



Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação Lato Sensu
Experimentação Tridimensional



EDUARDO ANDRÉ ALBERTI

**ESTUDO DE RUGOSIDADE EM PEÇAS CONFECCIONADAS POR
IMPRESSÃO 3D**

**CURITIBA
2022**

EDUARDO ANDRÉ ALBERTI

**ESTUDO DE RUGOSIDADE EM PEÇAS CONFECCIONADAS POR
IMPRESSÃO 3D**

Monografia apresentada como resultado parcial à obtenção do grau de Especialista em Experimentação Tridimensional. Curso de Pós-graduação Lato Sensu, Setor de Exatas, Departamento de Expressão Gráfica, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Fontana Catapan

**CURITIBA
2022**

RESUMO

A impressão 3D vem ganhando cada vez mais destaque em estudos de fenômenos físicos. Porém os vários tipos de processos de impressão 3D existentes resultam em peças com características distintas. Essas diferenças podem impactar nos estudos dos fenômenos, como no caso de pesquisas em escoamento de fluidos, onde a rugosidade da superfície das peças tem impacto na fluidez. Desta maneira, este trabalho teve como objetivo avaliar as diferenças na rugosidade de peças fabricadas pelos processos de impressão 3D FDM e MSLA. A escolha por esses processos se deu devido a facilidade de encontrar equipamentos e insumos que utilizam essas tecnologias. Além do processo, também foi avaliado o impacto da direção de impressão na rugosidade final. Os resultados demonstram que a impressão MSLA gera peças com menor rugosidade (quanto por cento comparado com o FDM). A direção de deposição tem impacto mais relevante no processo FDM, onde deposições na direção do fluxo do fluido dentro da peça possuem menores rugosidades. Por fim verifica-se que a deposição MSLA produz peças com menores impactos no escoamento de fluidos.

Palavras-chave: Impressão 3D. Manufatura Aditiva. Rugosidade. Escoamento.

ABSTRACT

3D printing has been gaining more and more prominence in studies of physical phenomena. However, the various types of existing 3D printing processes result in parts with distinct characteristics. These differences can impact the studies of the phenomena, as exemplified in the case of fluid flows research, where the roughness of the surface of the parts has an impact on the flow. This work aimed to evaluate the differences in the roughness of parts manufactured by the 3D printing FDM and MSLA processes. The choice for these processes was due to the ease of finding equipment and supplies that use these technologies. In addition to the process, the impact of the printing direction on the final roughness was also evaluated. The results demonstrate that MSLA printing generates parts with lower roughness. The deposition direction has a more relevant impact on the FDM process, where depositions in the direction of fluid flow have lower roughness. Finally, it is verified that the MSLA deposition produces pieces with less impact on the fluid flow.

Keywords: 3D printing. Additive Manufacturing. Roughness. Flow.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA	9
FIGURA 2. SIMULAÇÃO DE CUBO CONSTRUÍDO POR IMPRESSÃO 3D	11
FIGURA 3. EXEMPLOS DE ESCOAMENTOS UNI E BIDIMENSIONAL	12
FIGURA 4. POSSÍVEL CLASSIFICAÇÃO DE ESCOAMENTO	12
FIGURA 5. DEMONSTRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE	14
FIGURA 6. PEÇA IMPRESSA PARA TESTES DE ESCOAMENTO	15
FIGURA 7. (A) IMPRESSORA MARS 2 PRO E (B) IMPRESSORA BLUER V2	16
FIGURA 8. DIREÇÕES DE IMPRESSÃO UTILIZADAS	16
FIGURA 9. EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE MITUTOYO SJ210	17
FIGURA 10. PEÇA IMPRESSA COM PROCESSO FDM	19
FIGURA 11. PEÇA IMPRESSA COM PROCESSO MSLA	19
FIGURA 12. GRÁFICO COMPARATIVO COM AS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE	21
FIGURA 13. ESQUEMA DE DEPOSIÇÃO FDM	22
FIGURA 14. AMOSTRAS IMPRESSAS EM FDM	23
FIGURA 15. ESQUEMA DE IMPRESSÃO 3D DE PEÇAS CILÍNDRICAS	24
FIGURA 16. AMOSTRAS IMPRESSAS EM MSLA	24

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	6
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	6
1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	7
1.3. JUSTIFICATIVA	7
1.4. HIPÓTESE	7
1.5. OBJETIVO.....	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1. MANUFATURA ADITIVA.....	9
2.2. ESCOAMENTO DE FLUÍDOS.....	11
2.3. RUGOSIDADE	13
3. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
4.1. CONFECÇÃO DE PEÇAS	19
4.2. DIFERENÇA DE RUGOSIDADE FDM E MSLA.....	20
4.3. DIREÇÃO DE DEPOSIÇÃO.....	21
5. CONCLUSÕES.....	26
5.1. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
APÊNDICE 1 – TESTES DE RUGOSIDADE	30

1. INTRODUÇÃO

Atualmente um dos processos de manufatura com maior crescimento e ganho de relevância no mercado é a manufatura aditiva (MA), ou também conhecido como impressão 3D, sendo esse último termo mais conhecido pelo público em geral devido ao seu uso em canais de mídia (Bourell, 2016).

Segundo Gibson (2014), a MA possui como principal vantagem a agilidade no processo de desenvolvimento e construção de novos componentes. A velocidade com que se conecta esse método de fabricação com processos de design em 3D, somado à versatilidade de fabricação de formas e materiais, permite essa tecnologia ter grandes impactos em diferentes áreas.

Atualmente os principais mercados relacionados a MA são o automotivo, aeroespacial e da medicina. Entretanto, com a redução de custos vinculado a essa tecnologia assim como uma maior base de conhecimento desse processo sendo construído, novos mercados deverão incorporar essa tecnologia nos próximos anos. O valor movimentado em 2018 chegou a U\$ 7,97 bilhões, e estima-se que em 2030 esse valor chegue a U\$ 70,08 bilhões, um crescimento anual de 21,1% (Reports and Data, 2021).

Um das principais aplicações da impressão 3D está nos processos de desenvolvimento de novas peças/componentes devido a agilidade de manufatura de peças únicas, e em estudos de processos físicos que estão envolvidos em nosso dia-a-dia.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Como descrito anteriormente, uma maior base de dados e informações sobre os processos de impressão 3D e as peças construídas por esses meios vem sendo ampliada de forma considerável nos últimos anos. Porém ainda muitas informações ainda continuam dependendo de estudos para formação de uma base de dados mais completa. Um exemplo dessa carência está vinculado ao impacto no escoamento de fluidos dentro de peças confeccionadas por impressão 3D.

Quando se fala sobre estudos de dinâmica dos fluidos, a relação entre os fluidos e o material no qual esse fluido é confinado, como tubos por exemplo, é de

vital importância no entendimento de fenômenos. Propriedades mecânicas e físicas desses materiais, como a rugosidade da sua superfície, são impactadas diretamente pelo processo de fabricação. E esses tipos de informações quando o processo é a manufatura aditiva ainda são escassos.

1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Diante dos diversos processos de Manufatura Aditiva existentes no mercado, somado com a variedade de parâmetros de fabricação existentes neles, faz com que os resultados das peças confeccionadas por impressão 3D possuam um grande leque de características finais após a fabricação. Com isso, são necessários vários estudos para a criação de bases de dados e um conhecimento mais preciso sobre os resultados da impressão 3D.

Uma das características dessas peças é a rugosidade superficial, a qual pode ter vários impactos, desde visuais, até a influência em escoamentos internos de fluidos dentro desses componentes. Porém ainda pouca informação sobre a rugosidade desse tipo de peça existe na bibliografia atual.

1.3. JUSTIFICATIVA

Realizar estudos sobre as peças confeccionadas por impressão 3D de forma a criar um maior conhecimento sobre as propriedades delas traz grandes benefícios para a realização de futuros trabalhos com essa tecnologia. Mais especificamente, um entendimento melhor sobre o resultado final da qualidade superficial, no caso da rugosidade, ajuda a entender o impacto dessas superfícies em escoamento de fluidos dentro dessas peças. Essas informações vão auxiliar desde a melhor seleção do processo de impressão 3D, escolha de parâmetros de processamento, até a melhora em processos de simulação computacionais.

1.4. HIPÓTESE

Os diferentes tipos de processos de impressão 3D produzem peças com qualidades superficiais diferentes e conseqüentemente rugosidades diferentes. Processos que possuem uma resolução de impressão maior, ou seja, camadas mais finas, geram rugosidades menores. A mudança nos parâmetros de impressão também gera impactos na rugosidade da peça final. Um desses principais parâmetros é a direção de impressão. Ao modificar a direção a rugosidade será modificada também

1.5. OBJETIVO

Esse trabalho tem como objetivo avaliar a melhor condição para a fabricação de componentes utilizados em estudos de fenômenos de escoamento de fluidos através da impressão 3D de baixo custo.

Para isso, os objetivos específicos são:

- Confecção de corpos de prova para realização de estudos de escoamento utilizando processos de impressão 3D FDM e MSLA;
- Analisar a diferença da rugosidade superficial de peças fabricadas com os processos de impressão 3D FDM e MSLA;
- Analisar o qual o impacto da direção de impressão na rugosidade das peças finais em ambos os processos;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

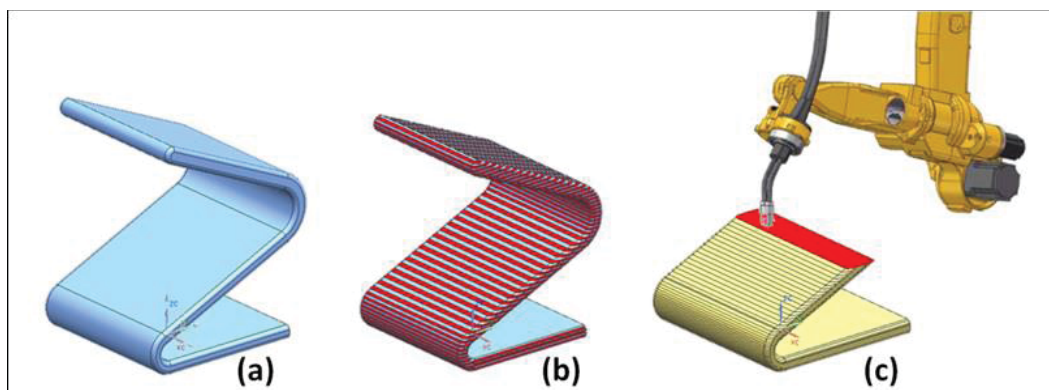
Nessa seção é apresentado uma revisão da literatura sobre os processos de manufatura aditiva e seu histórico. Somado a isso apresenta-se um breve resumo da literatura sobre os processos básicos de escoamento de fluido e o impacto da rugosidade nesse fenômeno. Por fim uma explicação sobre a rugosidade superficial e como é realizada a sua medição é detalhada ao final desse capítulo.

2.1. MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva é definida, segundo tradução livre da norma ASTM F2792, como “um processo de união de materiais para criação de objetos a partir de um arquivo de modelo 3D, usualmente camada por camada, ao contrário de processos de manufatura subtrativas. Sinônimos: fabricação aditiva, processo aditivo, técnica aditiva, manufatura aditiva por camada, manufatura por camada e fabricação por forma livre”.

O processo de MA envolve a modelagem do componente em um software de CAD, seguido pela divisão desse componente em múltiplas camadas a serem depositadas individualmente. É programada a sequência de movimentação de um sistema CNC, integrado ao sistema de deposição, permitindo a construção do componente final. A Figura 1 apresenta a sequência de trabalho na manufatura aditiva com o desenho em CAD (a), divisão em múltiplas camadas (b) e fabricação pela deposição das múltiplas camadas (c).

FIGURA 1. ESQUEMA DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA; (A) MODELAGEM, (B) DIVISÃO EM CAMADAS E (C) CONSTRUÇÃO DE CADA CAMADA.



FONTE: Autor (2021).

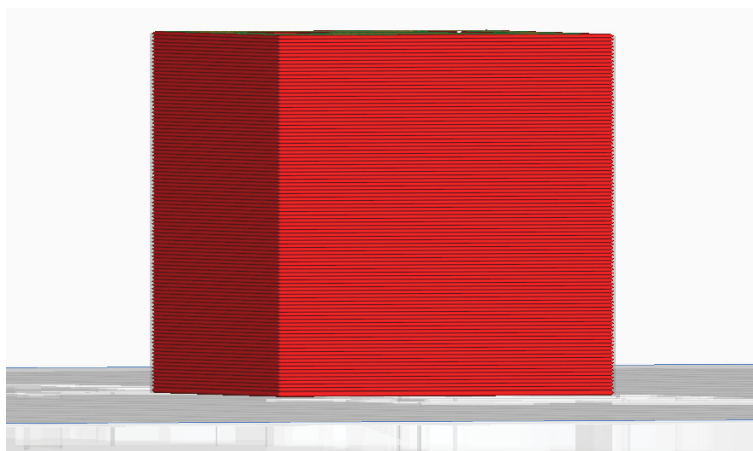
Em 2015 foi estabelecido através da norma ISO/ASTM 52900 a classificação dos principais tipos de processos de manufatura aditiva. São eles Vat photopolymerization, Powder bed fusion, Material extrusion, Material jetting, Binder jetting, Sheet lamination e Directed energy deposition. Sob cada uma desses tipos de processos, vão existir diferentes tecnologias de impressão 3D variando a fonte de energia do processo, tipos de materiais e a forma como os materiais base são alimentados.

Dentre as diferentes tecnologias atualmente existentes, podemos citar algumas que atualmente são as mais amplamente utilizadas no mercado. Dentro da classificação de Vat photopolymerization, destacam-se as tecnologias de estereolitografia (SLA), sendo essa a primeiro tipo de impressão 3D desenvolvido na década de 1980, por Charles Hull, e o Processo de luz digital (DLP). Em ambas as tecnologias, assim como o subprocesso MSLA (Masked Stereolithography), a peça é criada através da fotopolimerização de resinas com a emissão de luz UV.

Outro processo de grande relevância é o Material extrusion, com a tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling) a de principal destaque. Nele, o material é depositado através de um bico aquecido, em um estado maleável, em coordenadas específicas em várias camadas. Após a deposição o material se enrijece na posição formando o objeto. Por fim, outros processos com destaque são os envolvendo manufatura aditiva com metal, como o Powder bed fusion, Binder jetting e Directed energy deposition (Fayazfar, 2018). Entre as tecnologias mais relevantes desses processos existem as de Laser Powder-Bed (LPB, também conhecido como selective laser melting), Laser Powder-Fed e Electron-beam powder-bed fusion (EPBF) (Lee, 2017).

O processo de fabricação camada por camada da impressão 3D tem impacto direto na morfologia das peças construídas. Esse impacto vai desde a geometria macro da peça até as estruturas micro resultantes, por exemplo na fabricação com metais (Frazier, 2014). A expectativa das peças resultantes é que apresentem várias camadas ao longo da construção, como apresentado na figura 2. Essa estrutura tem impacto direto nas propriedades físicas e mecânicas, como resistência à tração e rugosidade. Essa característica da fabricação por impressão 3D resulta em propriedades anisotrópica, ou seja, possuem diferentes valores dependendo da direção na qual é medida (Martina, 2012).

FIGURA 2. SIMULAÇÃO DE CUBO CONSTRUÍDO POR IMPRESSÃO 3D.



FONTE: Autor (2022).

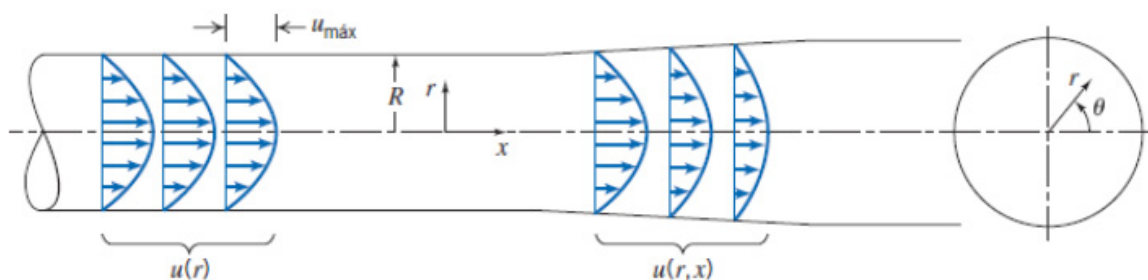
A principal vantagem dos processos de MA com relação a outros meios de fabricação é a agilidade no processo de desenvolvimento e construção de novos componentes. A velocidade com que se conecta esse método de fabricação com processos de design em 3D, somado à versatilidade de fabricação de formas e materiais, permite essa tecnologia ter grandes impactos em diferentes áreas. Atualmente os principais mercados relacionados a MA são o automotivo, aeroespacial e da medicina, porém a agilidade no desenvolvimento de novas peças faz com que a MA tenha grande aplicação no desenvolvimento e testes de novas peças/produtos e fenômenos em diversos tipos de mercado e segmentos.

2.2. ESCOAMENTO DE FLUÍDOS

O estudo da mecânica dos fluidos ocorre desde o início da civilização humana devido aos seus impactos na vida das pessoas. Os problemas iniciais vinculados a esse estudo se referiam ao transporte de água para cidades e povoados. Hoje essa ciência tem impactos nos mais diferentes tipos de situações do nosso dia-a-dia, desde o processo de saneamento e disponibilização de água limpa para as pessoas, até projetos aeroespaciais de foguetes. Uma das principais análises dessa área é o estudo do escoamento dos fluidos. Um escoamento pode ser classificado como uni, bi ou tridimensional, de acordo como a velocidade de escoamento varia ao longo de

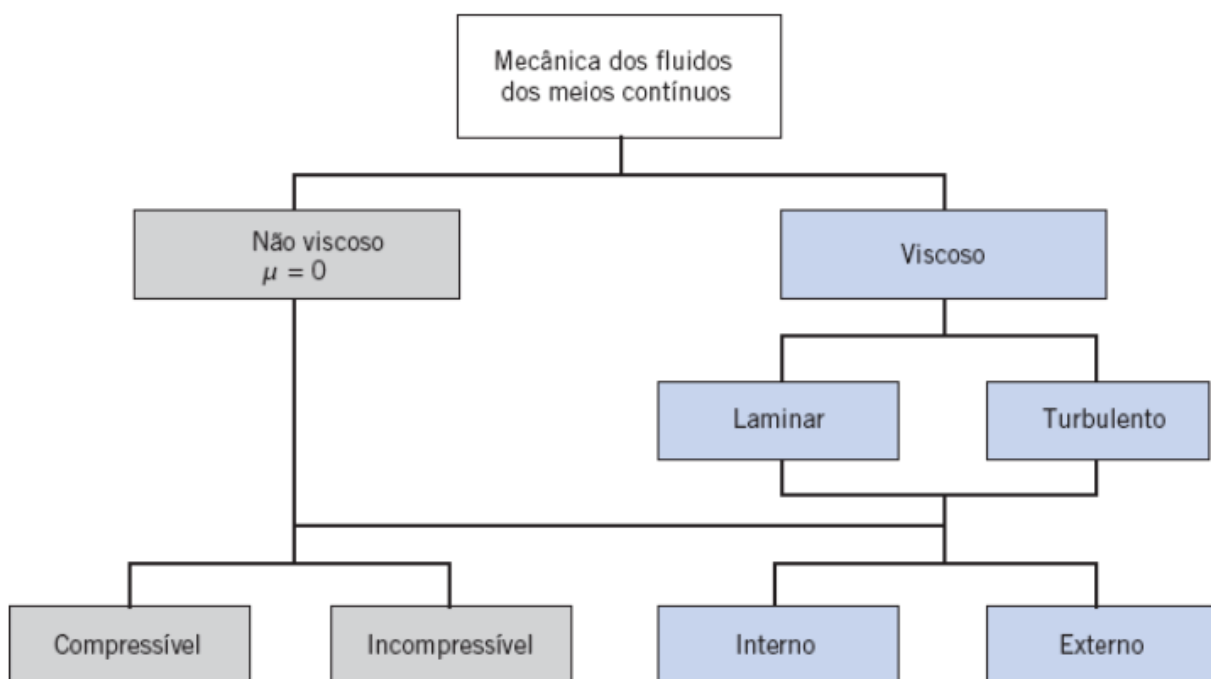
determinadas direções (Tanner, 1985). Outras formas de classificar um escoamento são em meios contínuos, tais como viscoso e não viscoso, laminar e turbulento, interno e externo, compressível ou incompressível (Fox, 2014). A figura 4 apresenta um esquema dessa classificação.

FIGURA 3. EXEMPLOS DE ESCOAMENTOS UNI E BIDIMENSIONAL.



FONTE: Adaptado De Fox, 2014.

FIGURA 4. POSSÍVEL CLASSIFICAÇÃO DE ESCOAMENTO.



FONTE: Adaptado De Fox, 2014.

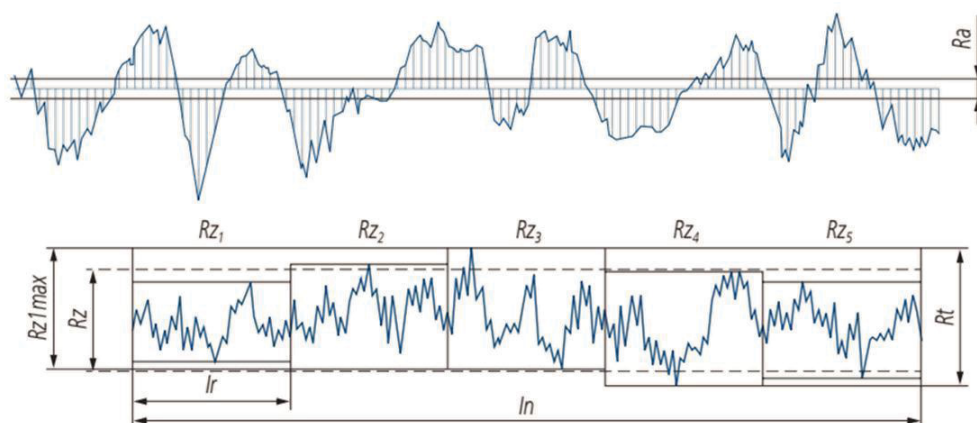
Um dos principais problemas envolvendo escoamento de fluidos é em transportes, quando precisamos transportar um fluido de um ponto A a um ponto B, em sua maioria dentro de dutos. E uma das principais características de um sistema desse tipo é a perda de carga do processo (Çengel, 2015), que representa a altura

adicional a que o fluido precisa ser elevado por uma bomba para superar as perdas devido o atrito do fluido com o tubo. Ou seja, é um fator que ajuda a determinar a potência necessária para o transporte do fluido. Estudos vinculando essa perda de carga à rugosidade da parede dos dutos são feitos a vários anos. Um dos primeiros foi desenvolvido por Nikuradse, no qual o autor demonstrou que superfícies com pequena rugosidade, o efeito da perda por atrito é mínimo, podendo considerar que o escoamento é “liso”, ou seja, sem efeito na perda de carga, sendo este afetado pelo número de Reynolds (Nikuradse, 1933). Com o aumento da rugosidade do tubo, o sistema pode se tornar transiente, nesse caso o fator de perda de carga é uma função da rugosidade e do número de Reynolds. Por fim, em superfícies muito rugosas, o sistema entra em um regime rugoso, onde o fator de perda depende principalmente da rugosidade do tubo.

2.3. RUGOSIDADE

Toda peça/componente possui uma textura superficial única composta por saliências, podendo ser regulares ou irregulares. Essas saliências podem ser perceptíveis ou não dependendo de suas dimensões, e a ela damos o nome de rugosidade (Whitehouse, 2012). O perfil de rugosidade é medido através do resultado da varredura do perfil real com uma sonda que filtra mecanicamente este perfil através do raio na ponta da sonda. A partir dessa varredura, diferentes parâmetros de rugosidade podem ser medidos ou calculados, tais como Ra, Rt, Rz e Rz1max (Mitutoyo, 2016). Na figura 5, é possível observar como são definidos cada um dos parâmetros citados. A direção de varredura utilizada foi simulando a direção de escoamento de um fluido através de canos similares aos corpos de prova, ou seja, perpendicular a direção de deposição vertical, e paralelo a direção de deposição horizontal.

FIGURA 5. DEMONSTRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE.



FONTE: Adaptado De Quick (2016).

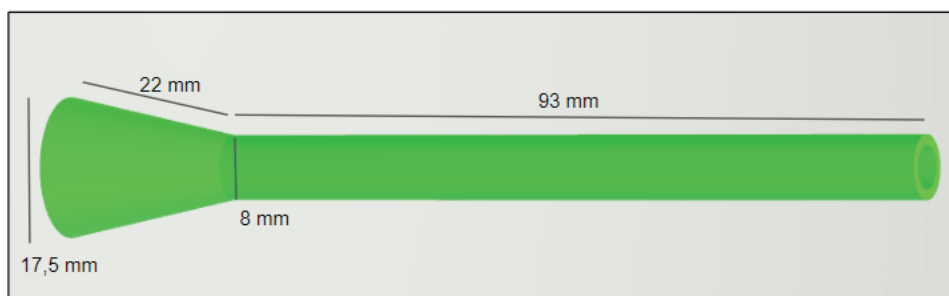
O R_a consiste na média aritmética dos valores absolutos dos desvios do perfil em relação à linha média do perfil de rugosidade. Já o R_t traduz-se como a diferença de altura entre o pico mais alto e o vale mais profundo medidos ao longo de todo o comprimento de avaliação (l_n). Por sua vez, o R_z é a média aritmética dos cinco R_{z_i} medidos ao longo de cinco comprimentos de amostragem (l_r) contidos no comprimento de avaliação, sendo que os R_{z_i} são considerados como a soma da altura do pico mais alto com a profundidade do vale mais profundo em relação à linha média do perfil de rugosidade. Finalmente, o R_{z1max} é definido com o maior valor de R_{z_i} dentre os R_{z_i} medidos em cada um dos cinco comprimentos de amostragem.

3. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O fluxo de estudos deste trabalho consistiu primeiramente na confecção de peças para realização de testes de escoamento e amostras para testes de rugosidade utilizando dois processos de impressão 3D com variação do parâmetro direção de impressão. Em sequência as peças foram inspecionadas visualmente para identificar possíveis falhas, e submetidas a um fluxo de ar, com 2 bar de pressão, para identificar possíveis vazamentos. As amostras foram submetidas a uma avaliação da rugosidade superficial. Por fim as amostras tiveram sua superfície observada por um microscópio óptico para uma melhor visualização dos aspectos superficiais das impressões.

As peças foram modeladas se baseando em um tubo para escoamento interno, com um estreitamento em uma das pontas com formato cônico, simulando variações de diâmetro ao longo de uma tubulação, figura 6. As amostras foram impressas utilizando um formato semicilíndrico, possibilitando a medição de rugosidade na parte que simula uma parede interna de um tubo.

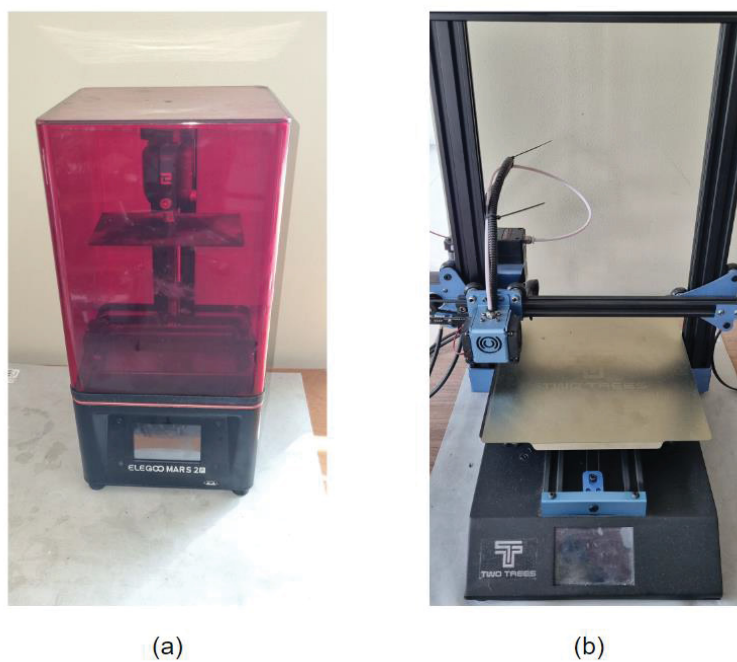
FIGURA 6. PEÇA IMPRESSA PARA TESTES DE ESCOAMENTO.



FONTE: Autor (2022).

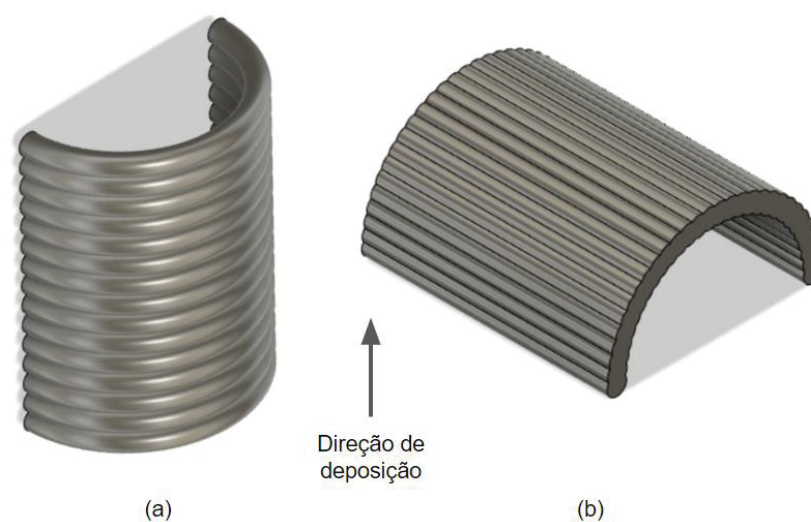
Os processos de impressão 3D utilizados neste estudo foram o FDM e MSLA. Para FDM foi utilizado uma impressora desktop FDM modelo Bluer V2 da fabricante Two Trees, utilizando filamento PLA. Para as amostras confeccionadas em MSLA, utilizamos uma impressora Mars 2 Pro, da fabricante Elegoo, com resina eResin-PLA da fabricante Esun. Na figura 7 estão apresentados os dois equipamentos utilizados. Em cada um dos processos foram feitas dois conjuntos de amostras, variando a direção de deposição, vertical e horizontal, como apresentado na figura 8. Dessa forma obtivemos um conjunto de 4 tipos de amostras (quadro 1). Os demais parâmetros de impressão utilizados estão apresentados no quadro 2.

FIGURA 7. (A) IMPRESSORA MARS 2 PRO E (B) IMPRESSORA BLUER V2.



FONTE: Autor (2022).

FIGURA 8. DIREÇÕES DE IMPRESSÃO UTILIZADAS NOS CONJUNTOS DE AMOSTRAS (A) DIREÇÃO VERTICAL E (B) DIREÇÃO HORIZONTAL.



FONTE: Autor (2022).

QUADRO 1: CONDIÇÕES VARIADAS NOS PROCESSOS DE IMPRESSÃO 3D

Amostras	Processo	Direção
1	FDM	Vertical
2	FDM	Horizontal
3	MSLA	Vertical
4	MSLA	Horizontal

QUADRO 2: PARÂMETROS UTILIZADOS NO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D

Principais parâmetros de impressão			
FDM		MSLA	
Altura de camada	0.1 mm	Altura de camada	0.05 mm
Diâmetro do bico	0.4 mm	Tempo de exposição	4 s
Temp. de Impressão	200°C	Vel. elevação	80 mm/min
Vel. de Impressão	50 mm/s	Vel Retração	200 mm/min

Os testes de rugosidades foram realizados utilizando um equipamento Mitutoyo SJ210 (figura 9). A varredura de medição foi realizada com um comprimento de 12,5mm e velocidade de 0,5 mm/s. As medições foram feitas em 4 corpos de provas para cada uma das condições apresentadas na tabela 1. Para cada corpo de prova foram realizadas 2 medições, totalizando 8 por condição de impressão.

FIGURA 9. EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE MITUTOYO SJ210.



FONTE: Retirada de mitutoyo.com.br.

Por fim também foram realizadas inspeções visuais nas amostras com auxílio de microscópio, para visualizar de forma mais clara as diferenças nas geometrias dos corpos de prova testados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados dos testes realizados para esse trabalho. A ordem dos resultados vai seguir a ordem dos objetivos específicos apresentados anteriormente.

4.1. CONFECÇÃO DE PEÇAS

As peças para testes de escoamento foram produzidas de acordo com os parâmetros especificados anteriormente. As fabricadas com o processo FDM tem sua fabricação camada a camada visualmente perceptível, sendo possível observar as linhas entre as camadas da peça. Na figura 10 é demonstrada a peça fabricada com a direção vertical onde as camadas são perceptíveis. Diferentemente, as peças produzidas com o processo MSLA tem um aspecto visual mais contínuo, sem as camadas aparentes, dando uma percepção de acabamento superficial superior. Na figura 11 é apresentando a peça fabricada por MSLA na direção vertical.

FIGURA 10. PEÇA IMPRESSA COM PROCESSO FDM.



FONTE: Autor (2022).

FIGURA 11. PEÇA IMPRESSA COM PROCESSO MSLA.



FONTE: Autor (2022).

Ao realizar os testes com fluxo de ar por dentro das peças, não foi identificado nenhum vazamento de ar pelas paredes das 4 peças. Com isso pode-se afirmar que todas as 4 condições de impressão produziram peças contínuas, sem falhas de material, podendo ser utilizadas como tubos de estudos de fluxo sem vazamentos por suas paredes.

4.2. DIFERENÇA DE RUGOSIDADE FDM E MSLA

As medições de rugosidade foram realizadas nas amostras semicilíndricas e seus resultados estão apresentados no apêndice 1 desse trabalho. Na tabela 1 está apresentado os valores das médias das medições para as 4 condições de impressão.

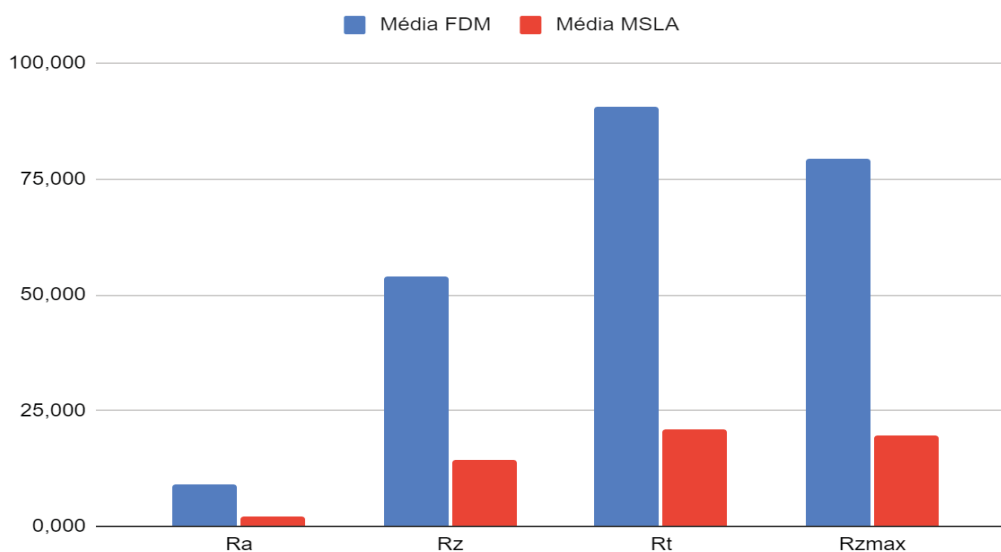
TABELA 1 - Médias de rugosidade

Rugosidade		Ra	Rz	Rt	Rzmax
FDM	Vertical	16,141	99,125	131,265	128,050
	Horizontal	3,506	20,612	40,146	38,851
	Média	9,002	53,951	90,689	79,269
MSLA	Vertical	1,396	9,091	14,136	12,938
	Horizontal	3,831	25,810	47,898	46,895
	Média	2,193	14,319	20,966	19,665

FONTE: Autor (2022).

Analisando os resultados obtidos nos testes apresentados, é visível uma rugosidade mais elevada nas amostras impressas pelo processo FDM. Nos quatro parâmetros medidos pelos testes, as amostras FDM apresentam uma média mais elevada do que as amostras impressas com processo MSLA. A figura 12 apresenta um gráfico com a comparação das médias nos 4 parâmetros medidos. Esse resultado demonstra que para a confecção de peças com menor rugosidade o processo MSLA é mais adequado.

FIGURA 12. GRÁFICO COMPARATIVO COM AS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE.

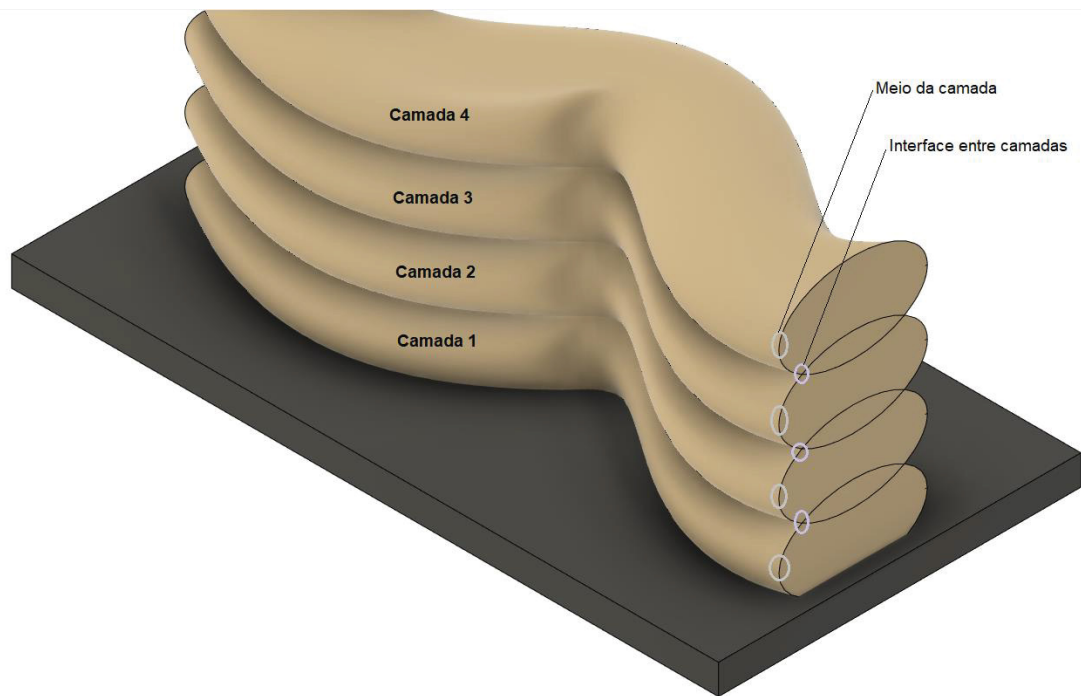


FONTES: Autor (2022).

4.3. DIREÇÃO DE DEPOSIÇÃO

Ao comparar os dois conjuntos de testes das amostras FDM, pode-se observar o impacto da direção de deposição na rugosidade da peça. O conjunto 1 apresentou Ra médio de 16,141 μm contra Ra médio de 3,506 μm do conjunto 2. Os parâmetros Rz e Rt também são mais elevados no conjunto de amostras 1, demonstrando a maior rugosidade nessas peças. Esse comportamento é explicável ao se analisar a geometria das peças impressas pelo processo FDM, figura 13. Durante a impressão a peça é formada pela adição de um pequeno “fio” do polímero, que ao ser adicionado lado a lado formam uma camada, e a repetição desse processo em várias camadas formam o objeto. Esse “fio” possui um formato esférico, e a sobreposição desses “fios” fazem com que a lateral da peça impressa tenha um “relevo” onde as partes mais altas são o meio dos cordões e as partes mais rasas sejam a interface entre esses cordões. Nas amostras com deposição na direção vertical, esse “relevo” foi percorrido pela varredura da rugosidade, identificando vários “picos” e “vales” na peça. Nas amostras com deposição horizontal, a varredura da rugosidade ocorre ao longo de um mesmo cordão, não encontrando essas variações de geometria como no caso anterior.

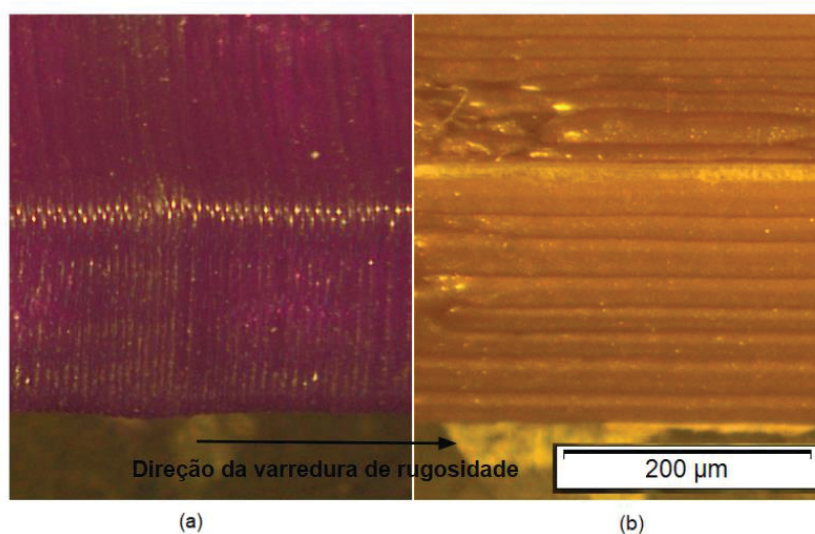
FIGURA 13. ESQUEMA DE DEPOSIÇÃO FDM.



FONTE: Autor (2022).

Ao observar uma imagem ampliada dos corpos de prova, é possível visualizar essa diferença na superfície das peças, figura 14. Nas amostras com deposição vertical, podemos ver várias camadas ao longo da direção de medição da rugosidade. Enquanto nas peças com deposição horizontal a varredura percorre porcas camadas, não encontrando uma rugosidade tão elevada como no primeiro caso. Vale ressaltar que se medirmos a rugosidade em uma direção diferente, por exemplo perpendicular à primeira medição, o resultado do teste será diferente, devido a essas características de fabricação da impressão 3D FDM.

FIGURA 14. AMOSTRAS IMPRESSAS EM FDM NA (A) VERTICAL E (B) HORIZONTAL.



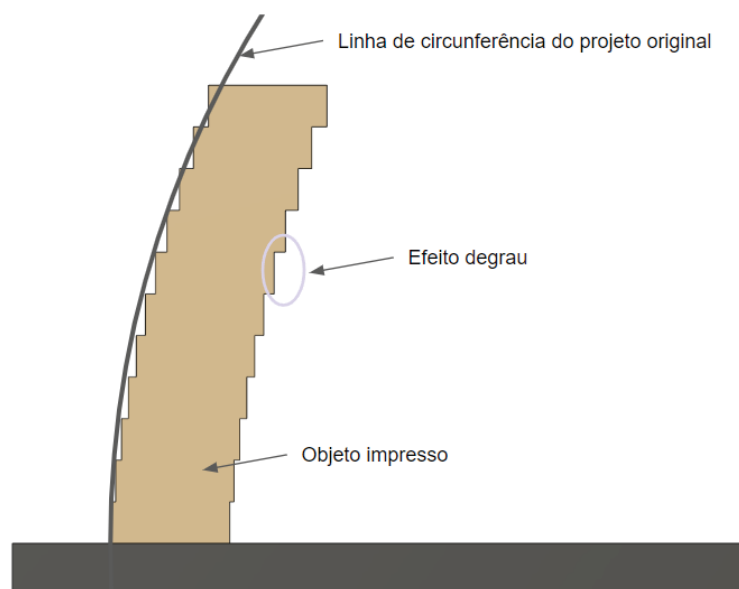
FONTE: Autor (2022).

Ao analisar os resultados das amostras impressas pelo processo de MSLA, é observado um comportamento diferente. Ambas amostras apresentaram um nível baixo de rugosidade, mas diferente do processo FDM, a amostra impressa na vertical apresentou menor rugosidade do que comparada à impressa na horizontal (Ra médio de 1,396 μm vs. Ra médio de 3,831 μm). Para entender esse resultado novamente precisa-se visualizar de forma macro a impressão. Nos processos MSLA, uma camada é impressa toda de uma única vez, diferente do processo FDM que precisa adicionar vários “fios” lateralmente. Além disso, as bordas das camadas apresentam um formato mais reto, diferente das circunferências do processo FDM. Assim a varredura de rugosidade ao percorrer várias camadas, não vai encontrar muitos vales e picos, devido a essa geometria. Outro ponto que ajuda nessa lateral mais retilínea é a precisão nos eixos X e Y de uma impressora MSLA. Nesse caso o posicionamento nesses eixos é feito pelos acendimentos dos pixels da tela LCD da impressora, sendo mais preciso que o movimento acionado pelos motores de passo da impressora FDM, gerando uma superfície com baixa rugosidade.

Na amostra impressa horizontalmente, as camadas mais retilíneas vão ter um impacto maior na rugosidade, devido ao formato do corpo de prova ser circular. Na figura 15 é apresentado um esquema da impressão para um formato circular como o caso das amostras confeccionadas. Nela observa-se que as camadas retas ao serem sobrepostas para formar um objeto circular, criam um processo de degraus entre as camadas. Mesmo com a varredura de rugosidade estando na direção perpendicular a

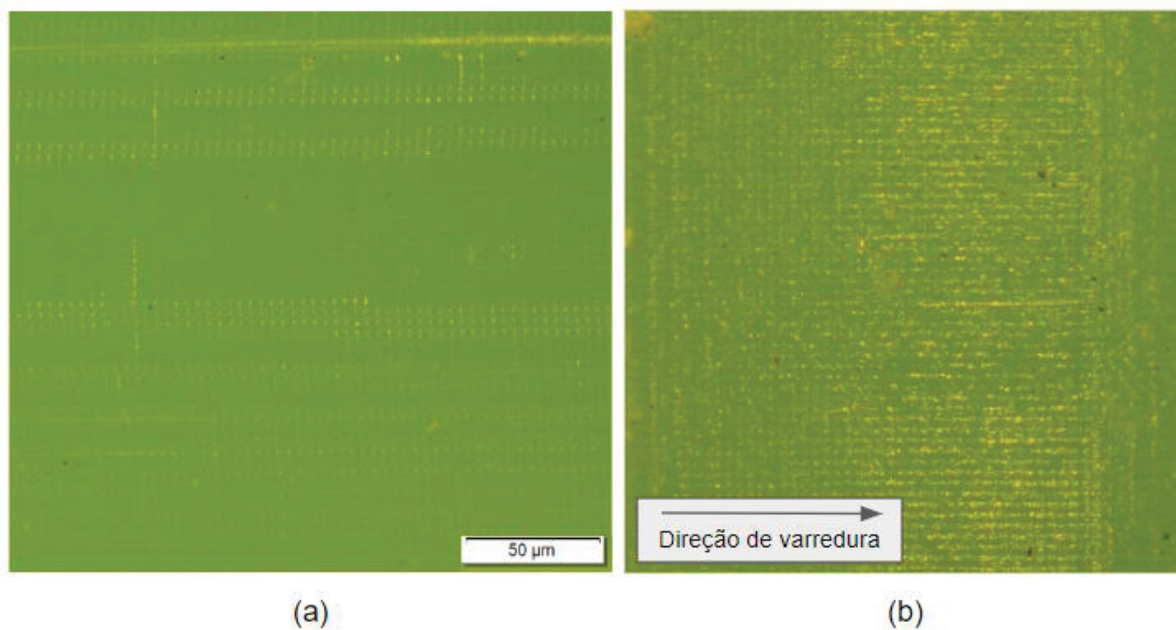
esses degraus, a pequena altura da camada (0,05mm) faz com que a sonda passe por alguns degraus, impactando na medição.

FIGURA 15. ESQUEMA DE IMPRESSÃO 3D DE PEÇAS CILÍNDRICAS.



FONTE: Autor (2022).

FIGURA 16. AMOSTRAS IMPRESSAS EM MSLA NA (A) VERTICAL E (B) HORIZONTAL.



FONTE: Autor (2022).

Na figura 16 podemos observar duas fotografias retiradas das amostras impressas com o processo MSLA. Nelas é perceptível que a amostra impressa na vertical apresenta algumas interfaces entre as camadas, mas de maneira muito mais sutil do que se comparada às de FDM. Na fotografia da amostra impressa na horizontal, é perceptível um maior número de linhas do que na amostra na vertical, fruto do efeito degraus gerado no processo de impressão de uma peça circular.

5. CONCLUSÕES

Os estudos realizados demonstram a possibilidade de fabricação de peças para estudos de fenômenos de escoamento com a impressão 3D de baixo custo. As diferenças na rugosidade de peças impressas utilizando os processos de FDM e MSLA demonstram que a seleção do processo pode ter grande efeito na qualidade da peça. Dessa forma é possível indicar qual tipo de processo trará menor impacto em escoamento de fluidos.

- Os estudos demonstram que ambos os processos de impressão 3D selecionados são capazes de criar peças contínuas, podendo serem utilizadas como meio de fabricação de componentes para estudos de escoamento;
- O processo FDM apresentou uma rugosidade mais elevada ao comparar com o processo MSLA, indicando uma qualidade superficial de pós fabricação inferior, o que poderá ocasionar maiores impactos em escoamentos internos de fluidos;
- A direção de deposição também resulta em mudanças na rugosidade das peças impressas. Para o processo FDM, a rugosidade na superfície da peça sofre mais impacto pela presença das interfaces entre camadas. Para o processo MSLA, a superfície foi mais impactada pelo efeito degrau ocorrido na fabricação de peças cilíndricas.

Com isso concluímos que para peças com o objetivo de teste de escoamento, ambos os processos são capazes de construir peças funcionais. Ao utilizar o processo FDM, a seleção de parâmetros de deposição tem maior impacto na qualidade superficial da peça, e como consequência na sua rugosidade> dessa forma, ao utilizar o processo FDM, a escolha de parâmetros necessita ser mais rigorosa, para a que a rugosidade não seja elevada, de forma a impactar o escoamento do fluido. Ao utilizar o processo MSLA, as peças possuem boa qualidade superficial, de forma que a rugosidade delas tenham mínimo impacto no escoamento do fluido.

5.1. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de trabalhos futuros para enriquecimento do tema tratado neste estudo, sugere-se os seguintes tópicos:

- ∄ Medição bidimensional da rugosidade para entender melhor o perfil da rugosidade superficial de peças impressas;
- ∄ Impacto da variação de outros parâmetros como altura da camada e velocidade de deposição;
- ∄ Análise de fluxo real com dutos impressos em 3D, para um melhor entendimento da perda de carga vinculado a testes com peças impressas;
- ∄ utilização de outros materiais e processos de impressão 3D para a confecção das amostras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM F2792-12a, **Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies**, (Withdrawn 2015), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org

Bourell, D. L. **Perspectives on Additive Manufacturing**. Annual Review of Materials Research, vol 46(1), pp 1–18, 2016. doi:10.1146/annurev-matsci-070115-031606

Çengel, Y.A, Cimbala, J.M., **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. 3ª edição. São Paulo. AMGH Editora Ltda, 2015.

Fayazfar, H. et al. **A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys: Process parameters, microstructure and mechanical properties**. Materials and Design, vol. 144, pp. 98-128, 2018.

Fox, R.W, McDonald, A. T, Pritchard, P.J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8ª edição. Rio de Janeiro. Editora LTC S.A., 2014.

Frazier W. E. **Metal Additive Manufacturing: A Review**. Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 23, no. 6, pp. 1917 - 1928, 2014. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z

Gibson, I.; Stucker, B. Rosen, D. W. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. New York, Springer, 2010.

Guimarães, J.S, Leite, V.S.F.O., Minucci, M.A.S. Carinhana, D. **Case study of the additive manufacturing application in the supersonic flow researches**, Rapid Prototyping Journal, Vol. 27 No. 8, pp. 1480-1488. 2021. <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2020-0105>

Hull, C.W. **Method for production of three-dimensional objects by stereolithography**, 3D Systems, Inc. US Patent 4,929,402, 29 May 1990.

Kim, M. **Design and Manufacturing Technology of Heat Exchanger in Air Compressor for Railroad Vehicle by 3D Printing Process**, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.18, no.11, pp.802-809, 2017.

Kim, M. Moosun, K. **Numerical Study on the Super Sonic Phenomenon of Compressed Air according to the Flow Path Conditions**. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 20, pp. 470-476, 2019. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.1.470>

Lee, H.J. **Structure Optimization and 3D Printing Manufacture Technology of Pull Cord Switch Components Applied to Power Plant Coal Yard**, Journal of the Korea

Academia-Industrial cooperation Society, vol.17, no.10, pp.319-330, 2016.
<https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.10.319>

Lee, H. et al. **Lasers in Additive Manufacturing: A Review**. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-green Technology, vol. 4, no. 3, pp. 307-322, 2017. DOI: 10.1007/s40684-017-0037-7

Martina, F. et al., **Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V**. Journal of Materials Processing Technology, p. 1377-1386, 2012.

Nikuradse, J. **Laws of Flow in Rough Pipes: NACA**, Relatório Técnico N° 1292, 1933.

Passmann, M. Wiesche, S. **Development and Commissioning of a Supersonic Blow Down Wind Tunnel for Educational Purposes**. Proceedings of the ASME 2017 Fluids Engineering Division Summer Meeting. Volume 2, Fora: Cavitation and Multiphase Flow; Advances in Fluids Engineering Education. Waikoloa, Hawaii, USA. 2017. V002T17A002. ASME. <https://doi.org/10.1115/FEDSM2017-69196>

QUICK guide to surface roughness measurement: Reference guide for laboratory and workshop. Aurora: Mitutoyo, 2016. 6 p.

Reports and Data. Disponível em: <https://www.reportsanddata.com/report-detail/additive-manufacturing-market>. Acesso em: 11 de julho de 2021.

Rosa, P.M. **Estudo Do Escoamento Turbulento Em Dutos Corrugados Com Cavidade Helicoidal**. 2014. 115p. Dissertação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, PR. 2014

Sun, C. Fang, N. Wu, D. Zhang, X. **Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask**. Sensor Actuat A-Phys 121:113–120. 2005

Whitehouse, D. **Surfaces and their Measurement**. 1ª edição. Boston. Editora Butterworth-Heinemann. 2012.

Yi, H.W. Lee, Y.M. Shin, B.S, Lee, T.G. Kang, M.C. **Prototype Manufacturing Using 3D Printing and Characteristics of Flow and Dynamics for High Temperature Solenoid**, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, vol.33, no.5, pp.341-348, 2016. <https://doi.org/10.7736/KSPE.2016.33.5.341>

APÊNDICE 1 – TESTES DE RUGOSIDADE

Resultado dos testes de rugosidade para amostras FDM na vertical:

Amostras 1		Ra	Rz	Rt	Rzmax
CP 1	1	14,754	85,365	107,950	94,717
	2	15,254	89,910	128,840	128,840
	Média	15,004	87,638	118,395	111,779
CP 2	1	12,698	79,635	118,910	110,880
	2	13,282	80,322	110,590	110,290
	Média	12,990	79,979	114,750	110,585
CP 3	1	25,553	149,640	207,520	205,430
	2	19,662	120,900	137,620	133,440
	Média	22,608	135,270	172,570	169,435
CP 4	1	17,028	108,340	133,690	127,260
	2	18,947	115,190	207,400	207,400
	Média	17,988	111,765	170,545	167,330
Média total		16,141	99,125	131,265	128,050

Resultado dos testes de rugosidade para amostras FDM na horizontal:

Amostras 2		Ra	Rz	Rt	Rzmax
CP 1	1	3,730	28,267	73,427	63,820
	2	2,418	10,883	15,326	15,820
	Média	3,074	19,575	44,377	39,820
CP 2	1	2,064	9,394	11,729	11,326
	2	5,305	22,628	38,062	37,142
	Média	3,685	16,011	24,896	24,234
CP 3	1	4,619	22,426	42,230	42,230
	2	3,282	18,798	57,965	57,965
	Média	3,951	20,612	50,098	50,098
CP 4	1	4,508	23,046	43,292	40,560
	2	3,035	15,830	30,095	30,045
	Média	3,772	19,438	36,694	35,303
Média total		3,506	20,612	40,146	38,851

Resultado dos testes de rugosidade para amostras MSLA na vertical:

Amostras 3		Ra	Rz	Rt	Rzmax
CP 1	1	1,195	7,410	14,279	12,947
	2	1,427	9,328	12,705	12,705
	Média	1,311	8,369	13,492	12,826
CP 2	1	1,552	10,815	13,396	12,929
	2	1,258	8,853	13,992	12,575
	Média	1,405	9,834	13,694	12,752
CP 3	1	1,975	14,196	17,273	17,206
	2	1,122	8,190	14,741	13,016
	Média	1,549	11,193	16,007	15,111
CP 4	1	2,171	13,647	18,350	16,545
	2	1,364	8,494	13,047	11,860
	Média	1,768	11,071	15,699	14,203
Média total		1,396	9,091	14,136	12,938

Resultado dos testes de rugosidade para amostras MSLA na horizontal:

Amostras 4		Ra	Rz	Rt	Rzmax
CP 1	1	5,297	30,349	63,843	57,568
	2	3,316	24,359	44,167	42,039
	Média	4,307	27,354	54,005	49,804
CP 2	1	6,166	45,174	77,214	60,973
	2	4,346	27,261	44,167	42,039
	Média	5,256	36,218	60,691	51,506
CP 3	1	5,297	30,349	63,843	57,568
	2	3,316	24,359	44,371	42,366
	Média	4,307	27,354	54,107	49,967
CP 4	1	2,587	21,405	51,424	51,424
	2	2,214	14,442	23,581	22,124
	Média	2,401	17,924	37,503	36,774
Média total		3,831	25,810	47,898	46,895