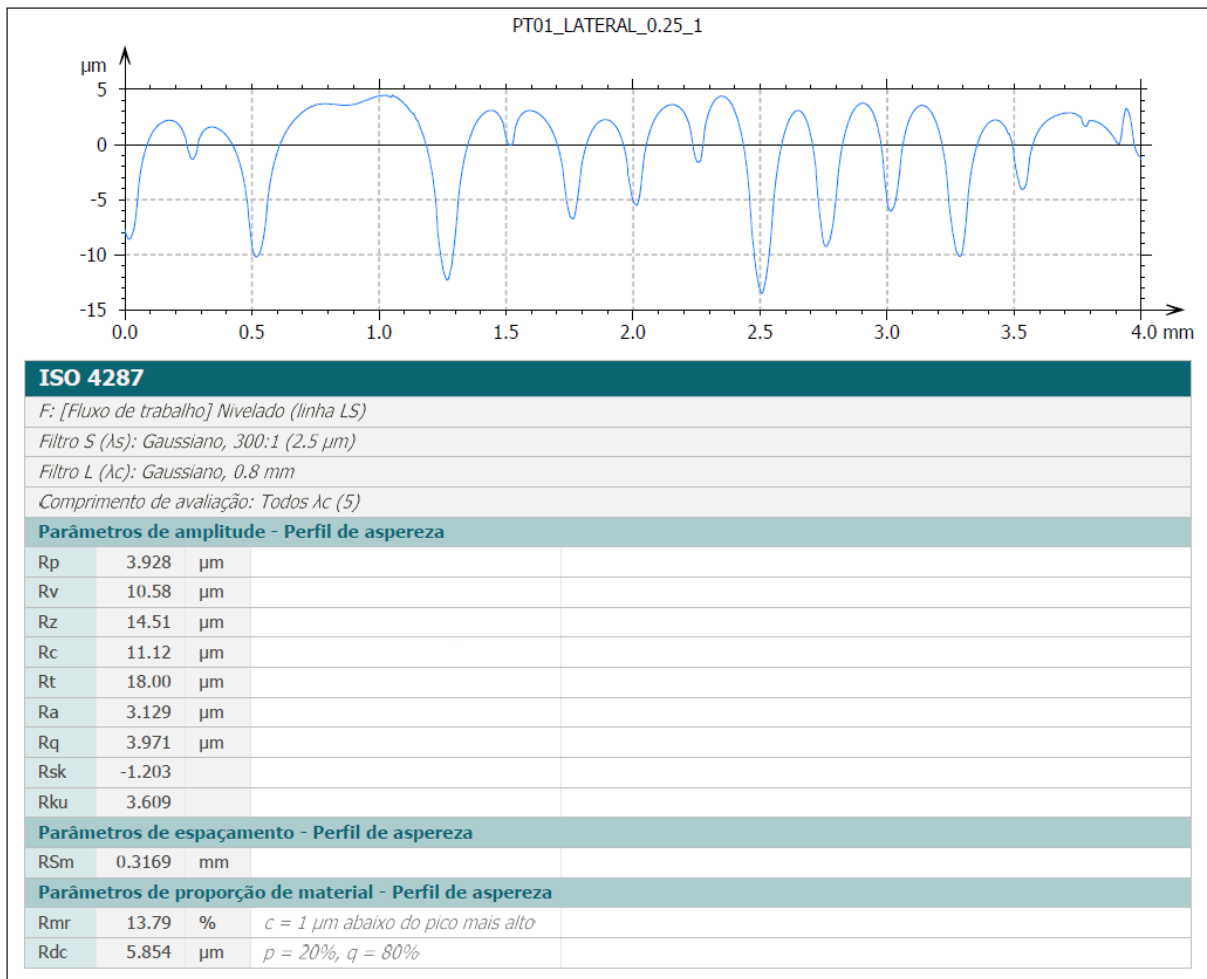
Fonte: Autor (2023).

Figura F. 2 – Exemplo do perfil de rugosidade de uma medição na superfície lateral do produto termoformado no molde com espessura de camada 0,15 mm



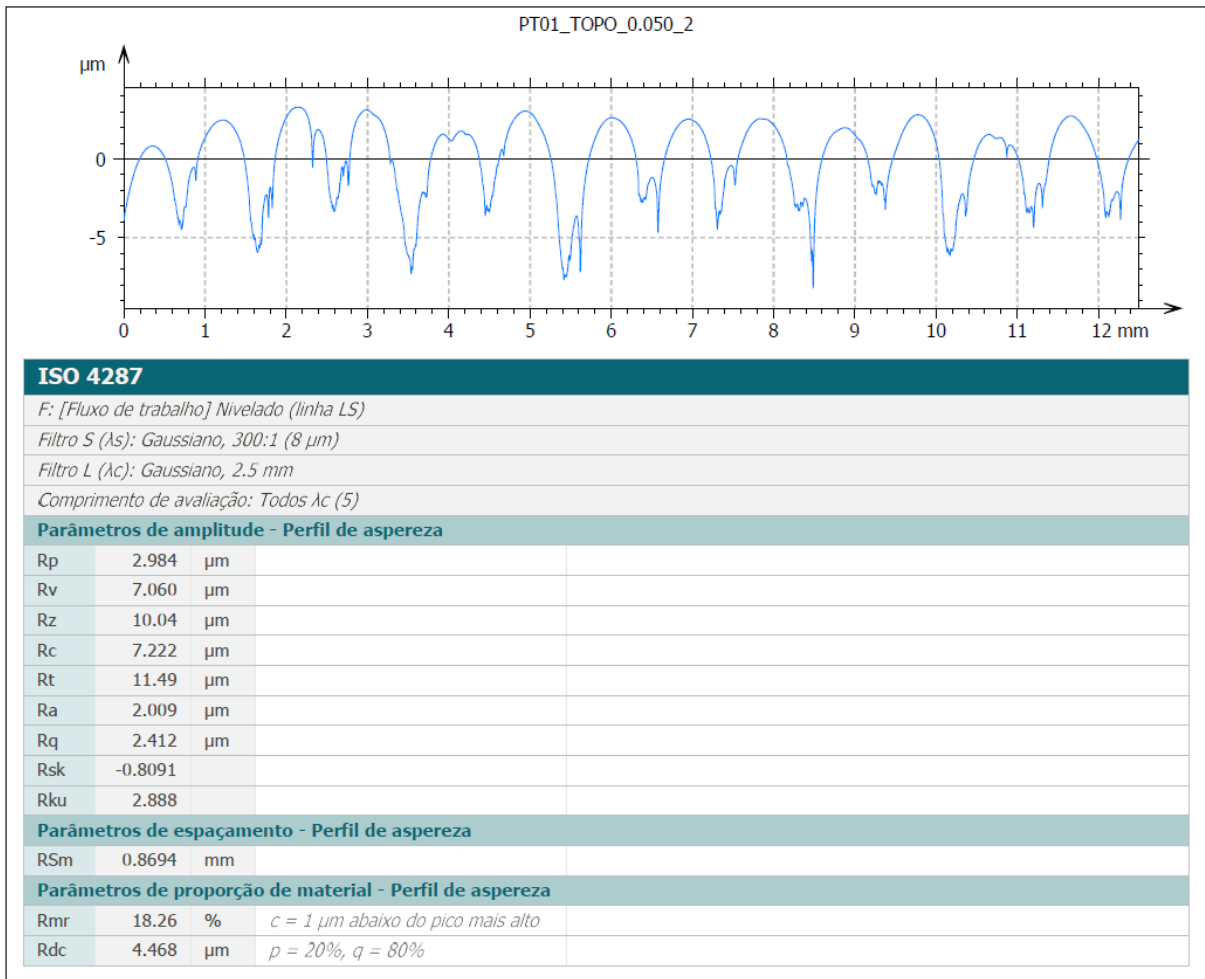
Fonte: Autor (2023).

Figura F. 3 – Exemplo do perfil de rugosidade de uma medição na superfície lateral do produto termoformado no molde com espessura de camada 0,25 mm



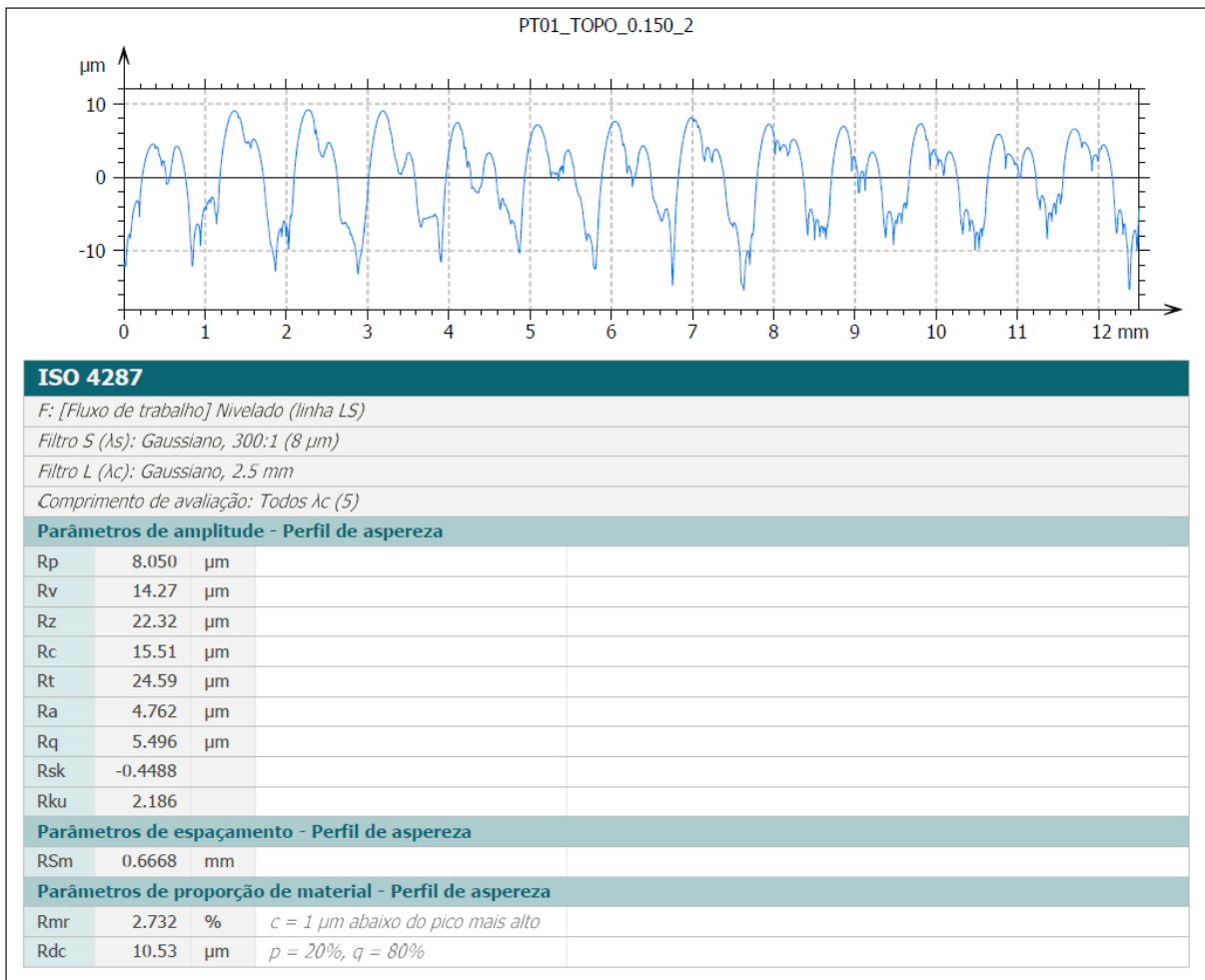
Fonte: Autor (2023).

Figura F. 4 – Exemplo do perfil de rugosidade de uma medição na superfície do topo do produto termoformado no molde com espessura de camada 0,05 mm



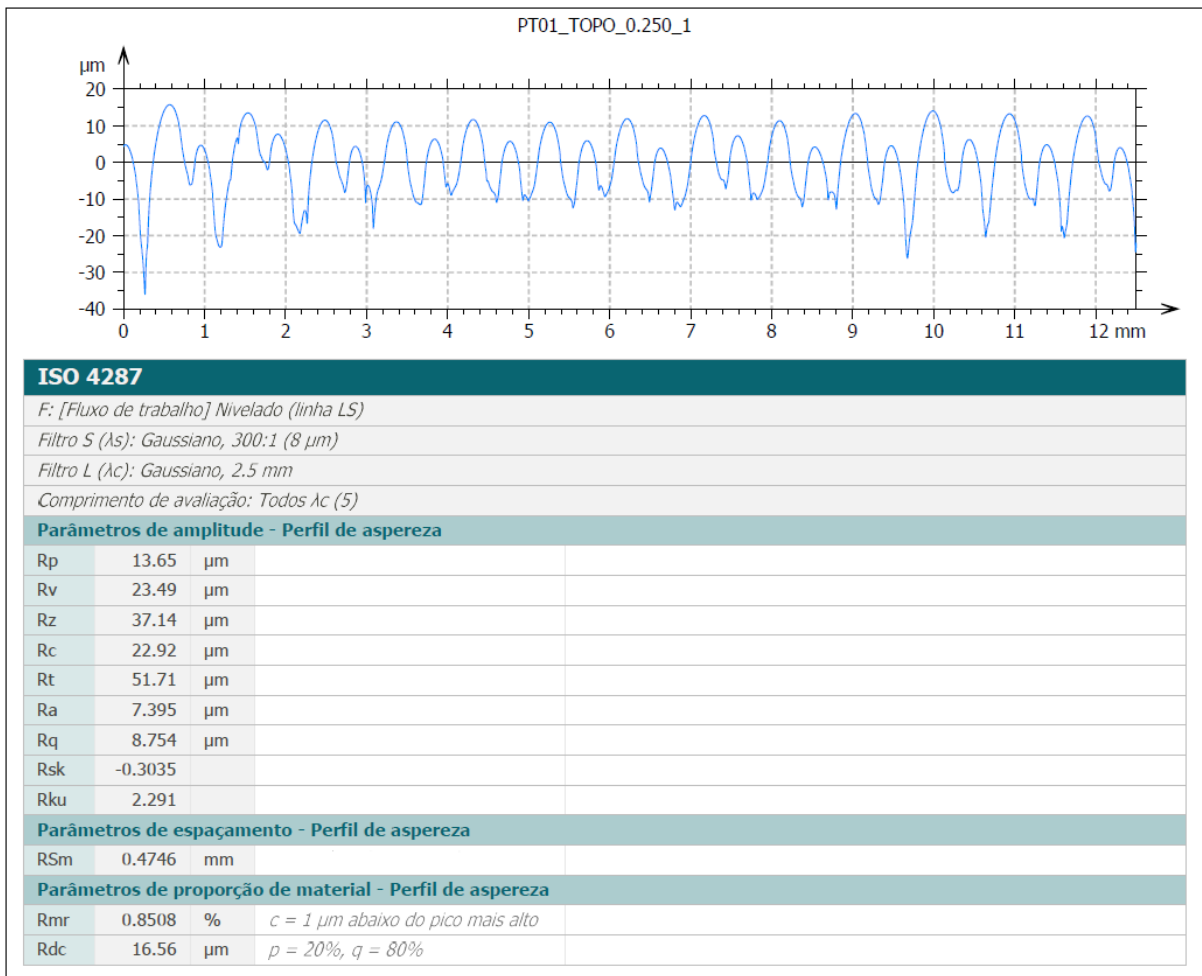
Fonte: Autor (2023).

Figura F. 5 – Exemplo do perfil de rugosidade de uma medição na superfície do topo do produto termoformado no molde com espessura de camada 0,15 mm



Fonte: Autor (2023).

Figura F. 6 – Exemplo do perfil de rugosidade de uma medição na superfície do topo do produto termoformado no molde com espessura de camada 0,25 mm



Fonte: Autor (2023).