

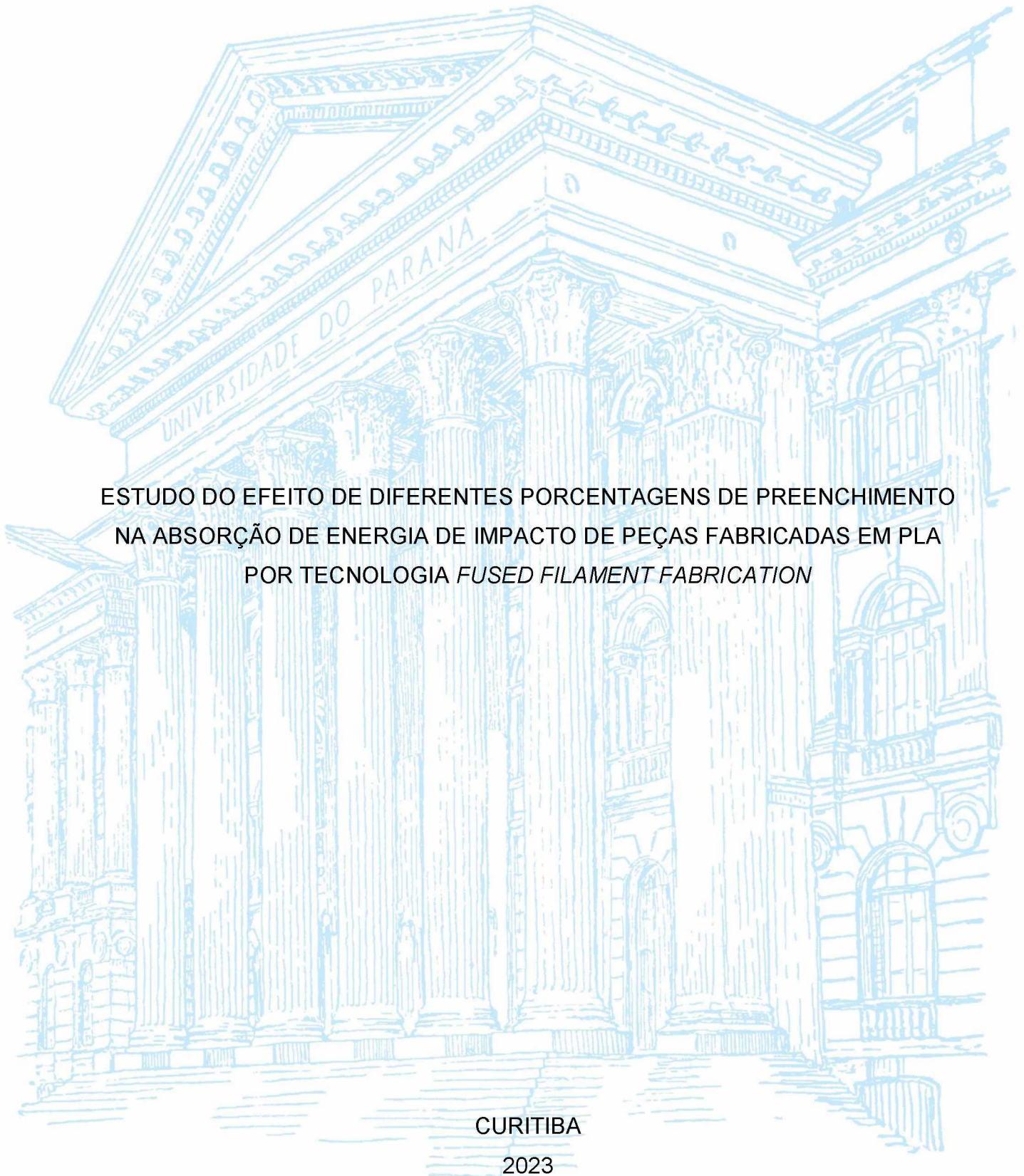
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RICARDO JÚNIOR DE OLIVEIRA SILVA

ESTUDO DO EFEITO DE DIFERENTES PORCENTAGENS DE PREENCHIMENTO  
NA ABSORÇÃO DE ENERGIA DE IMPACTO DE PEÇAS FABRICADAS EM PLA  
POR TECNOLOGIA *FUSED FILAMENT FABRICATION*

CURITIBA

2023



RICARDO JÚNIOR DE OLIVEIRA SILVA

ESTUDO DO EFEITO DE DIFERENTES PORCENTAGENS DE PREENCHIMENTO  
NA ABSORÇÃO DE ENERGIA DE IMPACTO DE PEÇAS FABRICADAS EM PLA  
POR TECNOLOGIA *FUSED FILAMENT FABRICATION*

Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia de  
Produção, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia  
de Produção, Setor de Tecnologia, da Universidade  
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Oscar Drozda

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Silva, Ricardo Júnior de Oliveira

Estudo do efeito de diferentes porcentagens de preenchimento na absorção de energia de impacto de peças fabricadas em PLA por tecnologia Fused Filament Fabrication / Ricardo Júnior de Oliveira Silva. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Orientador: Fabiano Oscar Drozda

1. Filamentos – Produção. 2. Ácido polilático. 3. Energia – absorção. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Drozda, Fabiano Oscar. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO - 40001016070P1

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE PRODUÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **RICARDO JÚNIOR DE OLIVEIRA SILVA** intitulada: **ESTUDO DO EFEITO DE DIFERENTES PORCENTAGENS DE PREENCHIMENTO NA ABSORÇÃO DE ENERGIA DE IMPACTO DE PEÇAS FABRICADAS EM PLA POR TECNOLOGIA FUSED FILAMENT FABRICATION.**, sob orientação do Prof. Dr. **FABIANO OSCAR DROZDA**, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 31 de Março de 2023.

Assinatura Eletrônica  
20/04/2023 11:15:24.0  
FABIANO OSCAR DROZDA  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
20/04/2023 12:00:09.0  
DALMARINO SETTI  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO  
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
20/04/2023 11:48:58.0  
MARCOS AUGUSTO MENDES MARQUES  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
25/04/2023 11:33:49.0  
SIDNEI ANTONIO PIANARO  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA)

*Dedico este trabalho a Deus por sempre estar ao meu lado nos momentos  
mais difíceis e sempre me abençoar.  
À minha mãe e avó por sempre estarem comigo em todos os momentos.*

## AGRADECIMENTOS

Faltam-me palavras para agradecer a Deus pelo privilégio de ter conseguido realizar meu sonho de fazer mestrado. O “muito obrigado” é pouco para descrever a minha gratidão, Senhor.

Agradeço à minha mãe, grande apoiadora de todas as minhas escolhas desde a minha infância. Mãe, à senhora devo a vida e todas as minhas conquistas.

À minha amada avó por sempre orar por mim e ser a pessoa mais adorável, amada e doce que existe.

À toda minha família por sempre me apoiarem e vibrarem por minhas conquistas. Sinto-me abençoado por tê-los como família.

A todos os professores da graduação que passaram pela minha vida e me incentivaram. Em especial às professoras Dayse, minha orientadora na graduação e a pessoa a qual me apresentou para a pesquisa e sempre incentivou minha trajetória acadêmica, Jéssika pela ajuda em diversos momentos, e Dayane por todo o auxílio acadêmico e pessoal para que este trabalho fosse possível.

Aos amigos que o mestrado me proporcionou. Em especial ao Davi, meu amigo de laboratório, por toda a ajuda e companheirismo.

Ao meu orientador, Dr. Fabiano Drozda, pela oportunidade que me deu ao aceitar-me como orientando, por todo apoio durante os dois anos de mestrado, por ser paciente em momentos difíceis e por todos os direcionamentos e conselhos. Professor, a cada dia passei a admirá-lo mais. Muito obrigado!

A todos os professores do PPGEF-UFPR e à Universidade Federal do Paraná.

À CAPES pelo auxílio financeiro a mim concedido.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram para que esta pesquisa fosse possível, o meu muito obrigado!

*E tudo quanto fizerdes, fazei-o de todo o coração,  
como ao Senhor, e não aos homens.*

**Colossenses 3:23**

*Alegrem-se na esperança, sejam pacientes na tribulação,  
perseverem na oração.*

**Romanos 12:12**

*Pois dele, por ele e para ele são todas as coisas.  
A ele seja a glória para sempre! Amém.*

**Romanos 11:36**

## RESUMO

*Fused Filament Fabrication* (FFF) é uma das mais conhecidas tecnologias de fabricação aditiva atualmente. Devido ao seu processo produtivo sem muitas restrições para fabricação e baixo custo de aquisição, essa tecnologia possibilita a produção desde peças com estruturas simples, até fabricações mais complexas. Ao estudar sobre manufatura aditiva por tecnologia FFF, percebe-se que há certo interesse por parte da comunidade científica em avaliar as relações entre porcentagens de preenchimento, tipos de preenchimento e as propriedades mecânicas adquiridas decorrente das escolhas dos parâmetros de impressão. Como o objetivo geral, este estudo propôs: analisar a influência de diferentes porcentagens de preenchimento em peças fabricadas em PLA por tecnologia FFF na absorção de energia de impacto. Para tanto, uma investigação foi feita usando peças com porcentagens de 20%, 50% e 80% com e sem recurso interno testadas em ensaio Charpy, com base na norma ASTM D6110-10. O recurso interno possibilitou redefinir o projeto no interior da peça, alterando o modelo básico de uso de um tipo só de estrutura, para uma combinação de preenchimentos. Os resultados foram analisados por meio de análise estatística ANOVA. Por conseguinte, as amostras foram submetidas à microscopia de varredura eletrônica (MEV) e as micrografias analisadas com base na literatura especializada. Foi verificado que os melhores resultados de absorção de energia foram obtidos quando as peças possuíam preenchimento em ambas as camadas, tanto interna quanto externa. Ademais, foi constatado que o lote 80E 80I apresentou um aumento mínimo na absorção de energia e na massa, e um aumento considerável no tempo de impressão. Por outro lado, o lote 20E 20I obteve um ganho significativo nessas três variáveis.

**Palavras-chave:** Propagação de trincas; *Fused Filament Fabrication* (FFF); Absorção de energia; *Charpy*.

## ABSTRACT

Fused Filament Fabrication (FFF) is one of the most well-known additive manufacturing technologies today. Due to its production process without many restrictions for manufacturing and low acquisition cost, this technology enables the production from parts with simple structures, to more complex manufactures. When studying additive manufacturing by FFF technology, it is noticed that there is some interest on the part of the scientific community in evaluating the relationships between filling percentages, types of filling and the mechanical properties acquired due to the choices of printing parameters. As the general objective, this study proposed: to analyze the influence of different filling percentages in parts manufactured in PLA by FFF technology on the absorption of impact energy. To this end, an investigation was made using parts with percentages of 20%, 50% and 80% with and without internal resource tested in Charpy test, based on the ASTM D6110-10 standard. The built-in feature made it possible to redefine the design inside the part by changing the basic model of use from a single type of structure to a combination of fills. The results were analyzed by ANOVA statistical analysis. Therefore, the samples were submitted to scanning electron microscopy (SEM) and the micrographs were analyzed based on the specialized literature. It was verified that the best results of energy absorption were obtained when the pieces had filling in both layers, both internal and external. In addition, it was found that the 80E 80I batch showed a minimal increase in energy absorption and mass, and a considerable increase in printing time. On the other hand, lot 20E 20I obtained a significant gain in these three variables.

**Keywords:** Propagation of cracks; Fused Filament Fabrication (FFF); Energy absorption; Charpy.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FLUXO DE PROCESSOS DA MANUFATURA ADITIVA.....	24
FIGURA 2 – PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA .....	26
FIGURA 3 – MODELO DAS PARTES DE FUNCIONAMENTO DE UMA IMPRESSORA FFF.....	29
FIGURA 4 – <i>AIR GAP</i> NEGATIVO, <i>AIR GAP</i> NULO E <i>AIR GAP</i> POSITIVO NA ESTRUTURA FEITA PELA IMPRESSORA 3D.....	31
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DE ESPAÇOS VAZIOS DENTRO DAS CAMADAS MESMO COM FILAMENTOS COM <i>AIR GAP</i> NEGATIVO .....	32
FIGURA 6 – ESTRUTURA DAS CAMADAS, ESPESSURA DA CAMADA, <i>RASTER</i> <i>ANGLE</i> OU ÂNGULO DE VARREDURA, ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO E ESTRATÉGIA DE PREENCHIMENTO DAS PEÇAS FEITAS POR TECNOLOGIA ADITIVA FFF .....	33
FIGURA 7 – ORIENTAÇÕES DE IMPRESSÃO – HORIZONTAL, LATERAL E VERTICAL.....	33
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO DE TESTE <i>IZOD</i> E <i>CHARPY</i> FEITOS EM PEÇAS IMPRESSAS VERTICALMENTE (A; A.1) E HORIZONTALMENTE (B; B.1).....	34
FIGURA 9 – DIFERENÇA DE ACABAMENTO ENTRE PEÇAS, UMA UTILIZANDO CAMADAS MAIS FINAS E OUTRA CAMADAS MAIS ESPEÇAS .....	35
FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE O BICO EXTRUSOR E A MESA DE IMPRESSÃO RESULTANDO NA ESPESSURA DA CAMADA.....	36
FIGURA 11 – MESA DE IMPRESSÃO COM PEÇA E SUAS DIFERENÇAS DE TEMPERATURAS: COM MAIOR CONCENTRAÇÃO DE CALOR E COM CALOR PARCIALMENTE DISSIPADO .....	37
FIGURA 12 – TIPOS DE PREENCHIMENTOS INTERNOS NA IMPRESSÃO 3D ...	38
FIGURA 13 – EXEMPLIFICAÇÃO DAS PORCENTAGENS DE PREENCHIMENTO .....	39
FIGURA 14 – VARIAÇÕES DE <i>RASTER ANGLE</i> : 0°, 45° E 90° .....	40
FIGURA 15 – FÓRMULA MOLECULAR DA POLIMERIZAÇÃO DO ÁCIDO LÁTICO (POLICONDENSAÇÃO DIRETA E POLIMERIZAÇÃO POR ABERTURA DE ANEL) .....	42

FIGURA 16 – CICLO DO PLA.....	43
FIGURA 17 – PRINCÍPIO FÍSICO-MECÂNICO DO FUNCIONAMENTO DO PÊNDULO A MARTELO .....	44
FIGURA 18 – EXEMPLO DE REPRESENTAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO TESTE DE IMPACTO <i>CHARPY</i> PELA NORMA ASTM D6110-10.....	45
FIGURA 19 – ELEMENTOS ENVOLVIDOS NA COLETA DE DADOS EM UM TESTE DE IMPACTO INSTRUMENTADO.....	46
FIGURA 20 – MICROGRAFIAS REALIZADAS EM PEÇAS FEITAS POR FDM (FFF) E MOLDAGEM POR INJEÇÃO EM PLA (A–B), ABS (C–D), E NYLON 6 (E–F).....	49
FIGURA 21 – PEÇA PARA ENSAIO DE IMPACTO COM DIFERENTES PORCENTAGENS DE PREENCHIMENTO.....	51
FIGURA 22 – FLUXO DE ATIVIDADES DA PESQUISA .....	56
FIGURA 23 – DESENHO NORMA ASTM D6110–10. ....	58
FIGURA 24 – DESENHO TÉCNICO DA PEÇA .....	59
FIGURA 25 - REPRESENTAÇÃO 3D DA PEÇA .....	59
FIGURA 26 – PEÇA EM CONVERSÃO PARA FORMATO STL.....	60
FIGURA 27 – MEDIDAS DO RECURSO INTERNO .....	60
FIGURA 28 – REPRESENTAÇÃO DA PEÇA NO CURA COM SOMENTE 20% DE PREENCHIMENTO (20E).....	61
FIGURA 29 – REPRESENTAÇÃO DA PEÇA NO CURA COM 20% EXTERNO E 0% INTERNO DE PREENCHIMENTO (20E 0I).....	61
FIGURA 30 – REPRESENTAÇÃO DA PEÇA NO CURA COM 20% DE PREENCHIMENTO MAIS AS PAREDES DO RECURSO INTERNO (20E 20I) .....	62
FIGURA 31 - EXEMPLIFICAÇÃO DA CONSTRUÇÃO DAS CAMADAS DO PREENCHIMENTO TIPO LINHA.....	63
FIGURA 32 – ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO DO LOTE .....	64
FIGURA 33 – EXEMPLIFICAÇÃO DE PEÇA COM MAIS DE UMA PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO SEM A PAREDE DO RECURSO INTERNO..	65
FIGURA 34 – ETAPAS DE FABRICAÇÃO DE UMA PEÇA 3D SEM E COM RECURSO INTERNO .....	67
FIGURA 35 – VISTA SUPERIOR DA IMPRESSÃO DO PRIMEIRO LOTE DE PEÇAS .....	69

FIGURA 36 – COTAS MEDIDAS COM O PAQUÍMETROS.....	70
FIGURA 37 – LOTES IMPRESSOS.....	71
FIGURA 38 – FOTO APROXIMADA DO ENTALHE DE UMA PEÇA IMPRESSA HORIZONTALMENTE.....	74
FIGURA 39 – FOTO APROXIMADA DO ENTALHE DE UMA PEÇA IMPRESSA LATERALMENTE.....	74
FIGURA 40 – EXEMPLIFICAÇÃO DA CONSTRUÇÃO DA PEÇA HORIZONTALMENTE (A) E LATERALMENTE (B) .....	75
FIGURA 41 – VISTA FRONTAL DA PEÇA COM ENTALHE E SUAS MEDIÇÕES ..	78
FIGURA 42 – SIMULAÇÃO DE PEÇA COM SOMENTE A PAREDE EXTERNA (0E) .....	79
FIGURA 43 – SIMULAÇÃO DE PEÇA COM PAREDE EXTERNA E INTERNA (0E 0I) .....	79
FIGURA 44 – PEÇA SEM RECURSO INTERNO, PEÇA COM RECURSO INTERNO SEM PREENCHIMENTO E PEÇA COM RECURSO INTERNO PREENCHIDO .....	82
FIGURA 45 – PEÇAS APÓS TESTE <i>CHARPY</i> ((A: 20E, 50E, 80E); (B: 20E 20I, 50E 50I, 80E 80I); (C: 20E 0I, 50E 0I, 80E 0I)).....	92
FIGURA 46 – PEÇAS APÓS TESTE <i>CHARPY</i> ((D: 20E 50I, 20E 80I, 50E 20I); (E: 80E 50I, 50E 80I, 80E 20I)).....	92
FIGURA 47 – MICROGRAFIA DA PEÇA 20E 0I PRÓXIMO AO ENTALHE (A) E NA PAREDE INTERNA (B).....	93
FIGURA 48 - MICROGRAFIA DA PEÇA 50E 0I PRÓXIMO AO ENTALHE (C) E NA PAREDE INTERNA (D).....	93
FIGURA 49 - MICROGRAFIA DA PEÇA 80E 0I PRÓXIMO AO ENTALHE (E) E NA PAREDE INTERNA (F) .....	94
FIGURA 50 – SIMULAÇÃO DE TENSÕES E FRATURA NAS PEÇAS .....	95
FIGURA 51 – SIMULAÇÃO DE TENSÕES E FRATURA NO RECURSO INTERNO	96
FIGURA 52 – DISTRIBUIÇÃO DE FORÇA NA PEÇA 20E 20I .....	96
FIGURA 53 – DISTRIBUIÇÃO DE FORÇA NA PEÇA 20E 80I.....	97
FIGURA 54 – SENTIDO DA PAREDE DO RECURSO INTERNO .....	97
FIGURA 55 – REPRESENTAÇÃO DE FRATURA VISTA INTERNAMENTE EM UMA PEÇA 20E 20I .....	98
FIGURA 56 – PARTE SUPERIOR DA PEÇA 20E 20I FRATURADA .....	98

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ARRANJO DE PORCENTAGENS DE PREENCHIMENTO .....	50
TABELA 2 – COMBINAÇÕES DE PORCENTAGENS DE PREENCHIMENTO: 2 <sup>a</sup> PARTE .....	61
TABELA 3 – COMBINAÇÕES DE PORCENTAGENS DE PREENCHIMENTO: 3 <sup>a</sup> PARTE .....	62
TABELA 4 – COMBINAÇÕES DE PORCENTAGENS DE PREENCHIMENTO.....	62
TABELA 5 – ANOVA ENERGIA DE IMPACTO – PREENCHIMENTO E OCO.....	83
TABELA 6 – ANOVA ENERGIA DE IMPACTO – PREENCHIMENTO E PAREDE .	86
TABELA 7 – ANOVA ENERGIA DE IMPACTO: PREENCHIMENTO EXTERNO E INTERNO .....	90
TABELA 8 – PORCENTAGENS DE GANHO DE MASSA, TEMPO DE IMPRESSÃO E ENERGIA ABSORVIDA EM RELAÇÃO ÀS COMBINAÇÕES.....	91

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – PARÂMETROS FIXOS DE IMPRESSÃO.....	53
QUADRO 2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS.....	57
QUADRO 3 – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO FILAMENTO.....	58
QUADRO 4 – PARÂMETROS GERAIS DE IMPRESSÃO UTILIZADOS NO TRABALHO.....	64
QUADRO 5 – ORDEM DE IMPRESSÃO.....	65

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA ( $T_g$ ) DO PLA COMERCIAL.....	48
GRÁFICO 2 – TEMPOS DE IMPRESSÃO DOS LOTES: REAL <i>VERSUS</i> ESTIMADO .....	72
GRÁFICO 3 – COMPARAÇÃO DE TEMPOS DE IMPRESSÃO DE PEÇAS COM E SEM RECURSO INTERNO .....	72
GRÁFICO 4 – DIFERENÇAS DE TEMPO DE IMPRESSÃO NAS COMBINAÇÕES DE PREENCHIMENTOS .....	73
GRÁFICO 5 – MÉDIAS DOS COMPRIMENTOS DAS PEÇAS.....	76
GRÁFICO 6 – MÉDIAS DAS ESPESSURAS DAS PEÇAS .....	76
GRÁFICO 7 – MÉDIAS DAS ALTURAS DAS PEÇAS .....	77
GRÁFICO 8 – MÉDIAS DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS PEÇAS .....	77
GRÁFICO 9 – MÉDIAS DAS EXTREMIDADES ATÉ O ENTALHE DAS PEÇAS ....	77
GRÁFICO 10 – COMPARATIVO ENTRE MASSA REAL DAS PEÇAS <i>VERSUS</i> MASSA ESTIMADA PELO CURA.....	78
GRÁFICO 11 – RELAÇÃO MASSA <i>VERSUS</i> PORCENTAGEM REAL DE MASSA DAS PEÇAS.....	80
GRÁFICO 12 – RESULTADOS DOS TESTES DE IMPACTO (ENERGIAS DE IMPACTO).....	81
GRÁFICO 13 – DISPERSÃO DOS RESULTADOS DOS TESTES DE IMPACTO ..	81
GRÁFICO 14 – RESÍDUOS FATORIAL.....	84
GRÁFICO 15 – EFEITOS DE CADA FATOR SEPARADAMENTE.....	84
GRÁFICO 16 – INTERAÇÃO ENTRE FATORES .....	85
GRÁFICO 17 – RESÍDUOS FATORIAL.....	87
GRÁFICO 18 – EFEITOS DE CADA FATOR SEPARADAMENTE.....	87
GRÁFICO 19 – INTERAÇÃO ENTRE FATORES .....	89
GRÁFICO 20 – INTERAÇÃO ENTRE FATORES .....	90

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	- Acrilonitrila Butadieno Estireno ( <i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> )
EBM	- <i>Electron Beam Melting</i>
FDM	- <i>Fused Deposition Modeling</i>
FFF	- <i>Fused Filament Fabrication</i>
GIMa	- Grupo de Inteligência aplicado a Manufatura
LENS	- <i>Laser Engineered Net Shaping</i>
PLA	- Ácido polilático
SL	- <i>Stereolithography</i>
SLS	- <i>Selective Laser Sintering</i>
3DP	- <i>Three dimensional printing</i>
20E	- 20% de preenchimento externo (puro)
50E	- 50% de preenchimento externo (puro)
80E	- 80% de preenchimento externo (puro)
20E 0I	- 20% de preenchimento externo e 0% de preenchimento interno (oco)
50E 0I	- 50% de preenchimento externo e 0% de preenchimento externo (oco)
80E 0I	- 80% de preenchimento externo e 0% de preenchimento interno (oco)
20E 20I	- 20% de preenchimento externo e 20% de preenchimento interno
50E 50I	- 50% de preenchimento externo e 50% de preenchimento interno
80E 80I	- 80% de preenchimento externo e 80% de preenchimento interno
20E 80I	- 20% de preenchimento externo e 80% de preenchimento externo
20E 50I	- 20% de preenchimento externo e 50% de preenchimento interno
50E 20I	- 50% de preenchimento externo e 20% de preenchimento interno
50E 80I	- 50% de preenchimento externo e 80% de preenchimento interno
80E 20I	- 80% de preenchimento externo e 20% de preenchimento interno
80E 50I	- 80% de preenchimento externo e 50% de preenchimento interno

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	21
1.2	OBJETIVOS.....	22
1.2.1	Objetivo geral.....	22
1.2.2	Objetivos específicos.....	22
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>24</b>
2.1	MANUFATURA ADITIVA.....	24
2.2	PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA.....	25
2.3	FUNCIONAMENTO DA IMPRESSORA 3D - FFF .....	29
2.3.1	Variáveis do processo de fabricação por FFF.....	30
2.3.1.1	Adesão entre filamentos e estrutura das camadas.....	30
2.3.1.2	Orientação de impressão.....	33
2.3.1.3	Espessura da camada.....	35
2.3.1.4	Temperatura de impressão.....	36
2.3.1.5	Temperatura da mesa de impressão.....	37
2.3.1.6	Tipos de preenchimentos.....	38
2.3.1.7	Porcentagem de preenchimento.....	39
2.3.1.8	<i>Raster angle</i> ou ângulo de varredura.....	40
2.3.1.9	Velocidade de impressão.....	41
2.4	POLÍMEROS.....	41
2.4.1	Ácido Polilático – PLA.....	42
2.5	TESTE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO EM POLÍMEROS.....	44
2.5.1	Fraturas típicas observadas em ensaios de impacto.....	47
2.6	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	50
2.6.1	Estudos correlatos.....	50
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>56</b>
3.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	56
3.2	MÉTODO E DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO.....	58
3.3	ETAPAS DE FABRICAÇÃO.....	66
3.4	TESTE DE IMPACTO <i>CHARPY</i> E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	67
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>69</b>
4.1	IMPRESSÕES.....	69

4.2	DADOS DA IMPRESSÃO .....	71
4.2.1	Tempos de impressão.....	71
4.3	ANÁLISE DAS PEÇAS .....	74
4.3.1	Influência da orientação de impressão no entalhe das peças.....	74
4.3.2	Medidas externas das peças.....	75
4.3.3	Massas das peças .....	78
4.4	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO .....	80
4.4.1	Análises estatísticas.....	82
4.4.2	Ganhos em relação às combinações .....	91
4.4.3	Micrografias das regiões de fratura.....	92
4.5	SEQUÊNCIA DE EVENTOS DE FRATURA DAS PEÇAS.....	95
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>100</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	101
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>102</b>
	<b>ANEXO A.....</b>	<b>108</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Historicamente, a ideia de manufaturar produtos aditivamente não é nova. Segundo Volpato e Carvalho (2017), isso já era possível de se observar com as pirâmides do Egito, as quais foram feitas de blocos de material alocados uns sobre os outros até a formação da pirâmide completa. Pensar em fabricar aditivamente não necessariamente se limita a utilizar uma impressora 3D, embora esse seja o método mais rápido atualmente, mas sim em utilizar um método de produção que se baseie em adição de material.

Tempos depois, surge a primeira impressora 3D que utilizava a tecnologia de estereolitografia, essa fora criada por Chuck Hull no ano de 1984. Hoje, as impressoras 3D têm ganhado destaque no mercado manufatureiro devido a sua flexibilidade produtiva. Sua aplicação permeia diferentes áreas incluindo o setor automotivo, aeroespacial e biomédico (HUANG, 2015). Com isso, uma gama de experimentos vem sendo realizados nessas áreas a fim de que possam, cada vez mais fortes e com maior resistência ao impacto (MISHRA *et al.*, 2021) para os produtos.

Segundo Nishimura (2016), a tecnologia aditiva pode ser dividida em três tipos: líquidos, sólidos e em pó. As de categoria líquida utilizam majoritariamente resinas foto poliméricas que se enrijecem ao serem expostas a luz UV. As de categoria sólida utilizam como fonte principal de matéria-prima materiais em formato de filamentos, os quais são derretidos e extrusados. Por fim, as de categoria pó utilizam de algum aglutinante ou somente *laser* para a sinterização da matéria-prima em pó.

Atualmente, o termo Manufatura Aditiva tem sido empregado com frequência tanto na literatura quanto na linguagem falada. Entretanto, Gibson, Rosen e Stucker (2010) ressaltam que o termo se refere a um nome genérico, visto que seu processo consiste em adicionar camadas sobre camadas de material de entrada, até formar determinado objeto. Havendo isso, os autores apresentam outras nomenclaturas as quais também podem ser utilizadas para se referir à essa tecnologia, tais como: impressão 3D, modelagem 3D, *AutoFab* e prototipagem rápida (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2010; GEBHARDT, 2011; VOLPATO e CARVALHO, 2017).

A tecnologia que trabalha com filamentos, objeto de estudo desse trabalho, é a *Fused Filament Fabrication* (FFF), popularizada como *Fused Filament Modeling* (FDM). Embora o termo FDM seja amplamente utilizado, seu nome foi patenteado

pela empresa Stratasys (DIZON *et al.*, 2017). Dessa forma, a expressão mais recomendada para se referir à essa tecnologia sem alusões à uma organização é *Fused Filament Fabrication* (FFF).

Conforme apresentado por Al Khawaja *et al.* (2020, p. 2), “a densidade de preenchimento é a razão entre a massa do material e o volume dentro do objeto impresso.” Algumas pesquisas desenvolvidas exploram em especial as relações entre porcentagem de preenchimento, tipos de preenchimento e as propriedades mecânicas das peças; como os estudos publicados por Cabreira e Santana (2022); Tanveer, Haleem e Suhaib (2019); e Silva *et al.*, (2021).

Na literatura, observa-se que, em termos gerais, quanto menor for o preenchimento na peça, menor também tende ser a quantidade de energia absorvida, como apresentado por Habeeb, Abood e Mohan (2020), Tanveer, Haleem e Suhaib (2019), e Mishra (2021). Desta forma, a fim de ter um alto valor de energia absorvida em testes de impacto, recomenda-se utilizar uma alta porcentagem de preenchimento. Todavia, uma peça com mais preenchimento será, conseqüentemente, mais pesada e mais cara.

Pressupondo que a parte externa da peça é a região que sofre o primeiro e maior impacto em testes *Charpy*, pode-se conjecturar que ela possui grande influência na absorção de energia. Isso possibilita concentrar a deposição de material nas extremidades da peça e deixar o interior com uma porcentagem de preenchimento menor. Outrossim, também pode-se postular que o aumento da quantidade de energia absorvida está relacionado não somente com a quantidade de massa da peça, mas com a disposição das camadas internas.

Objetivando provar estas hipóteses como verdadeiras, este estudo propõe, por meio da adição de um recurso interno, redefinir o projeto no interior da peça, alterando o modelo básico de uso de um tipo só de estrutura, para uma combinação de preenchimentos.

Para tanto, uma investigação foi conduzida utilizando peças testadas em ensaios *Charpy* conforme a norma ASTM D6110-10. Após, os resultados foram analisados por meio de análise de variância (ANOVA). A utilização de uma análise estatística, segundo Marques e Marques (2009), é essencial em pesquisas experimentais para que o pesquisador possa fazer conclusões mais precisas acerca dos resultados obtidos. Por fim, para complementar a avaliação, as amostras também

foram submetidas a microscopia de varredura eletrônica (MEV) e os resultados interpretados.

Este trabalho utilizou do material PLA (ácido polilático) para a fabricação das peças. A escolha desse material decorreu por ele ser um dos mais utilizados em Manufatura Aditiva para a impressão, ter um bom custo-benefício, e ser amplamente utilizado para a fabricação de protótipos. Ademais, assim como observado por Murariu e Dubois (2016) nos estudos publicados Smith (2012; 2013), as últimas tendências mostram que a demanda por bioplásticos de longa duração nas indústrias, tais como eletrônica e automotiva, tem crescido.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

De acordo com Rodríguez-Panes, Claver e Camacho (2018); Lubombo e Huneault (2018), as características mecânicas de peças que são produzidas por meio de tecnologia aditiva são altamente dependentes dos processos de fabricação. Em concordância, Alves *et al.*, (2021) dizem que há um problema relacionado ao procedimento de fabricação na impressora 3D o qual está interligado com os diferentes parâmetros de impressão.

Com exceção do tempo de impressão e a quantidade de filamento usado, ainda há uma lacuna de registros na literatura sobre as particularidades mecânicas de uma peça feita por esse processo (BRISCHETTO, TORRE e FERRO, 2019). Nesse sentido, percebe-se um interesse crescente por parte da comunidade científica em estudar os efeitos consequentes da escolha dos parâmetros de impressão (LUBOMBO e HUNEULT 2018).

No levantamento bibliográfico feito nas principais bases de busca acadêmica (*Scopus, Science Direct, Scielo e Google Acadêmico*), não foram encontrados muitos estudos cujas peças utilizassem mais de um tipo de porcentagem de preenchimento. Sendo assim, esta pesquisa apresenta uma oportunidade promissora para explorar uma vertente ainda em desenvolvimento na área.

Perante a esse cenário, esta dissertação visa oferecer informações e soluções práticas que servirão para que futuros pesquisadores tenham a possibilidade de escolher entre os percentuais de preenchimento, e suas respectivas propriedades de absorção de energia que melhor se adequem a elaboração de seus produtos. Além

disso, este trabalho também tem como propósito teórico preencher a lacuna literária existente, bem como fomentar mais estudos científicos sobre o tema.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Como o objetivo geral, este estudo propôs: analisar a influência de diferentes porcentagens de preenchimento em peças fabricadas em PLA por tecnologia FFF na absorção de energia de impacto.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Em termos de objetivos específicos, a pesquisa visou:

- i. Fabricar corpos de prova para ensaio de impacto *Charpy* sem a necessidade de usar recursos de usinagem para fazer o entalhe;
- ii. Analisar a influência da orientação de impressão na fabricação dos corpos de prova;
- iii. Propor uma sequência de eventos de início, propagação e rompimento de peças feitas por FFF que considerem o recurso interno. Além disso, descrever o comportamento das paredes do recurso interno;
- iv. Relacionar a quantidade de energia absorvida com a massa e as combinações de preenchimento utilizadas.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No corrente Capítulo, é apresentada a problematização da pesquisa, incluindo a influência dos parâmetros de impressão na caracterização mecânica de peças feitas tridimensionalmente, em especial com relação a porcentagem de preenchimento e sua importância para o desenvolvimento de peças mais resistentes. Também, são apresentadas as hipóteses que moveram este estudo, bem como os objetivos propostos.

No segundo Capítulo, referencial teórico, descreve-se os principais tópicos que fundamentam a pesquisa na literatura. Dentre eles, os principais processos de

manufatura aditiva, alguns parâmetros de impressão, testes de impacto em polímeros, entre outros. Além de uma revisão de alguns estudos correlacionados ao tema da dissertação.

No terceiro Capítulo, material e métodos, apresenta-se, de forma detalhada, o procedimento experimental da pesquisa, incluindo a caracterização dos equipamentos e materiais, juntamente com o desenvolvimento das peças, parâmetros de impressão utilizados, entre outros.

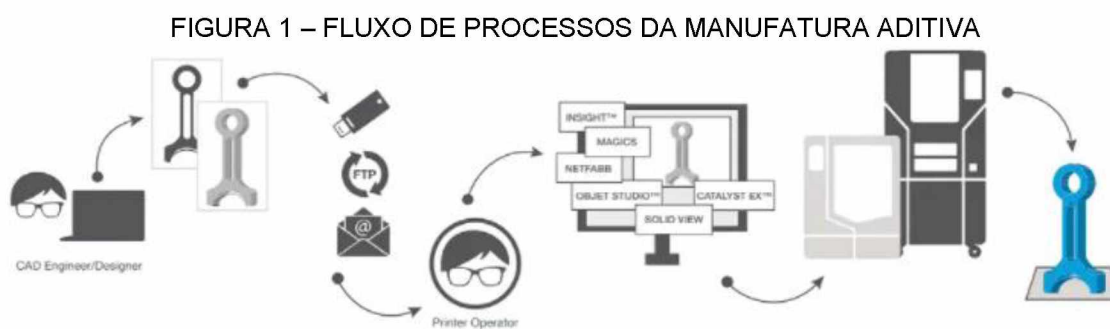
No quarto Capítulo, têm-se os resultados obtidos por meio dos métodos apresentados, junto com a análise e discussão deles. Por fim, no quinto e último Capítulo, são apresentadas as conclusões gerais da pesquisa, seguido das sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste Capítulo, abordam-se os principais conceitos teóricos que embasam o estudo na literatura.

### 2.1 MANUFATURA ADITIVA

Também conhecida como impressão 3D, a Manufatura aditiva vem fazendo sucesso devido a sua flexibilidade produtiva. Diferente da manufatura subtrativa, em que para a fabricação de um objeto são retiradas camadas de material até chegar na forma desejada, no processo aditivo é feito o oposto (SCHWAB, 2016). Camadas de materiais são depositadas uma sobre as outras até atingir o formato esperado, baseados em um projeto 3D (SCHWAB, 2016). Para que isso seja possível, há um *modus operandi* a ser seguido, obedecendo um fluxo de processos apresentado pela FIGURA 1.



FONTE: LWT sistemas (2021).

O primeiro passo requerido é ter um projeto feito em um software 3D CAD, o qual será responsável por nortear todo o processo de impressão. Na sequência, esse projeto é convertido para o formato STL (*Standard Triangle Language*). Após convertido, o projeto é submetido a um *slicer* cuja função é literalmente fatiar projeto 3D em camadas para que seja possível realizar a impressão. O projeto é então transferido para a impressora, a qual dará início aos ciclos de produção utilizando as informações abarcadas no projeto norteador. Por fim, o objeto é encaminhado para a fase de tratamento, onde nela são removidas as rebarbas da peça a fim de trazer uma estética mais agradável ao produto, só então tem-se o objeto pronto para o uso.

Atualmente, diversas áreas estão estudando mais assiduamente as diferentes formas de aplicação da manufatura aditiva. É possível observar essa tecnologia sendo amplamente pesquisada na área da saúde. Estudos mostram que pesquisadores estão conduzindo pesquisas relacionados a impressão de órgãos e implantes. Haleem, Javaid e Saxena (2018) apresentam um estudo de revisão sobre a impressão de um coração humano. Uma das vantagens apresentadas é, como o órgão pode ser impresso com dados vindos do próprio paciente, as informações de impressão são mais acuradas. Com isso, há a possibilidade dos médicos cirurgiões e alunos estudarem com mais precisão o problema de cada paciente antes da cirurgia ocorrer (ANWAR *et al.*, 2018), reduzindo, conseqüentemente, possíveis erros médicos.

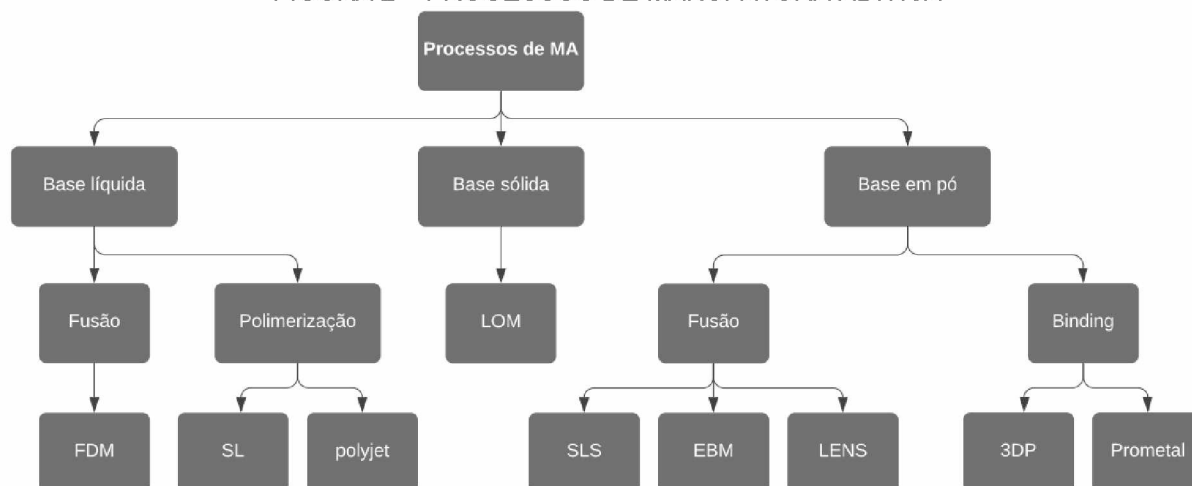
Com isso, a manufatura aditiva vem apresentando novas possibilidades de criação, impulsionando novas formas de fabricação no mercado manufatureiro atual (CREMONA, RIVARINI e BUONANNO, 2017), principalmente no que diz respeito a personalização. Por ter seu eixo de trabalho mais livre, a impressora 3D permite a criação de estruturas mais complexas e oferece mais liberdade para os projetistas realizarem seus trabalhos (ZAPAROLLI, 2019). Além disso, a manufatura aditiva tem impactos positivos, como o desenvolvimento rápido de produtos, o aumento da demanda por *designers* de produtos e a redução da curva de aprendizagem (SCHWAB, 2016).

Embora essa tecnologia esteja se destacando no mercado, ela não fará com que os demais métodos de fabricação tradicionais sejam descontinuados. Segundo estudo conduzido por pesquisadores, o que mudarão serão somente as produções mais singularizadas (JIANG, KLEER e PILLER, 2017) e principalmente as produções que envolvam um conceito mais ecológico. Jiang, Kleer e Piller (2017) ainda reforçam que a manufatura aditiva continuará crescendo devido a necessidade de uma produção mais personalizada.

## 2.2 PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA

Embora a impressão de tipo FFF seja a mais comum dentre todas as tecnologias de Manufatura Aditiva (CUAN-URQUIZO, 2019), outras tecnologias de impressão 3D também são utilizadas. A FIGURA 2 apresenta os processos de Manufatura Aditiva com esses tipos de impressão.

FIGURA 2 – PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA



FONTE: Adaptado de Wong e Hernandez (2012).

A seguir encontram-se cada um dos tipos de impressão 3D brevemente explicados.

**FDM – Fused Deposition Modeling:** *Fused Filament Fabrication (FFF)*, também conhecido como *Fused Deposition Modeling (FDM)* é o nome dado a tecnologia que algumas impressoras 3D utilizam para fazer a impressão das peças. Ela consiste em utilizar um filamento, o qual, na maioria das vezes, é um polímero ou um composto polimérico. Este filamento é aquecido por um bico extrusor até o ponto em que seja possível fazer a deposição do material para começar a construção das camadas (RAJPUROHIT e DAVE, 2018). Os materiais mais utilizados pela tecnologia FFF são termoplásticos como ABS, PLA e Nylon (WANG *et al.*, 2017).

**SL – Stereolithography:** foi a primeira tecnologia aditiva desenvolvida para uso em prototipagem rápida (WONG e HERNANDEZ, 2012). De acordo com Coelho; Araújo e Thiré (2018), a produção por estereolitografia funciona da seguinte forma: utiliza-se radiação ultravioleta projetada sobre toda a parte da camada 2D. Utiliza-se, também, um emissor de radiação UV - uma lente que serve para convergir a radiação e atingir o DMD (Dispositivo Microespelhado Digital). Sua função é elaborar a imagem que será feita em cada camada de produção. A imagem já elaborada é transmitida pela lente a qual faz projeção e atinge um espelho alocado em 45° entre o projetor e o reservatório. A resina fotopolimérica, material utilizado para esse processo, encontrada no reservatório, em contato com a radiação se fotopolimeriza -enrijece- formando uma camada de material rígido, dando origem ao produto.

**PP – Polyjet printing:** de acordo com Singh (2011), neste processo de fabricação, um cabeçote de jato se movimenta para frente e para trás no eixo X, similar a uma impressora convencional. Ao fazer esses movimentos, ela vai depositando uma camada muito fina de fotopolímero - resina. Após a aplicação das camadas, é acionado luzes ultravioletas a fim de que realize a cura do material depositado e ele se solidifique. Em seguida, a badeja de injeção interna movimenta-se precisamente um pouco para baixo, na sequência a injetora aplica mais material e o processo é repetido até que o objeto esteja concluído.

**LOM - Laminated Object Manufacturing:** esta técnica utiliza folhas de matéria-prima revestidas com um material adesivo, os quais são sobrepostos formando as camadas da peça. Como as folhas são revestidas com adesivo termo ativo, a laminação é feita com a compressão de um rolo de metal aquecido. Após, é feito o corte dos excessos por meio de um laser e repetido o processo até a finalização do objeto (PARK, TARI e HAHN, 2000). Como materiais frequentemente utilizados ressalta-se o papel e o plástico, já os materiais metálicos, são usados com menos frequência (PALERMO, 2013).

**SLS – Selective Laser Sintering:** também conhecido como *solid freeform fabrication*, esse tipo de processo aditivo utiliza a matéria-prima em forma de pó. Feixes de laser são utilizados como fonte principal de calor para aglutinar as partículas de material a fim de formar as camadas de acordo com o projeto elaborado. Assim que a primeira camada é sinterizada, uma segunda camada de pó é colocada e o mesmo processo é feito de baixo para cima até a finalização da peça (KUMAR, 2003). Os materiais usualmente utilizados nesse processo são PCL, poliamida em pó (WANG *et al.*, 2017), além de metais e cerâmicos (WONG e HERNANDEZ, 2012).

**EBM – Electron Beam Melting:** este é um processo muito similar ao SLS - *Selective Laser Sintering* (WONG e HERNANDEZ, 2012; ZÄH e LUTZMANN, 2010). Neste, um laser focado ou feixe de elétrons é aplicado para que haja a solidificação do pó de matéria-prima aplicado. As diferenças entre EBM e SLS podem ser contempladas nos materiais que são utilizados, e dentro do próprio processo e procedimentos de digitalização (ZÄH e LUTZMANN, 2010), por exemplo a utilização de uma câmara de vácuo para evitar a oxidação quando impressas peças de metal. Os materiais utilizados podem variar em uma série de metais (WONG e HERNANDEZ, 2012).

**LENS - Laser Engineered Net Shaping:** neste processo, matéria-prima em pó é adicionada à máquina para ser utilizada na fabricação. O material é moldado por meio de um laser de alta potência e depositado no lugar determinado pelo projeto, formando a geometria desejada (WONG e HERNANDEZ, 2012; PALČIČ *et al.*, 2009). Neste processo, várias camadas são sobrepostas aditivamente até formar a peça projetada (PALČIČ *et al.*, 2009). Como vantagem, essa tecnologia permite o uso de diversos tipos de matéria prima, desde que sejam em pó, tais como: aço inoxidável, ligas à base de níquel, titânio-6 alumínio-4 vanádio, alumina, ligas de cobre (WONG e HERNANDEZ, 2012).

**3DP - Three dimensional printing:** de acordo com Lu e Reynolds (2008) a técnica impressão 3DP é utilizada para a fabricação de peças que possuem estruturas complexas. Utilizando um rolo de rotação contrária, o pó (forma do material usado) é espalhado dentro da câmara de impressão. Após, um cabeçote contendo fluido aglutinante se move em direção ao local onde se contra o material e deposita gotículas de fluido, seguindo o projeto previamente definido. Logo após, a plataforma onde se encontra o material é movida para baixo a uma distância equivalente à de uma camada. Então, é depositado mais material e repetido o processo formando as demais camadas até a finalização do objeto (LU e REYNOLDS, 2008). Quaisquer materiais podem ser usados desde que sejam em pó. Aglutinante é sempre necessário (WANG *et al.*, 2017).

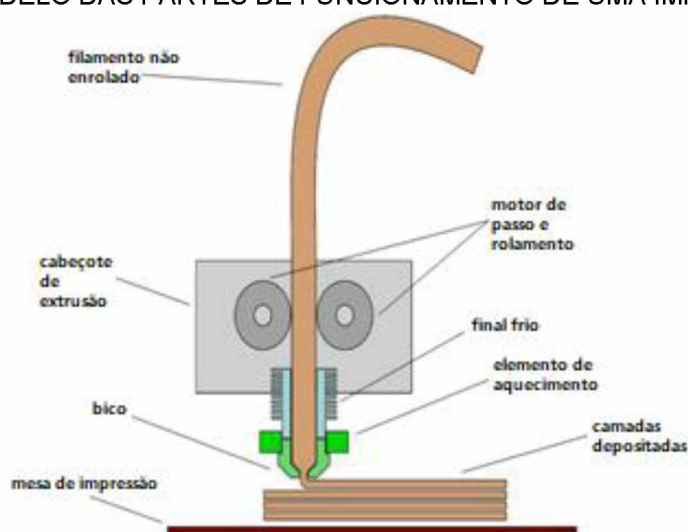
**Prometal:** segundo Agarwal *et al.*, (2002), esta técnica possui o mesmo princípio que todas as outras tecnologias aditivas. Necessita-se de antemão um projeto 3D convertido para o formato STL. A produção se inicia com uma fina camada de pós aplicada sobre a superfície. Após, com um método similar a impressão de jato de tinta, é aplicado um fluido aglutinante, com isso o material começa a se juntar formando a primeira camada do objeto. O pistão, responsável por suportar a mesa em o pó está, move-se vagarosamente para baixo a fim de que a próxima camada de material seja depositada. Assim o processo se repete a última camada ser finalizada. Por fim, o objeto passa para o tratamento final no qual o pó solto é removido e a peça é sinterizada com bronze visando garantir mais força a ela e preencher os poros vazios. Só então a peça está pronta para o uso (AGARWAL *et al.*, 2002). Aço inoxidável é o material usado com essa tecnologia (WONG e HERNANDEZ).

## 2.3 FUNCIONAMENTO DA IMPRESSORA 3D - FFF

A FIGURA 3 apresenta o funcionamento junto com os componentes que a compõe, sendo: filamento; cabeçote de extrusão; bico; mesa de impressão; motor de passo e rolamento; elemento de aquecimento (CABREIRA e SANTANA, 2020).

1. Filamento: é o material que é utilizado nas impressões. Ele geralmente vem enrolado em um carretel e é alocado, na maioria das vezes, na parte de trás da impressora.
2. Cabeçote de extrusão: é onde fica localizado o motor de passo e rolamento.
3. Bico: parte a qual tem formato afunilado e é responsável pela extrusão do material na espessura final.
4. Mesa de impressão: local onde o bico extrusor deposita as camadas de material.
5. Motor de passo e rolamento: servem para a locomoção e o empuxo do filamento para a impressão.
6. Elemento de aquecimento: responsável por esquentar o material e deixá-lo na temperatura ideal para a deposição.

FIGURA 3 – MODELO DAS PARTES DE FUNCIONAMENTO DE UMA IMPRESSORA FFF



FONTE: Adaptado de Cabreira e Santana (2020).

Para a impressão, o filamento é conectado à impressora por meio do cabeçote de extrusão. Neste cabeçote contém o motor elétrico e o rolamento, responsável por

fazer a movimentação e o empuxo do filamento para o canal de aquecimento, onde ele é derretido e empurrado para o bico. O Bico então faz a deposição desse filamento já derretido na mesa de impressão. Ao fazer a extrusão do filamento e sua deposição, o cabeçote move-se pelos eixos X e Y de acordo com as coordenadas fornecidas pelo projeto norteador para dar continuidade na impressão. A cada camada de material depositada, dependendo da impressora, o cabeçote move-se superiormente, ou a mesa de impressão move-se inferiormente no eixo Z. Dessa forma, esse processo se repetirá até a finalização da impressão, quando o objeto final estiver pronto.

### 2.3.1 Variáveis do processo de fabricação por FFF

Nesse tópico serão apresentadas as variáveis que envolvem a fabricação utilizando a tecnologia FFF: adesão entre filamentos e estrutura das camadas, orientação de impressão, espessura da camada, temperatura de impressão, temperatura da mesa de impressão, tipos de preenchimentos, porcentagem de preenchimento, *raster angle* ou ângulo de varredura e velocidade de impressão.

#### 2.3.1.1 Adesão entre filamentos e estrutura das camadas

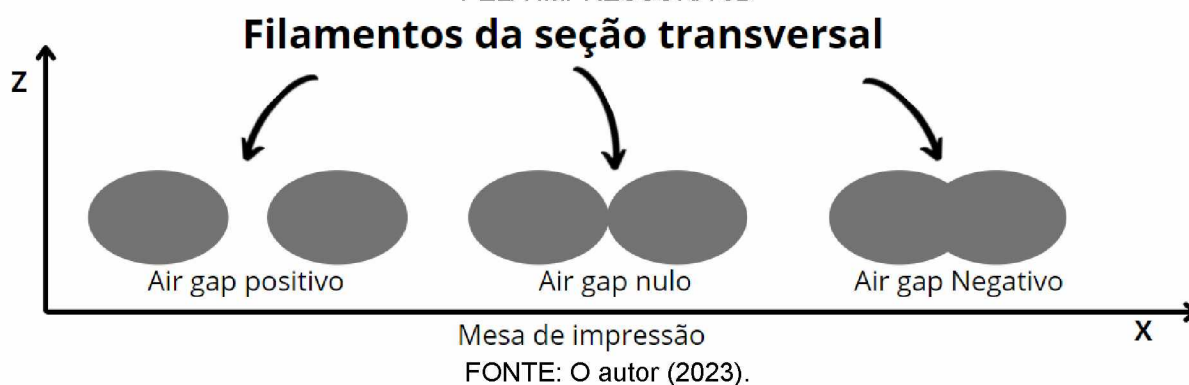
Em sistemas baseados em calor, como no caso do FFF, para que haja adesão entre os filamentos ao fazer a deposição do material na mesa de impressão, é necessário que tenha energia térmica residual suficiente no filamento depositado a fim ativar as superfícies em sua volta, ocasionando a ligação (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2010). Caso o filamento que está sendo depositado não tenha energia térmica residual suficiente, ele poderá até se aderir, mas haverá uma ligação distinta entre o novo e o antigo. Devido a isso, ocasiona-se um ponto de fraqueza na peça pois os filamentos podem ser facilmente separados. Em contraste, já se houver muita energia, os filamentos estarão em um estado mais líquido do que o necessário, acarretando uma possível peça com defeitos (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2010).

Conforme Santana *et al.* (2018) abordam, peças feitas por meio de impressão 3D que utilizam extrusão possuem uma estrutura constituída por uma quantidade de áreas vazias (densidades de vazios), também conhecidas como *air gaps*, e por ligações entre filamentos. A densidade de vazios e a força de ligação são dependentes da junção entre os filamentos adjacentes, os quais, de certa forma, estão relacionados

aos parâmetros de impressão e processo (GARZON-HERNANDEZ *et al.*, 2020). O *air gap* é diretamente relacionado a densidade. Quanto menor a quantidade de material, maior a quantidade de espaço vazio entre as camadas (MARTINS, 2017).

Tendo isso, pode-se dizer que há 3 tipos de *air gaps* na estrutura feita pela impressora 3D, sendo eles: *air gap* positivo; *air gap* nulo, e *air gap* negativo (FIGURA 4).

FIGURA 4 – AIR GAP NEGATIVO, AIR GAP NULO E AIR GAP POSITIVO NA ESTRUTURA FEITA PELA IMPRESSORA 3D

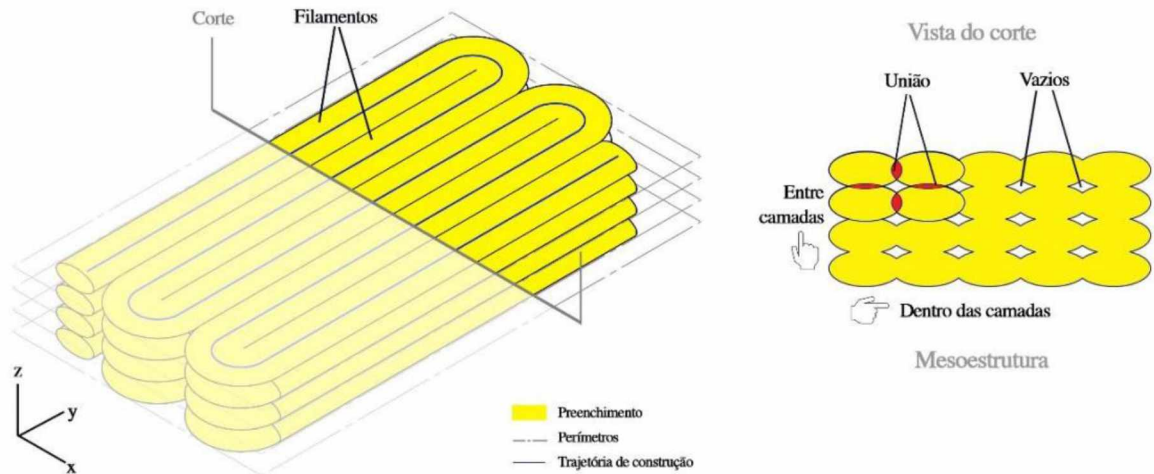


No primeiro tipo de *air gap*, a estrutura dos filamentos não está em contato direto com o outro adjacente bem como não se adentra a ele (positivo) – não há sinterização. Sinterização é um fenômeno cujo qual envolve a coalescência, isto é, a junção entre as partículas do filamento. É relacionada por duas características dependentes da temperatura, a tensão superficial e a viscosidade (GARZON-HERNANDEZ *et al.*, 2020). Além disso, ele geralmente ocorre em temperaturas acima da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) – materiais acima dessa temperatura encontram-se em um estado viscoso e borrachoso (GARZON-HERNANDEZ *et al.*, 2020).

No segundo tipo, os filamentos são aderidos de forma a se conectarem, mas não adentram uns aos outros (nulo) – não há sinterização. Enquanto no último tipo de *air gap*, os filamentos ficam bem próximos e se unem uns aos outros (negativo) – há sinterização. Muitos estudos recomendam a utilização do *air gap* negativo por melhorar a difusão térmica entre os filamentos, fornecendo uma ligação mais forte, e fazendo com que a peça fique mais densa, pois utiliza mais material no preenchimento. Entretanto, há a possibilidade ocasionar prejuízos estéticos e estruturais, pois a sobreposição dos filamentos não é exata (MARTINS, 2017).

Devido a forma cilíndrica do filamento, mesmo peças que possuam *air gap* negativo entre os filamentos, ainda terão espaços vazios dentro das camadas de filamentos, como exemplificado pela FIGURA 5.

FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DE ESPAÇOS VAZIOS DENTRO DAS CAMADAS MESMO COM FILAMENTOS COM AIR GAP NEGATIVO



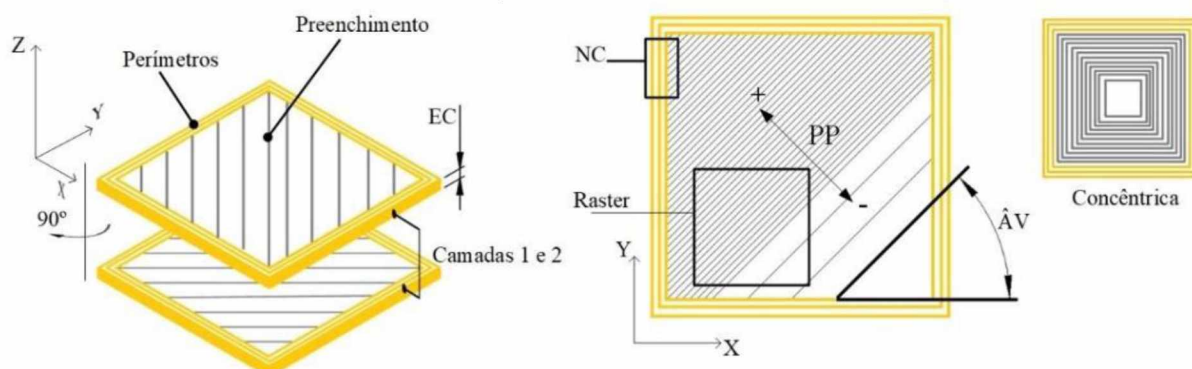
FONTE: Santana *et al.* (2018).

Segundo Santana *et al.*, (2018), as estruturas das camadas das peças feitas por tecnologia aditiva FFF se dividem basicamente entre:

1. Espessura da camada: distância entre o bico extrusor com e a mesa de impressão no eixo z.
2. *Raster angle* ou ângulo de varredura: é o ângulo que é depositado as camadas de material.
3. Orientação de impressão: é a orientação da peça na mesa de impressão nos eixos X, Y e Z.
4. Estratégia de preenchimento: forma como é feito a impressão de cada parte que constitui as camadas.
5. Densidade de preenchimento: quantidade de material utilizada como preenchimento.
6. Número de contornos: quantidade de paredes que a peça possui.

A FIGURA 6 exemplifica, de forma visual, essas partes.

FIGURA 6 – ESTRUTURA DAS CAMADAS, ESPESSURA DA CAMADA, *RASTER ANGLE* OU ÂNGULO DE VARREDURA, ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO E ESTRATÉGIA DE PREENCHIMENTO DAS PEÇAS FEITAS POR TECNOLOGIA ADITIVA FFF



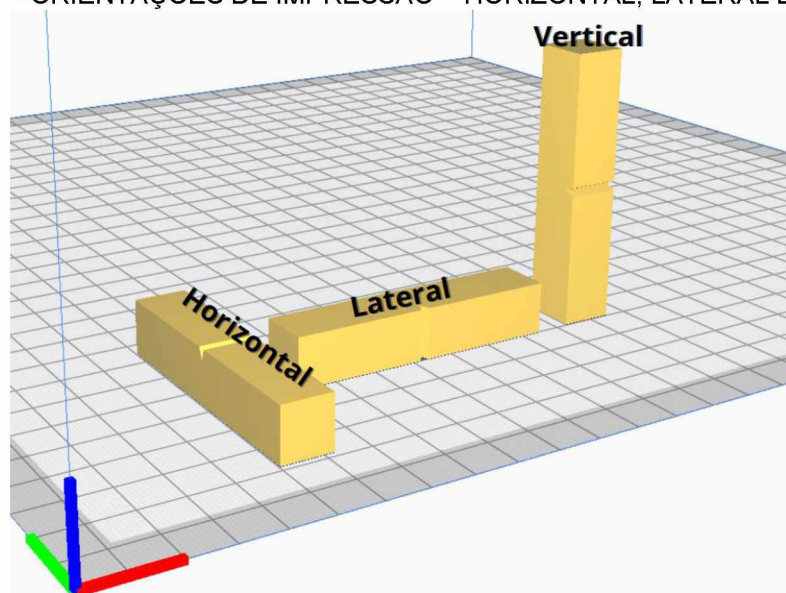
FONTE: Santana *et al.* (2018).

em que EC representa a espessura da camada; NC o número de contornos; PP percentual de preenchimento;  $\hat{A}V$  ângulo de varredura ou *raster angle*.

### 2.3.1.2 Orientação de impressão

Esse parâmetro de impressão defini a posição (ângulo) em que a peça será impressa na mesa de impressão. Ele é orientado nos eixos X, Y e Z e é aplicado dentro do *Slicer*, junto com a definição dos demais parâmetros de impressão. A FIGURA 7 demonstra os tipos mais comuns de orientações de impressão dentro do *software* CURA.

FIGURA 7 – ORIENTAÇÕES DE IMPRESSÃO – HORIZONTAL, LATERAL E VERTICAL

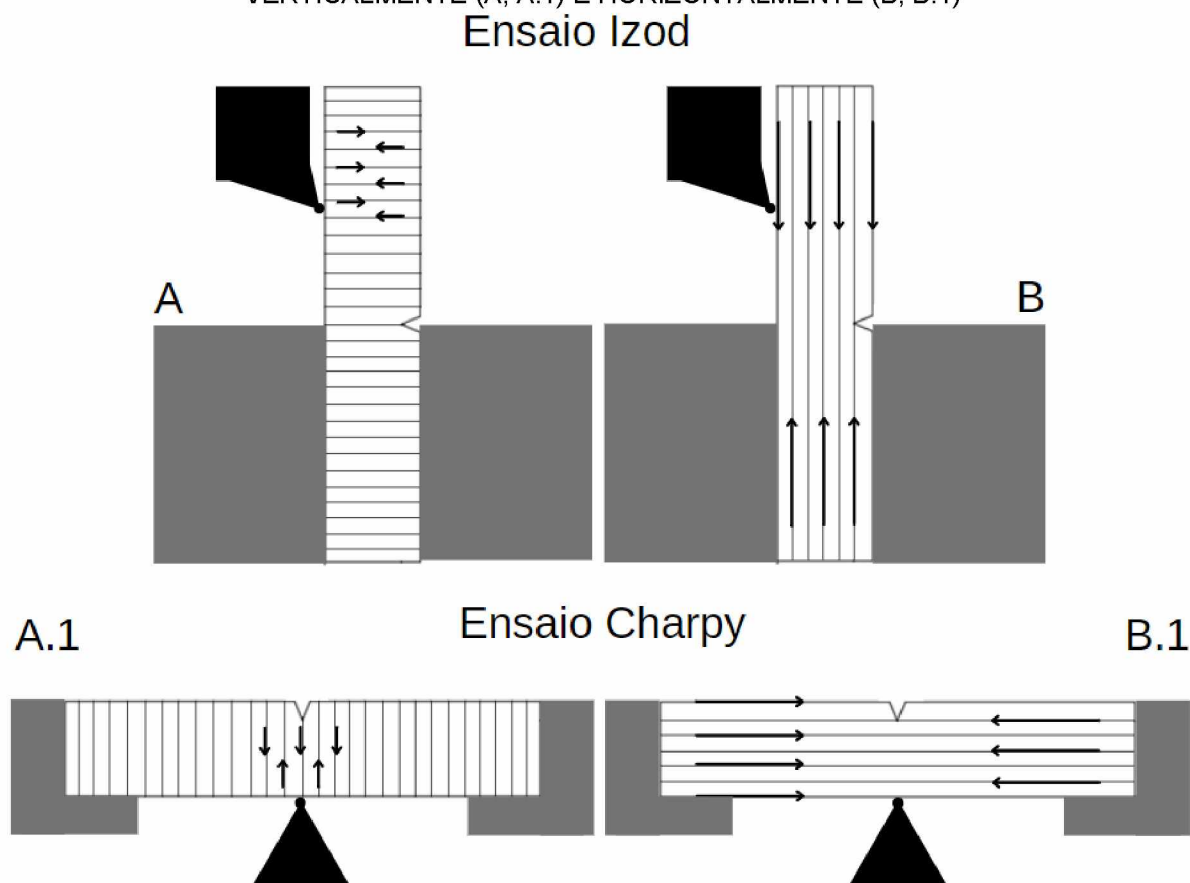


FONTE: O autor (2023).

De acordo com Zhou *et al.*, (2019), devido às diversas orientações de impressão em FFF, ao submeter as peças a testes mecânicos, eles não conseguem descrever com precisão o efeito da ligação das camadas. Entretanto, se a impressão da peça for feita perpendicularmente à direção do teste de tração, por exemplo, será possível observar pelos valores obtidos a influência da orientação nas ligações entre as camadas (ZHOU *et al.*, 2019).

O mesmo se aplica para a realização de um teste de impacto *Charpy* ou *IZOD*, onde a peça será colocada verticalmente ou horizontalmente na máquina. Se ela for impressa no mesmo sentido em que o teste é feito, a peça contará majoritariamente com a resistência das camadas de materiais. Por outro lado, se ela for impressa no sentido oposto em que será feito o teste, além da resistência entre as ligações das camadas, a peça também contará com a resistência da cadeia polimérica. A FIGURA 8 apresenta essa situação.

FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO DE TESTE *IZOD* E *CHARPY* FEITOS EM PEÇAS IMPRESSAS VERTICALMENTE (A; A.1) E HORIZONTALMENTE (B; B.1)



FONTE: O autor (2023).

### 2.3.1.3 Espessura da camada

A espessura da camada de preenchimento de peças feitas por tecnologia aditiva tem influência direta não somente na mecânica da peça, mas também em seu tempo de fabricação e na precisão de detalhes quando usadas camadas mais finas (RODRÍGUEZ-PANES, CLAVER e CAMACHO, 2018). Ao utilizar camadas menos espessas, mais esteticamente agradável será o resultado final. Entretanto, também demandará mais tempo para sua fabricação. Já ao utilizar camadas mais espessas, menor será o tempo de impressão, porém a estética final será afetada. Essa diferença é representada pela FIGURA 9.

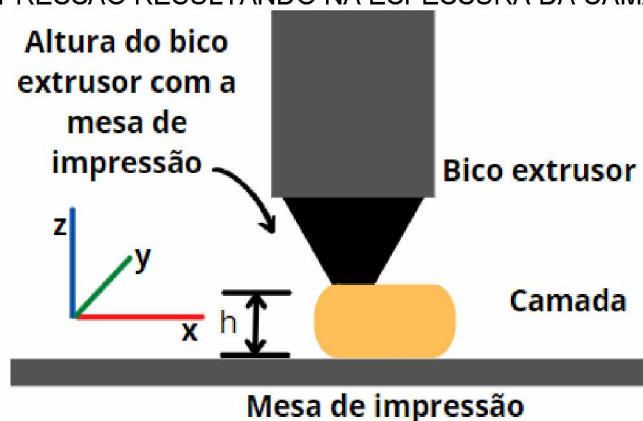
FIGURA 9 – DIFERENÇA DE ACABAMENTO ENTRE PEÇAS, UMA UTILIZANDO CAMADAS MAIS FINAS E OUTRA CAMADAS MAIS ESPEÇAS



FONTE: Adaptado de 3DLab (2020).

A espessura da cama de filamento se dá pela pelo aumento da distância entre o bico extrusor com e a mesa de impressão no eixo Z (FIGURA 10). Dependendo do modelo da impressora, algumas fazem essa distância ou elevando a altura do bico extrusor ou diminuindo a altura da mesa de impressão.

FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE O BICO EXTRUSOR E A MESA DE IMPRESSÃO RESULTANDO NA ESPESSURA DA CAMADA



FONTE: O autor (2023).

Conforme apresentado por Santana *et al.*, (2018), o diâmetro do bico de extrusão influencia o valor da espessura da camada. Na maioria das vezes, regula-se a espessura com um percentual inferior a 80% do diâmetro do bico (SANTANA *et al.*, 2018). Isso porque, se a altura da camada for maior que o diâmetro do filamento, a deposição da próxima camada pode ser afetada, culminando possíveis defeitos na peça.

#### 2.3.1.4 Temperatura de impressão

É a temperatura em que o filamento é aquecido para o processo de FFF. Ela depende de diversos fatores, como o tipo de material utilizado ou a velocidade de impressão (DEY e YODO, 2019). Cada tipo de material possui uma determinada faixa que temperatura ideal para a extrusão, geralmente essas temperaturas são fornecidas pelo fornecedor do filamento.

Trabalhar com uma temperatura fora da faixa ideal – ou muito alta ou muito baixa – para cada material pode não somente afetar sua viscosidade, tornando difícil sua extrusão, como também as características da peça fabricada (SOLOMON, SEVEL e GUNASEKARAN, 2021; ZHARYLKASSYN, PERVEEN e TALAMONA, 2021). Em outras palavras, aumentar ou diminuir em excesso a temperatura de deposição implica diretamente nas condições físicas do material e, conseqüentemente, na performance de fabricação, tanto estrutural quanto estética.

Em resumo, a temperatura de extrusão, se devidamente ajustada, pode proporcionar características positivas nas propriedades mecânicas de uma peça

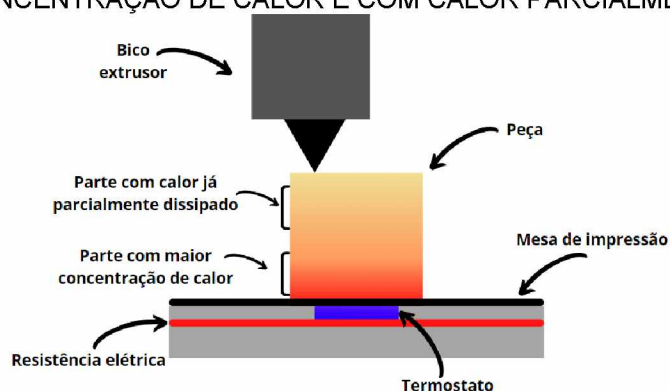
manufaturada aditivamente (SYRLYBAYEV *et al.*, 2021). Ademais, o ajuste desse parâmetro deve ser feito imprescindivelmente levando em consideração todos os pontos aqui mencionados, aumentando as chances de se produzir uma peça livre de defeitos.

### 2.3.1.5 Temperatura da mesa de impressão

A temperatura da mesa de impressão tem a função de manter a plataforma aquecida bem como proporcionar adesão das peças na hora da impressão. Ao esfriar rapidamente, os filamentos tendem a se contrair e deformar (*warping*). Com a mesa de impressão aquecida, ela fornecerá um gradiente de temperatura para o filamento recém depositado, desse modo, a troca de calor com o ambiente se dará de forma mais gradual, reduzindo as chances de deformidades e descolamento das peças.

Visto que as primeiras camadas de material são depositadas em contato com a mesa de impressão (casca), peças mais altas tendem a serem mais quentes na parte inferior e mais frias na parte superior (MESSIMER *et al.*, 2019). Isso porque a área de contato inferior da peça com a mesa de impressão permanecerá mais aquecida do que as áreas de menor contato localizadas na parte superior, próximas ao bico de extrusão. (MESSIMER *et al.*, 2019). Como consequência desse calor diferencial, tem-se a indução de possíveis tensões residuais as quais podem gerar rachaduras e empenamento da casca – área com maior contato na plataforma (MESSIMER *et al.*, 2019). Vide a exemplificação na FIGURA 11.

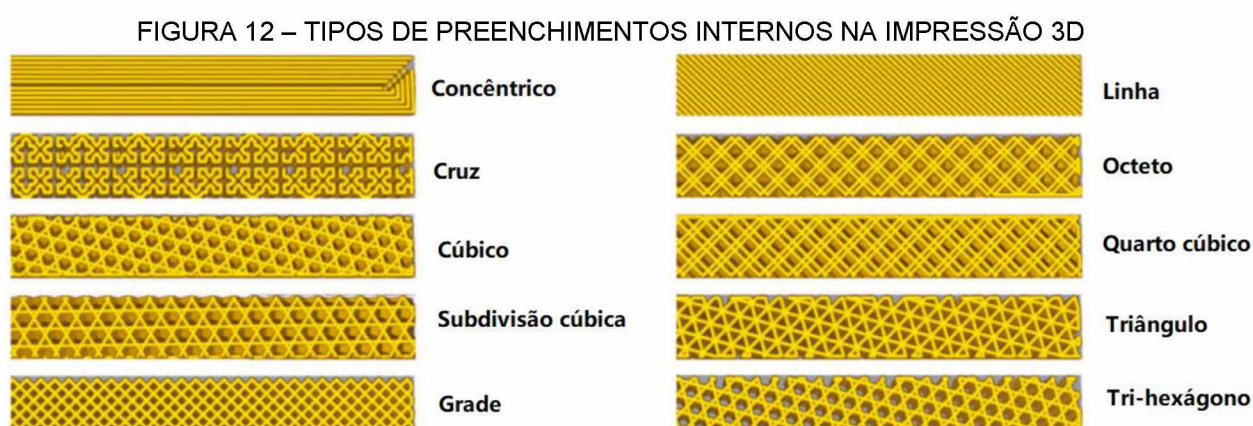
FIGURA 11 – MESA DE IMPRESSÃO COM PEÇA E SUAS DIFERENÇAS DE TEMPERATURAS: COM MAIOR CONCENTRAÇÃO DE CALOR E COM CALOR PARCIALMENTE DISSIPADO



FONTE: O autor (2023).

### 2.3.1.6 Tipos de preenchimentos

Esse parâmetro possui influência nas propriedades mecânicas da peça, e está relacionado com a movimentação feita pelo cabeçote de impressão para depositar as camadas de material. Atualmente, existem diversos tipos de preenchimentos, cada qual com suas respectivas características. A FIGURA 12 apresenta alguns dos tipos de preenchimentos existentes.



FONTE: Adaptado de Nam e Pei *et al.* (2020).

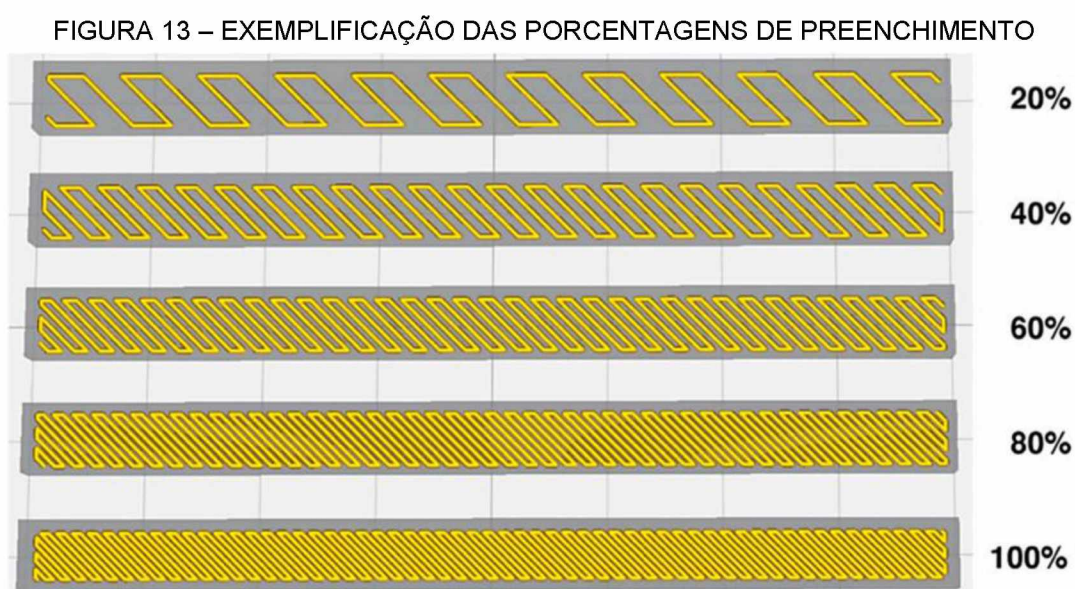
O padrão de preenchimento, além de ser importante na parte mecânica da peça, também fornece a impressão 3D um suporte interno que possibilita a impressora construir as camadas (SRINIVASAN *et al.*, 2020). Sem esse suporte, as paredes das peças muito provavelmente cairiam, dificultando a impressão. Dois dos preenchimentos mais usados são os do tipo grade e linha, sendo descritos a seguir:

1. **Grade:** é um dos mais simples tipos de preenchimentos. É basicamente formada por linhas cruzadas que percorrem e preenchem todo o interior da peça. Uma boa vantagem desse tipo é sua rápida impressão devido ao seu formato sem tanta complexidade. Em contrapartida, sua desvantagem é a fragilidade.
2. **Linha:** geralmente é impresso em ângulos de  $-45^{\circ}/45^{\circ}$  formando camadas de linhas diagonais. Suas camadas, com exceção dos encontros diagonais dos filamentos, não se encontram. Assim como o de grade, sua vantagem é possuir baixo tempo de impressão. De acordo com Porsani, Silva e Hellmeister (2017), ele não é recomendado para peças que sofrerão forças mecânicas, devido ao fato de seu tipo de malha não ser uniforme.

Entretanto, mesmo não sendo recomendado para esse tipo de função, ele é amplamente recorrente em muitas pesquisas.

### 2.3.1.7 Porcentagem de preenchimento

Diz respeito à quantidade de material utilizada para preencher uma peça. Esse parâmetro influencia diretamente na resistência e na massa final da peça (DEY e YODO, 2019), bem como no tempo e no custo de produção. Uma porcentagem de preenchimento alta resulta em uma peça mais rígida, mas também mais demorada e cara de ser produzida. Já uma porcentagem de preenchimento baixa pode resultar em uma peça mais leve, mas menos resistente. A FIGURA 13 mostra algumas das porcentagens de preenchimentos.



FONTE: Adaptado de Nam e Pei *et al.* (2020).

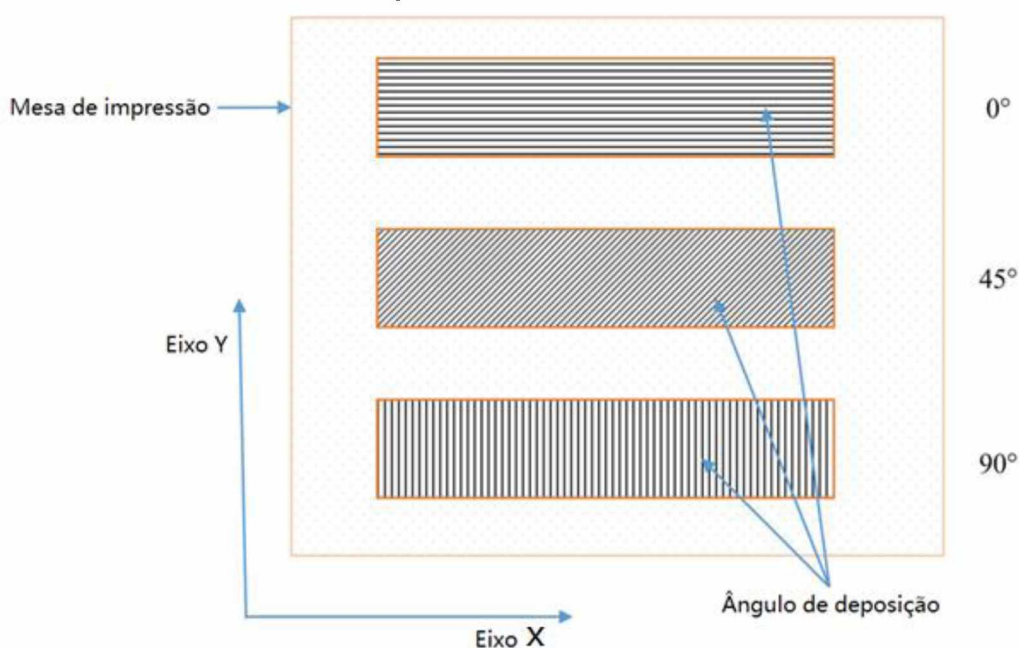
Uma peça com 0% de preenchimento será totalmente oca. Já uma com 50% de preenchimento terá metade de seu volume total preenchido. E uma com 100% de preenchimento será totalmente preenchida. Esse parâmetro é escolhido dentro do próprio fatiador.

Por exemplo, para objetos que não sofrerão grandes tensões, não há a necessidade de um volume de preenchimento alto. Em contrapartida, uma peça que sofrerá mais tensões tende a necessitar de mais preenchimento para resistir. Considerar esses fatores na hora de imprimir determinado objeto poupa não somente tempo, mas também matéria-prima.

### 2.3.1.8 *Raster angle* ou ângulo de varredura

Refere-se a direção do ângulo de deposição relativo ao eixo X da mesa de impressão (SOOD, OHDAR e MAHAPATRA, 2009), ou seja, é o ângulo responsável pela direção a ser percorrida pelo bico extrusor em relação a plataforma de impressão. A FIGURA 14 apresenta um exemplo com 3 angulações diferentes e mais usuais. Salienta-se que não são as únicas.

FIGURA 14 – VARIAÇÕES DE *RASTER ANGLE*: 0°, 45° E 90°



FONTE: Adaptado de Rajpurohit e Dave (2020).

Quando a angulação é de 0 graus, as linhas são depositadas seguindo o eixo X. Com uma angulação de 45 graus positivos, as linhas são depositadas de forma inclinada. Quando a impressora for imprimir a segunda camada de material, ela, na maioria das vezes, fará a outra camada em sentido contrário (-45°). Esse padrão se repetirá (45°/-45°). Por último, no ângulo de 90° os filamentos são alocados verticalmente em relação ao eixo Y.

### 2.3.1.9 Velocidade de impressão

Trata-se da velocidade de deslocamento do bico extrusor ao depositar material na mesa de impressão ao longo do plano XY, além disso está diretamente relacionado ao tempo que leva para uma peça ser fabricada (SOLOMON, SEVELL e GUNASEKARAN, 2021).

A deposição de material em velocidade mais alta cria tensões residuais maiores devido ao fato do material ser mais esticado durante a extrusão mais rápida (KAČERGIS, MITKUS e SINAPIUS, 2019). Isso, por sua vez, pode alterar não somente as propriedades mecânicas das peças, mas também sua estrutura, acarretando possíveis riscos de fraturas.

Ademais, a velocidade de impressão atua em 4 parâmetros, sendo o primeiro deles a velocidade de impressão da casca do objeto. O segundo a velocidade das camadas internas do objeto. O terceiro a velocidade de preenchimento. Por fim, no quarto, a velocidade das camadas superiores e inferiores.

## 2.4 POLÍMEROS

“Os polímeros são macromoléculas que se caracterizam por seu tamanho, estrutura química e interações intra e intermoleculares” (MANO e MENDES, 1999, p. 3). Eles são formados por longas moléculas com átomos ligados por covalência, que se repetem constantemente ao longo da cadeia (MANO e MENDES, 1999; CALLISTER e RENTHWISCH, 2016).

Os polímeros podem ser divididos em plásticos, borrachas e fibras. Segundo Callister e Renthwisch (2016), muitos dos materiais que são utilizados no dia a dia são polímeros produzidos sinteticamente. Isso porque os materiais sintéticos podem ser produzidos com custos relativamente baixos, e suas propriedades podem ser elevadas a valores que os tornam mais atrativos do que determinados materiais naturais.

Tratando-se dos plásticos, eles possuem basicamente duas subdivisões que são caracterizadas mediante a relação de aumento de temperatura. Eles se dividem em: termoplásticos (polímeros termoplásticos) e termorrígidos (polímeros termorrígidos). De acordo com Canevarolo Jr. (2013), os termoplásticos são materiais que se tornam mais maleáveis com aumentos de temperatura e a pressão, permitindo

que eles fluam e sejam moldados. Mesmo depois de moldado, é possível reutilizar e remoldar um termoplástico, bastando somente elevar sua temperatura e pressão.

Os termorrígidos ao serem aquecidos e resfriados uma vez, formam ligações cruzadas entre cadeias e se enrijecem permanentemente. Dessa forma, novos aumentos de temperatura e pressão não os afetam, tornando-os não-solúveis e infusíveis (CANEVAROLO JR., 2013).

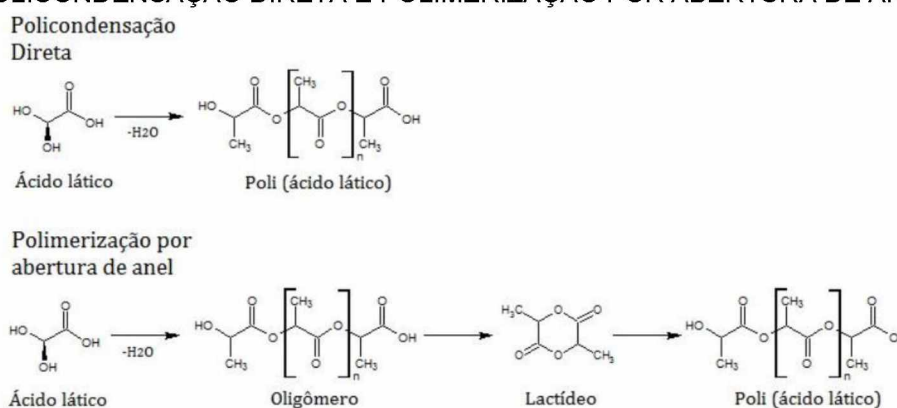
Uma outra característica dos polímeros está relacionada às suas estruturas. A estrutura de um polímero pode ser amorfa, onde as cadeias encontram-se desorganizadas, ou semicristalina, onde as cadeias encontram-se em um estado ordenado.

#### 2.4.1 Ácido Polilático – PLA

O PLA, também conhecido como poli (ácido lático) ou ácido polilático, é produzido em escala industrial por meio da reação de polimerização do ácido lático ou pela polimerização através da abertura de anel do lactídeo (MURARIU e DUBOIS, 2016), sendo essa última a mais utilizada e patenteada pela empresa Cargill Dow. Vide fórmula molecular da polimerização do ácido lático na FIGURA 15.

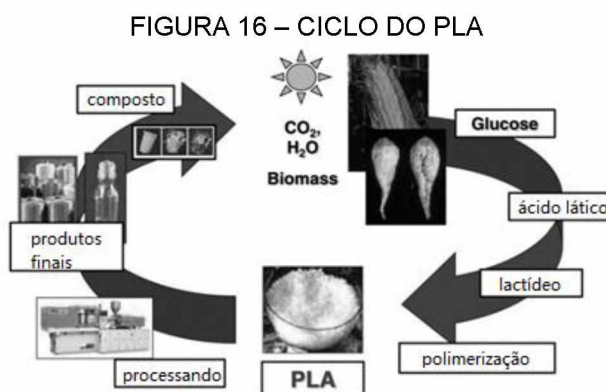
O ácido lático é produzido tanto industrialmente, como organicamente pelo corpo humano por meio, por exemplo, do metabolismo. Sua produção em escala industrial data no fim do século XIX e teve a indústria alimentícia como seu principal foco. (AVÉROUS, 2008).

FIGURA 15 – FÓRMULA MOLECULAR DA POLIMERIZAÇÃO DO ÁCIDO LÁTICO (POLICONDENSAÇÃO DIRETA E POLIMERIZAÇÃO POR ABERTURA DE ANEL)



FONTE: Horban *et al.* (2017).

“O PLA não é somente um material biocompatível e biodegradável, mas também é um poliéster alifático termoplástico” (MURARIU e DUBOIS, 2016, p. 19). Ele é fabricado a partir de alimentos bem conhecidos, como a batata e o milho. O açúcar ou polissacarídeos contidos nesses alimentos são retirados e fermentados para servirem como base para sua produção (MURARIU e DUBOIS, 2016). A FIGURA 16 apresenta o ciclo do PLA. Além disso, o PLA pode ser semicristalino ou totalmente amorfo, dependendo da pureza do polímero (HENTON, 2005).



FONTE: Adaptado de Murariu e Dubois (2016).

Embora a fragilidade e a rigidez do PLA possam ser grandes desvantagens para algumas aplicações, sua utilização é amplamente recorrente em pesquisas, principalmente nas que envolvem impressão 3D, além de ter um grande campo de estudo em aplicações médicas devido à suas propriedades de bioabsorção e propriedades de biocompatibilidade no corpo humano (AVÉROUS, 2008).

Na área de Manufatura Aditiva, algumas de suas vantagens se dão por ter menor probabilidade de deformação e encolhimento. Não necessitar de uma mesa aquecida e ambiente controlado para fazer a impressão. Sua temperatura de fusão é relativamente mais baixa, se comparado ao ABS. Não produz resíduos químicos e tóxicos. É facilmente encontrado por um preço geralmente acessível. Além disso, também é comum encontrar o PLA com algum aditivo seja ele fibra de vidro, de carbono, entre outros.

## 2.5 TESTE DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO EM POLÍMEROS

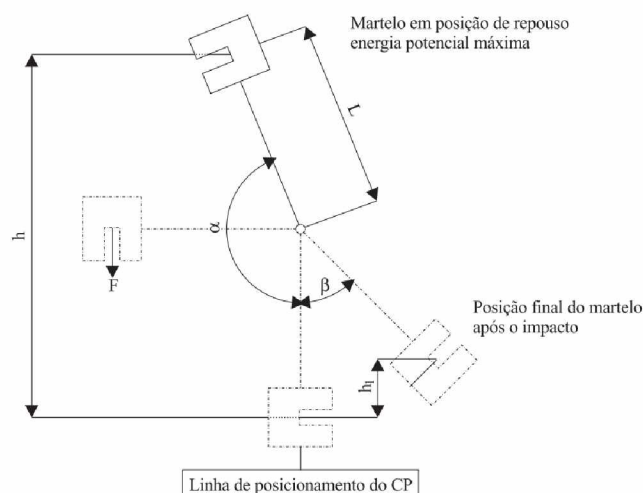
O teste de impacto é um método amplamente utilizado para determinar a tenacidade de um material (CANEVAROLO JR, 2006), isto é, a capacidade do material utilizado em absorver energia na deformação e ruptura (LIMA *et al.*, 2018; CALLISTER e RENTHWISCH, 2016).

O ensaio de impacto *Charpy* convencional é realizado por meio da aplicação de uma força, usando um pêndulo a martelo, em uma peça entalhada em V, padronizada por alguma norma regulamentadora. A peça é então fixada a um suporte, e, em seguida, o pêndulo é liberado de uma altura específica para atingir a peça e causar a fratura.

O entalhe tem a função de fazer a concentração de tensões (CORREA, YAMAKAWA e HAGE JR., 1999; GARCIA; SPIM e SANTOS, 2012; CALLISTER e RENTHWISCH, 2016; MEYERS e CHAWLA, 2008), diminuir a deformação plástica e orientar a propagação de trincas ao longo do objeto (MEYERS e CHAWLA, 2008).

O princípio físico-mecânico envolvido no ensaio de impacto pêndulo a martelo baseia-se no fato de que durante o movimento pendular do martelo, parte da energia potencial armazenada quando o pêndulo está parado é convertida em energia absorvida pela ruptura da peça (CORREA, YAMAKAWA e HAGE JR., 1999). Sendo assim, a energia necessária para fraturar uma peça é registrada medindo a oscilação do pêndulo antes e depois do impacto (GARCIA; SPIM e SANTOS, 2012). A FIGURA 17 apresenta o mecanismo de funcionamento do pêndulo.

FIGURA 17 – PRINCÍPIO FÍSICO-MECÂNICO DO FUNCIONAMENTO DO PÊNDULO A MARTELO



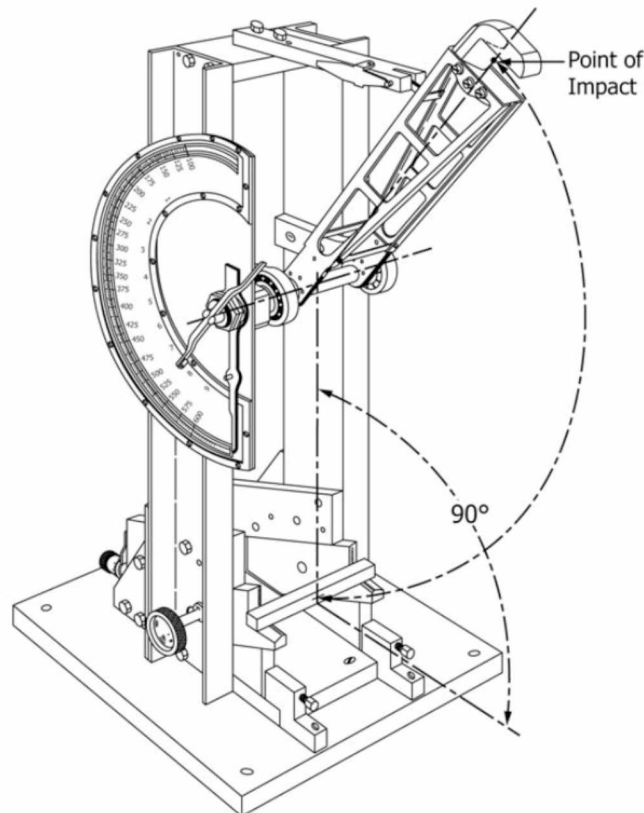
FONTE: Correa, Yamakawa e Hage Jr. (1999).

onde:

- $F$  = força do pêndulo;
- $\alpha$  = ângulo de lançamento do martelo;
- $\beta$  = ângulo do pêndulo que se desloca para um determinado corpo de prova;
- $h$  = altura de lançamento do martelo;
- $L$  = distância do eixo de apoio ao centro de percussão (comprimento);
- $\alpha$  = ângulo de lançamento do martelo
- $h_1$  = altura alcançada pelo martelo após o impacto na peça.

O funcionamento completo da máquina é apresentado pela FIGURA 18:

FIGURA 18 – EXEMPLO DE REPRESENTAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO TESTE DE IMPACTO *CHARPY* PELA NORMA ASTM D6110-10.

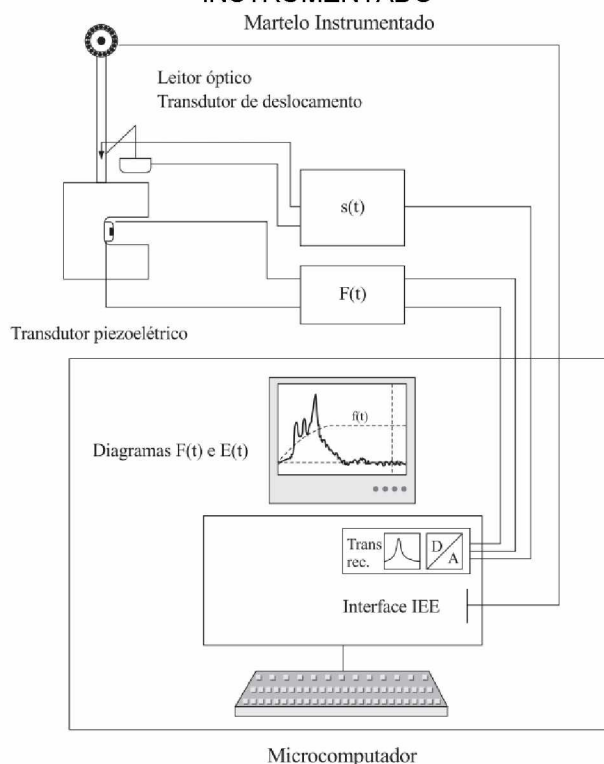


FONTE: ASTM (2010).

Há também o teste de impacto *Charpy* instrumentado. Assim como no *IZOD* instrumentado, a extremidade do martelo contém um sensor piezoelétrico que mede a mudança na força  $F(t)$ , e um instrumento óptico que registra a variação da peça em relação ao tempo durante o processo de rompimento. As grandezas obtidas

a partir do sinal  $F(t)$  são a velocidade medida do martelo  $v(t)$ , a posição do martelo  $s(t)$  e a energia absorvida pela peça durante a fratura  $E(t)$  (CORREA, YAMAKAWA e HAGE JR., 1999). A FIGURA 19 ilustra os principais elementos envolvidos na coleta de dados em um teste de impacto instrumentado.

FIGURA 19 – ELEMENTOS ENVOLVIDOS NA COLETA DE DADOS EM UM TESTE DE IMPACTO INSTRUMENTADO



FONTE: Correa, Yamakawa e Hage Jr. (1999).

Algumas das vantagens em utilizar o teste *Charpy* instrumentado são: possibilidade de analisar os efeitos da taxa de deformação (CHAOUADI e FRABRY, 1995), e maior acurácia na coleta dos dados. Especialmente no detalhamento do comportamento frágil-dúctil do material e propagação de trincas.

Os métodos para a realização dos testes de impacto são divididos em dois tipos. Correa, Yamakawa e Hage Jr., (1999) os descrevem como:

1. Métodos nos quais é feito o ajuste da energia de quebra até que uma parte de um lote de peças que está sendo testado se quebre.
2. Métodos nos quais a energia cinética utilizada é superior da que é necessária para causar a fratura da peça.

Nesta dissertação, foi utilizado o segundo método.

### 2.5.1 Fraturas típicas observadas em ensaios de impacto

Uma fratura, definida de forma simples, consiste basicamente no rompimento e separação de determinado material em duas ou mais partes quando submetido a uma tensão estática e em temperaturas mais baixas que o ponto de fusão do material (CALLISTER e RENTHWISCH, 2016).

Geralmente, uma fratura sempre envolverá algumas etapas, sendo elas a acumulação de danos, nucleação e propagação de trincas, e a falha (MEYERS; CHAWLA, 2008). Além disso, o tipo da fratura está diretamente relacionado à forma de propagação da trinca (CALLISTER e RENTHWISCH, 2016).

Segundo Peres (2009, p. 23) “cada uma dessas etapas se desenvolve numa escala característica, de forma que a modelagem do processo de fratura é, por sua própria natureza, mesoscópica”. Isto é, em diferentes níveis de observação, desde o tamanho microscópico das trincas até a dimensão macroscópica do corpo.

Normalmente, nos ensaios mecânicos destrutivos, o objetivo é investigar os níveis críticos de carga que levam a propagação estável ou instável de uma pré-trinca localizada na raiz de um entalhe, de tamanho e forma conhecidos (PERES, 2009). Geralmente fornecidos por uma norma regulamentadora.

Existem diferentes tipos de fraturas, cada uma com suas próprias características e causas. As comumente observadas em testes de impacto *Charpy* são as frágeis e as dúcteis.

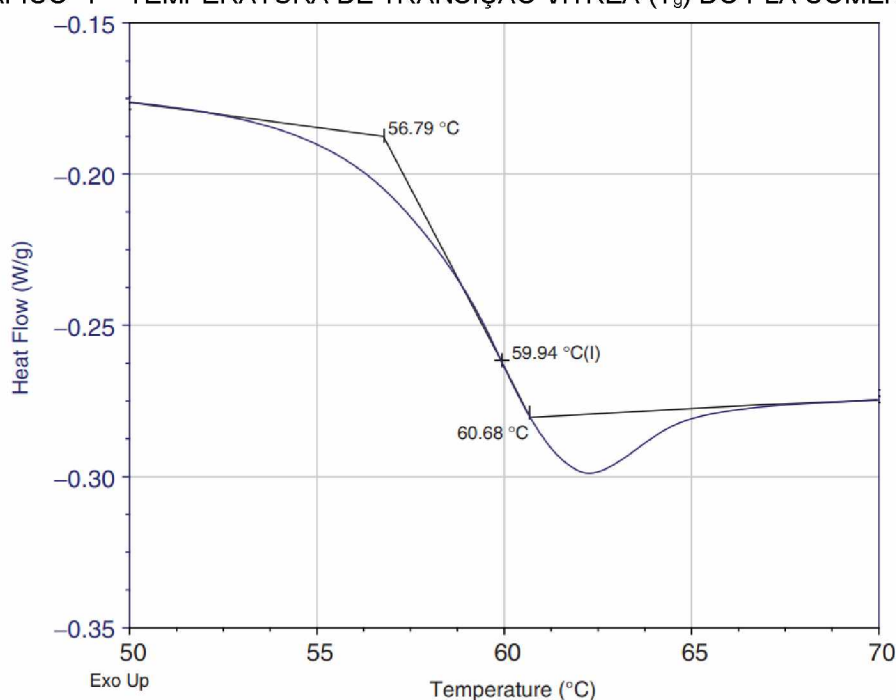
Em definição, uma fratura frágil é caracterizada pelo rompimento do elemento antes de ele chegar à deformação plástica (CANEVAROLO JR, 2006). Em outras palavras, as trincas se difundem muito rapidamente, com praticamente nenhuma deformação plástica. Uma vez iniciado o processo de propagação de trincas, ele continuará naturalmente mesmo sem haver aumento da tensão colocada (CALLISTER e RENTHWISCH, 2016).

Já uma fratura dúctil é mais comumente encontrada quando uma peça é submetida a uma força de tração. Algumas trincas se formam no interior do elemento enquanto ele é submetido à tensão. Por conseguinte, essas trincas aumentam de tamanho em direção paralela ao seu eixo, até que por fim, o material é rompido (DA ROCHA *et al.*, 2016). Este tipo de fratura é caracterizado por haver grande deformação plástica enquanto uma trinca encontra-se propagando.

Outra diferença em relação à fratura frágil é que o rompimento, bem como o aumento da trinca, acontece de forma mais lenta. Isso, de acordo com Callister e Rentwhisch (2016), é um benefício pois há tempo hábil de se perceber antes que um acidente ocorra.

Devido a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) do PLA ser aproximadamente entre  $57^\circ\text{C}$  e  $60^\circ\text{C}$  (AHMED, 2017); quando ele estiver abaixo dessa temperatura, se encontrará em estado rígido e frágil (CANEVAROLO JR, 2006). O GRÁFICO 1 apresenta a temperatura de transição vítrea típica para uma amostra comercial de polilactídeo a uma taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ .

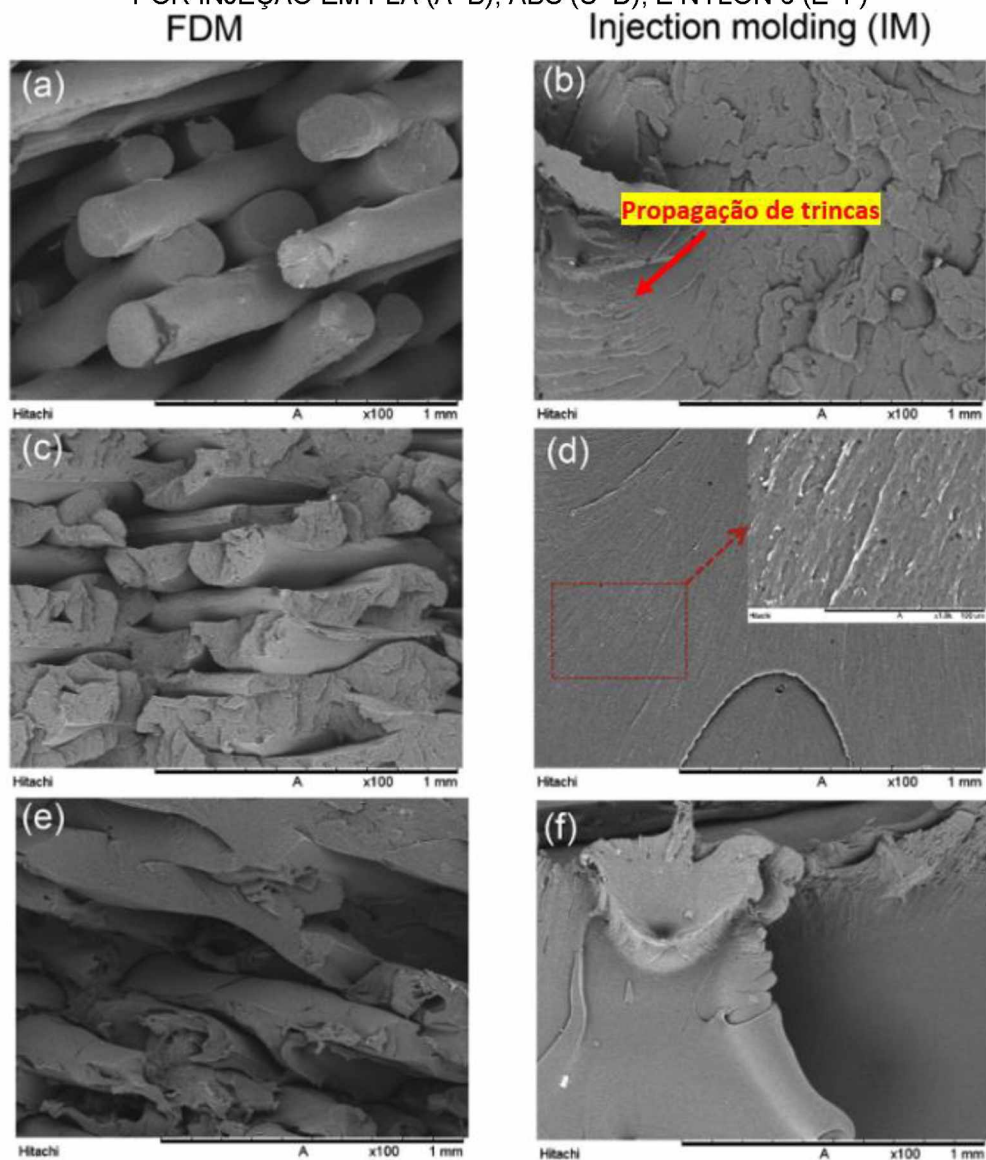
GRÁFICO 1 – TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA ( $T_g$ ) DO PLA COMERCIAL



FONTE: Ahmed (2017).

Desse modo, ao submeter uma peça fabricada em PLA a um teste de impacto abaixo da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), sua fratura será caracterizada como frágil. Logo, é possível de se observar algumas trincas que se propagam na peça, conforme mostra a FIGURA 20.

FIGURA 20 – MICROGRAFIAS REALIZADAS EM PEÇAS FEITAS POR FDM (FFF) E MOLDAGEM POR INJEÇÃO EM PLA (A–B), ABS (C–D), E NYLON 6 (E–F)



De acordo com Canevarolo Jr (2006), maiores concentrações de propagações de trincas podem indicar que o material apresentou menor resistência a fratura. Desse modo, em peças que sofrerão esforços mecânicos, recomenda-se fazer o monitoramento delas a fim de mantê-las em bom estado de uso.

## 2.6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, é apresentada uma revisão dos estudos correlatos encontrados na literatura. Embora alguns dos estudos aqui apresentados utilizem o teste *IZOD*, o princípio de funcionamento e tratamento dos dados são equivalentes para o *Charpy*. Por essa razão, optou-se por considerá-los.

### 2.6.1 Estudos correlatos

Na pesquisa conduzida por Tanveer, Haleem e Suhaib (2019), os autores objetivaram investigar o efeito diferentes combinações de porcentagens de preenchimento nas propriedades mecânicas de peças feitas de ácido polilático (PLA) impressos usando uma impressora 3D sem câmara fechada.

Um total de trinta e seis peças foram impressos para o teste de tração e vinte e sete peças para o teste de impacto *IZOD* e *Charpy*. As peças foram impressas usando três densidades de preenchimento diferentes: A: 100%, B: 75% e C: 50%. A combinação de preenchimentos é apresentada na TABELA 1.

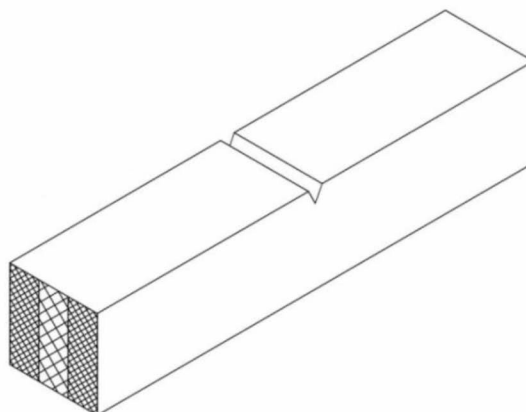
TABELA 1 – ARRANJO DE PORCENTAGENS DE PREENCHIMENTO

Número	Classificação	Camada externa (%)	Camada interna (%)	Camada externa (%)
1	A	100	100	100
2	B	75	75	75
3	C	50	50	50
4	ABA	100	75	100
5	BAB	75	100	75
6	ACA	100	50	100
7	CAC	50	100	50
8	BCB	75	50	75
9	CBC	50	75	50

FONTE: Adaptado de Tanveer, Haleem e Suhaib (2019).

O estudo não informou se houve paredes internas para variar a porcentagem de preenchimento interno. A largura da camada foi um terço da largura total do corpo de prova. O artigo forneceu uma imagem da peça para teste de impacto, e, por ela, pode-se ter uma noção de como era a região com diferentes porcentagens de preenchimento. Vide FIGURA 21 para maior compreensão.

FIGURA 21 – PEÇA PARA ENSAIO DE IMPACTO COM DIFERENTES PORCENTAGENS DE PREENCHIMENTO



FONTE: Adaptado de Tanveer, Haleem e Suhaib (2019).

Os resultados do trabalho mostraram que, para os ensaios de ensaio de impacto, a porcentagem de preenchimento é diretamente proporcional à resistência ao impacto, que resulta no peso das peças. Ao comparar com as porcentagens de preenchimento puras, os resultados dos testes das combinações de porcentagens de preenchimento foram menores.

Mesmo sendo menores, a resistência ao impacto se torna um pouco melhor se a parte interna for de maior porcentagem de preenchimento e a parte externa for de menor porcentagem.

No trabalho publicado por Cabreira e Santana (2020), os autores visaram estudar as influências dos padrões de preenchimento na mecânica de peças impressas por tecnologia *Fused Filament Fabrication* (FFF), utilizando como matéria prima o PLA (ácido polilático). Como foram realizados testes de impacto e de tensão, os autores utilizaram amostras feitas de acordo com as normas ASTM 256 e ASTM D638.

Os projetos 3D foram transferidos para o *software* Slic3r v1.3.0, onde foram fatiados gerando os códigos *gcode*. Nesta etapa os autores também estabeleceram os parâmetros de impressão. Foram utilizados 4 tipos de preenchimento para fazer as impressões, sendo esses: retilíneo; grade, favo de mel e triangular. Já referente a densidade dos preenchimentos, foi utilizado 20% para todas as amostras. A velocidade de impressão foi de 20 mm/s, temperatura de impressão 200° C, espessura de camada 0.3 mm, 1 camada de parede, e *raster angle* de 0° usando a orientação padrão Slic3r<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> No software CURA essa mesma orientação de impressão se daria pelas coordenadas [0,90].

O teste de resistência ao impacto *IZOD* foi realizado em um CEAST usando um martelo de 2,75 J. Como resultados do teste de impacto, o padrão triangular foi o que apresentou a menor resistência ao impacto entre os preenchimentos. De acordo com os autores, essa menor resistência pode ser consequência da estrutura mais simples formada pelo padrão de preenchimento. Também há certa pré-disposição a falhas, pois as rachaduras criariam tensões maiores na estrutura interna.

Já o restante dos preenchimentos possui resistência ao impacto similar, sendo superior ao preenchimento triangular. Ainda segundo os autores, a análise estatística conduzida apresentou que o padrão retilíneo deve manter uma resistência ao impacto mais alta do que o de grade.

Como resultados da pesquisa, o padrão retilíneo apresentou os melhores resultados nos testes, consumiu menos filamento e obteve menor tempo de impressão que os demais.

Habeeb, Abood e Mohan, em artigo publicado em 2020, focaram em estudar o impacto da espessura da camada e a densidade de preenchimento nas propriedades mecânicas de peças feitas a partir de PLA natural e PLA com partícula de carbono. (CP/PLA). Para isso, eles utilizaram a impressora do tipo TEVO, e desenvolveram os modelos digitais 3D utilizando o software *SolidWorks*.

Como principais parâmetros de impressão para os testes com foco na densidade, os pesquisadores utilizaram: temperatura de 200°C, ângulo de impressão 45°, altura da camada de 0.2 mm; densidade de preenchimento de 50%, 65%, 85%, 100%, velocidade de impressão de 50mm/s, 3 camadas de parede, e padrão retilíneo. Para a realização do teste de impacto *IZOD*, 3 amostras para cada densidade foram feitas.

De acordo com os autores, ao imprimir as amostras com 100% de preenchimento, materiais 100% sólidos (sem espaços deixados entre as camadas) fortalecem as peças e geram alto impacto. Entretanto, por mais que ao ajustar a impressora para imprimir peças com 100% de preenchimento, sempre haverá os espaços entre as camadas, *air gaps*, por menores que sejam.

Sobre os resultados obtidos, quando a densidade de preenchimento foi de 100%, os maiores valores de impacto do PLA e CP/PLA foram 17,5 e 13,333 KJ/m<sup>2</sup>, respectivamente. Já as resistências mínimas ao impacto do PLA e CP/PLA com densidade de empacotamento de 50% foram 13,75 e 10 KJ/m<sup>2</sup>, respectivamente.

Como conclusões da pesquisa, obteve-se que o preenchimento de 100% foi o de maior resistência ao impacto.

No artigo apresentado por Mishra (2021), os pesquisadores estudaram os efeitos de diferentes tipos de preenchimentos e densidades de preenchimento na resistência ao impacto de peças feitas de PLA em tecnologia 3D. Para isso, eles realizaram testes em laboratórios para medir a energia absorvida durante a deformação do PLA com diferentes combinações de preenchimento e densidade.

Os preenchimentos usados nesse estudo foram linha, zig zag, concêntrico, cruz, concêntrico 3D, cruz 3D, subdivisão cúbica, grade, octeto, quarto cúbico, triangular e hexagonal.

Como se tratou de uma pesquisa experimental, os autores utilizaram a especificação ASTM D256, no programa de modelagem de sólidos paramétricos CREO, para a fabricação dos corpos de prova. Foram feitas um total de 117 peças a partir das combinações de densidade de preenchimento e padrão de preenchimento. O estudo não apresentou como a ordem de impressão foi definida, nem como cada padrão de preenchimento recebeu determinada porcentagem de densidade.

Os corpos de prova foram fabricados usando a técnica *Fused Filament Fabrication* (FFF), e o PLA como matéria-prima na impressora 3D 'Ultimaker 3 Extended', de acordo com os parâmetros de processo apropriados. O QUADRO 1 apresenta os parâmetros fixos de impressão.

QUADRO 1 – PARÂMETROS FIXOS DE IMPRESSÃO

Número de série	Parâmetros de impressão	Valor
1	Altura da camada	0,2 mm
2	Altura da camada inicial	0,2 mm
3	Espessura do filamento	0,35 mm
4	Largura do filamento da parede	0,35 mm
5	Largura do filamento da parede externa	0,35 mm
6	Largura do filamento da parede interna	0,3 mm
7	Espessura da parede	1 mm
8	Contagem do filamento de parede	3
9	Temperatura de impressão	215°C
10	Temperatura da mesa de impressão	60°C
11	Fluxo do bico	100%
12	Tipo de adesão na mesa de impressão	Nenhum

FONTE: Adaptado de Mishra *et al.* (2021).

Para a realização do teste de impacto, os pesquisadores utilizaram o teste *IZOD*. Após feito os testes com todas as amostras e suas combinações, os resultados das peças fabricadas com padrão de linha, zig zag e concêntrico, apresentaram os melhores resultados comparados aos demais. Sendo assim, o foco da pesquisa foi direcionado para eles, com as densidades de preenchimento de 50%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95% e 100%. De primeiro momento, os dados mostraram que havia uma crescente tendência de absorção de energia até 85% de preenchimento, após essa tendência decaiu e atingiu seu menor valor em 100% de preenchimento.

Dentre as conclusões obtidas com o estudo, ressalta-se que a resistência ao impacto depende da natureza da estrutura interna, ou seja, seu tipo de preenchimento tem papel ímpar em equilibrar a intensidade de tensão e a propagação de trincas. Desse modo, a densidade de 85% de preenchimento apresentou o maior potencial de absorção de energia.

Como há um espaço vazio entre cada camada impressa com densidades mais baixas, a propagação de trincas no padrão de preenchimento é descontínua e resistida devido a tal nucleação de trincas. Além disso, devido à área de superfície limitada, a fratura é dominada por forte tensão.

Por fim, em 2017, Patterson *et al.* analisaram as propriedades de resistência a impacto obtidas pelo teste *IZOD*, em relação ao *raster angle* e a orientação de impressão, usando 100% de densidade de preenchimento. Os autores utilizaram 10 diferentes tipos de materiais entre eles o PLA, 7 diferentes *raster angles*, e 3 tipos de orientações de impressão (vertical, horizontal e lateral<sup>2</sup>).

Para a fabricação do chanfro da peça, devido à falta de métodos registrados e confiáveis, os autores desenvolveram um próprio equipamento para essa finalidade, o qual provou ser eficiente. Ele funciona como uma brochadeira, e utiliza uma ponta com angulação de 45°. As peças são posicionadas e presas de forma lateral, para que o equipamento as entalhe. Logo após, elas passam para a finalização com uma lixa, para fazer o arredondamento do chanfro e então serem testadas. O teste conduzido foi o *IZOD* do tipo E – ASTM D256. Nesse teste, a peça é posicionada na máquina de forma que o entalhe fique oposto ao martelo.

Como principais resultados da pesquisa, os autores relatam que a casca e o *raster angle* tiveram papel fundamental para determinar as propriedades de absorção

---

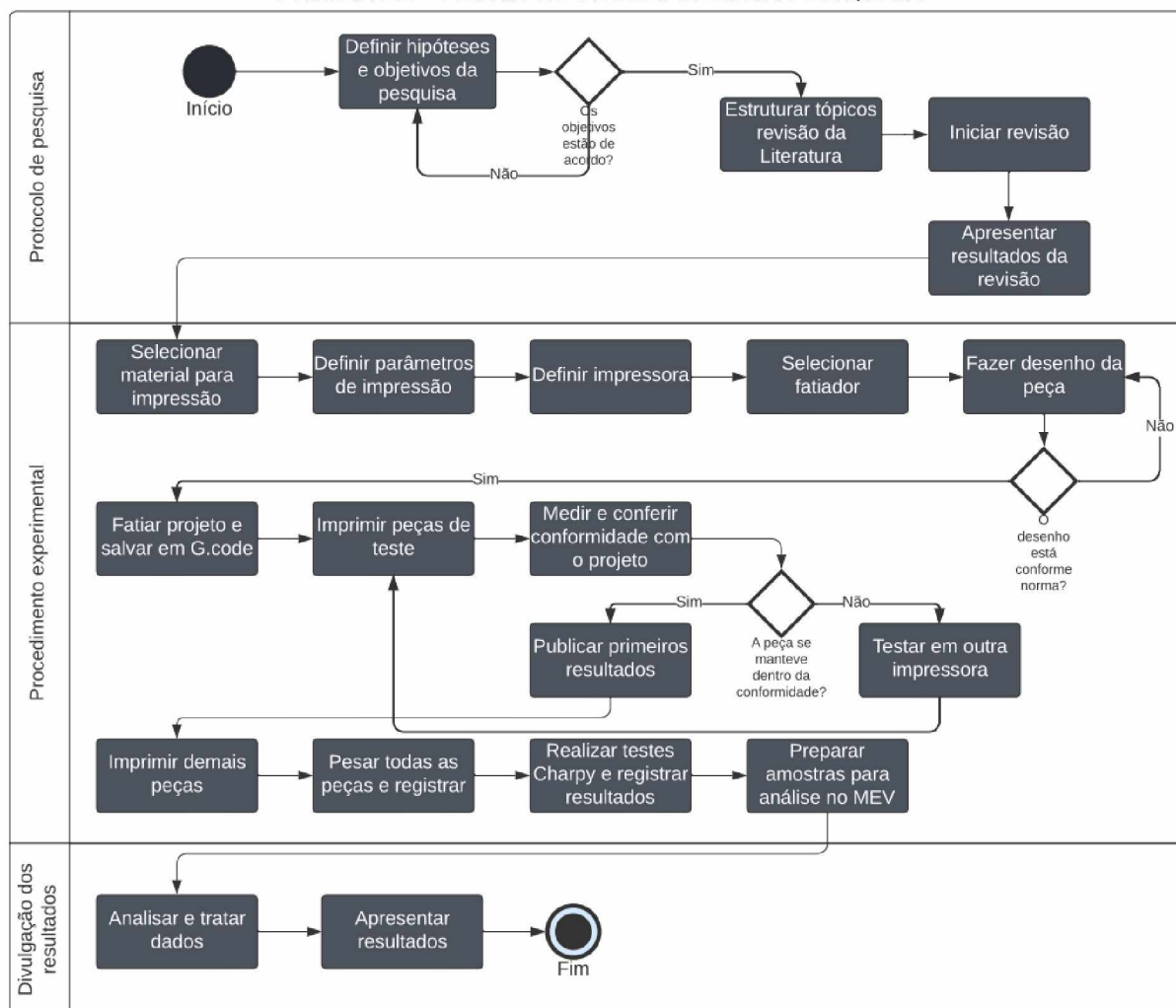
<sup>2</sup> No artigo, o autor se refere a essas orientações como: *vertical*, *horizontal* e *flat*. Em português é comumente tratado o *flat* como horizontal e *horizontal* como lateral.

de energia, devido ao fato de influenciarem o comprimento e direção da trinca durante a fratura. Além disso, o teste do tipo E se mostrou consistente e eficaz, pois permitiu analisar a influência da casca e do preenchimento na tenacidade no material. Por fim, observou-se também que *raster angle* direcionou a trinca de maneira previsível para a orientação horizontal e de maneira menos previsível para demais.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Para a elaboração e organização das atividades realizadas no estudo, utilizou-se como base o fluxo de atividades apresentado pela FIGURA 22.

FIGURA 22 – FLUXO DE ATIVIDADES DA PESQUISA



FONTE: O autor (2023).

#### 3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

A impressora selecionada para fazer a impressão das peças foi a *Ender Pro-5* de sistema aberto, a qual fica localizada no laboratório do GIMa, no prédio da UFPR. As características técnicas do equipamento são apresentadas pelo QUADRO 2:

QUADRO 2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

<b>Impressora 3D FFF - Ender pro-5</b>		
<b>Tamanho útil de impressão (mm)</b>	X	220
	Y	220
	Z	300
<b>Diâmetro de Filamento</b>	1,75mm	
<b>Materiais Compatíveis</b>	PLA, ABS, PTGE, TPU, <i>Wood</i> , PVA, Fibra de Carbono...	
<b>Precisão de Impressão</b>	± 0.1mm	
<b>Diâmetro de Bico</b>	Padrão 0.4 mm	
<b>Altura de Camada:</b>	0.1- 0.4 mm (Ajustável)	
<b>Precisão de Posicionamento:</b>	Eixo Z – 0,004 mm / XY – 0,012 mm	
<b>Velocidade Máxima de <i>Travel</i>:</b>	180 mm/s	
<b>Velocidade Máxima de Impressão:</b>	100 mm/s (40 - 80 mm/s Recomendado)	
<b>Temperatura Máxima do bico:</b>	260 ° C	
<b>Temperatura Máxima da Mesa:</b>	110° C	
<b>Nivelamento de Mesa:</b>	Manual	

FONTE: Adaptado de Topink3d (2022).

Esta máquina, de impressão aberta, utiliza de filamentos como matéria-prima, e os aquece para fazer a deposição das camadas de material, além de contar com uma mesa de impressão aquecida. Ela foi escolhida por já estar disponível para uso no laboratório GIMa da Universidade Federal do Paraná, por suprir as necessidades da pesquisa e devido ao fato do PLA não necessitar de uma impressora de sistema fechado.

Para a medição das massas das peças, utilizou-se a balança da marca Shimadzu modelo AUY220. Esta balança possui precisão de 0,001g. Com a informação das massas foi possível calcular as porcentagens reais de massa das peças. Para a medição das medidas externas das peças foi utilizado um paquímetro digital da marca MXT 150mm.

Para a realização dos testes de impacto, foi utilizado a Máquina de teste *Charpy* tradicional, a qual está localizada no laboratório GIMa da Universidade Federal do Paraná.

A matéria-prima utilizada para a impressão das peças foi o PLA de cor roxa, da marca GTmaX3D. Os filamentos vêm em carretéis de 1 kg, e seus dados técnicos são apresentados pelo QUADRO 3:

QUADRO 3 – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO FILAMENTO

<b>Diâmetro</b>	1.75mm
<b>Tolerância Dimensional</b>	+/- 0.02mm (Controlado Eletronicamente)
<b>Temp. de Extrusão (bico)</b>	190°C à 220°C
<b>Temp. da Mesa (base)</b>	0°C à 60°C
<b>Velocidade de impressão</b>	até 150mm
<b>Temperatura de transição vítrea</b>	60°C

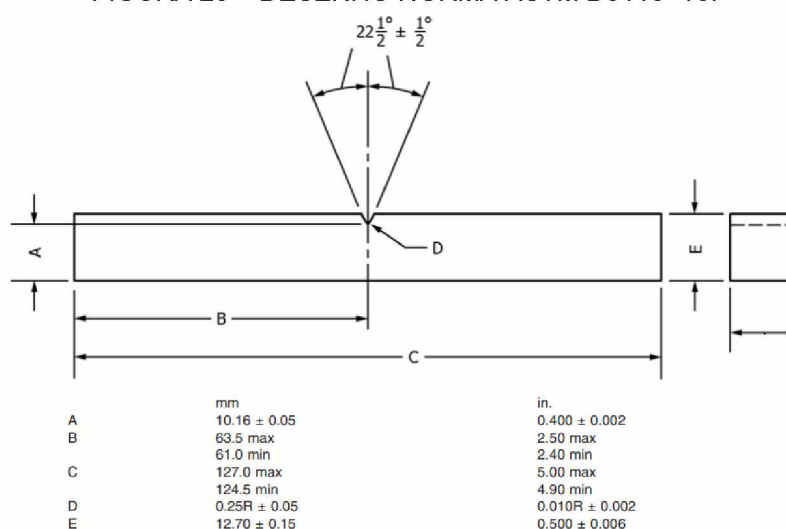
FONTE: Adaptado de GTmaX3D (2022).

O software de modelagem 3D utilizado para criar a peça, o desenho técnico e o sólido 3D foi o *Autodesk Inventor Professional 2022*. Para fazer o fatiamento, inserção do recurso interno e a adição dos demais parâmetros de impressão foi utilizado o *slicer CURA* versão 5.1.1. Por fim, as análises estatísticas foram feitas no *Minitab 2017* e a geração dos gráficos no *Excel*.

### 3.2 MÉTODO E DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO

Para a fabricação das peças foi utilizado o modelo disponibilizado pela norma ASTM D6110-10, como exemplificado pela FIGURA 23.

FIGURA 23 – DESENHO NORMA ASTM D6110-10.

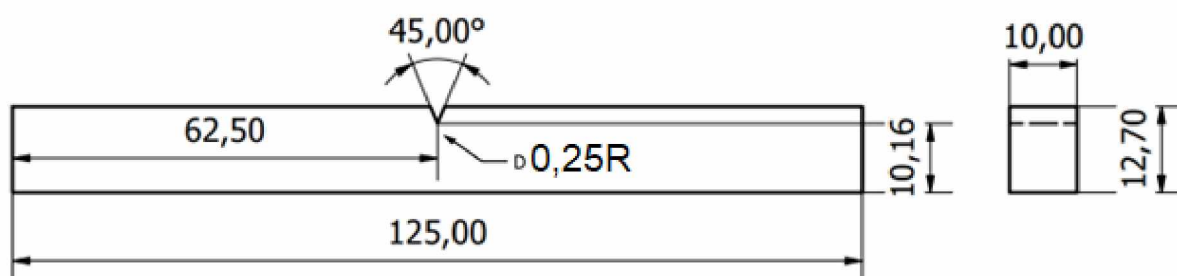


FONTE: Adaptado de ASTM (2010).

Após consultar a norma aplicada, elaborou-se o desenho final da peça no *software Inventor* (FIGURA 24). Optou-se por uma espessura de 10 mm, levando em consideração que a norma permite uma variação na espessura entre 3 mm e 12,7

mm. Caso a peça tivesse uma espessura muito menor, isso impossibilitaria a adição do recurso interno.

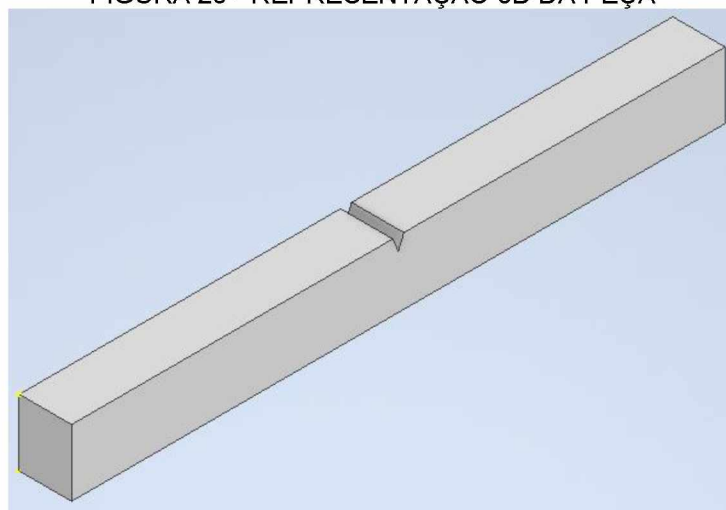
FIGURA 24 – DESENHO TÉCNICO DA PEÇA



FONTE: O autor (2023).

Tendo feito isso, elaborou-se o modelo 3D da representação técnica por meio do mesmo *software*, apresentada pela FIGURA 25.

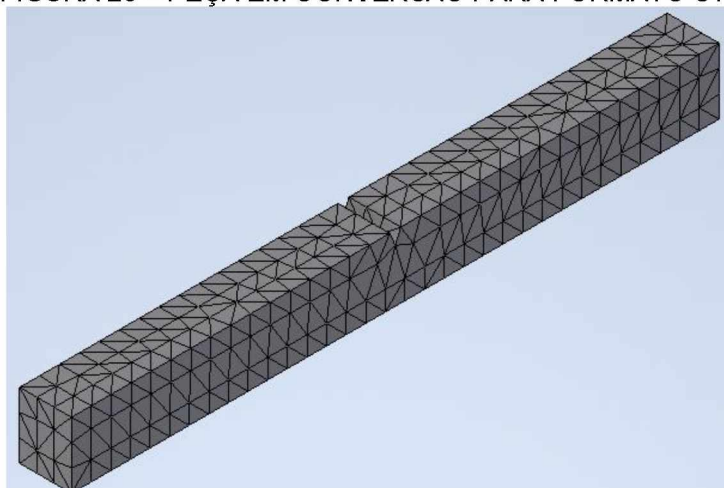
FIGURA 25 - REPRESENTAÇÃO 3D DA PEÇA



FONTE: O autor (2023).

O modelo 3D, após finalizado, foi salvo em formato STL (*Standard Triangle Language*). Esse formato é responsável por transformar o projeto sólido em várias coordenadas sobre a superfície do objeto. Vide FIGURA 26.

FIGURA 26 – PEÇA EM CONVERSÃO PARA FORMATO STL

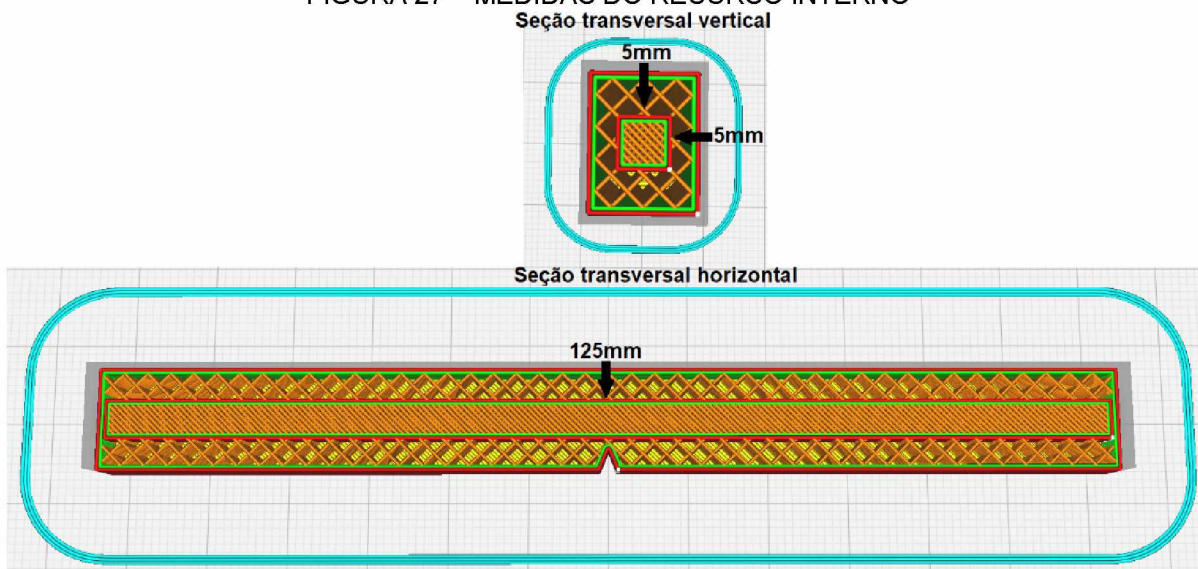


FONTE: O autor (2023).

Logo após salvo em STL, ele foi encaminhado para o Software CURA, onde foram adicionados os parâmetros de impressão e feita a adição do recurso interno de preenchimento no centro da peça.

A escolha da adição desse recurso possibilitou utilizar mais de um tipo de porcentagem de preenchimento em uma única peça. Com isso, é possível analisar se diferentes porcentagens internas afetam a resistência ao impacto, bem como se têm influência na propagação de trincas internas. Suas medidas são: 5mm de altura x 5mm de largura x 125mm de comprimento (FIGURA 27).

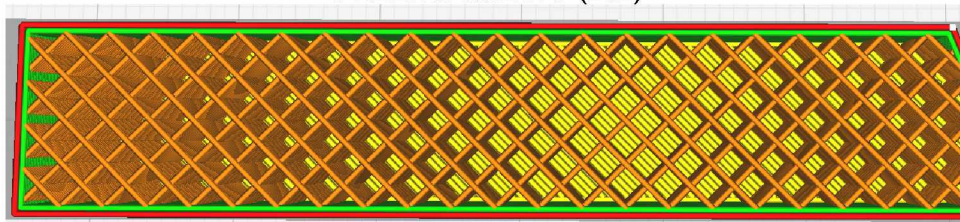
FIGURA 27 – MEDIDAS DO RECURSO INTERNO



FONTE: O autor (2023).

As impressões foram divididas em 4 partes. Na primeira parte foram impressos 3 lotes de 5 peças com somente os preenchimentos de 20%, 50% e 80%, sendo 1 lote de 5 peças para cada porcentagem. A FIGURA 28 ilustra uma peça com 20% de preenchimento simulada no CURA. Essas porcentagens foram escolhidas de modo que houvesse um valor baixo, intermediário e alto. Dessa forma, é possível analisar com maior exatidão a diferença que cada tipo de porcentagem tem nos resultados dos testes. O objetivo nessa parte foi produzir as peças para servirem como comparativo nos testes para as demais.

FIGURA 28 – REPRESENTAÇÃO DA PEÇA NO CURA COM SOMENTE 20% DE PREENCHIMENTO (20E)



FONTE: O autor (2023).

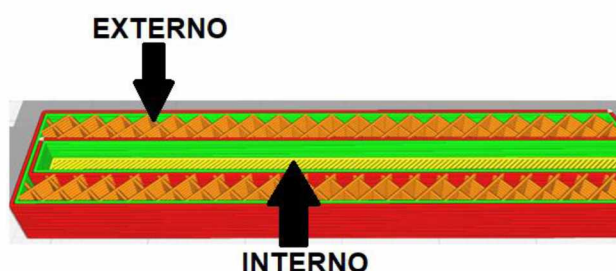
Na segunda parte, foram impressos mais 3 lotes de 5 peças utilizando 0% de preenchimento no recurso interno, isso é, com o recurso interno oco; FIGURA 29. Sendo 1 lote de 5 peças para cada combinação. As combinações se deram da seguinte maneira, TABELA 2.

TABELA 2 – COMBINAÇÕES DE PORCENTAGENS DE PREENCHIMENTO: 2ª PARTE

EXTERNO (E)	INTERNO (I)
20%	0%
50%	0%
80%	0%

FONTE: O autor (2023).

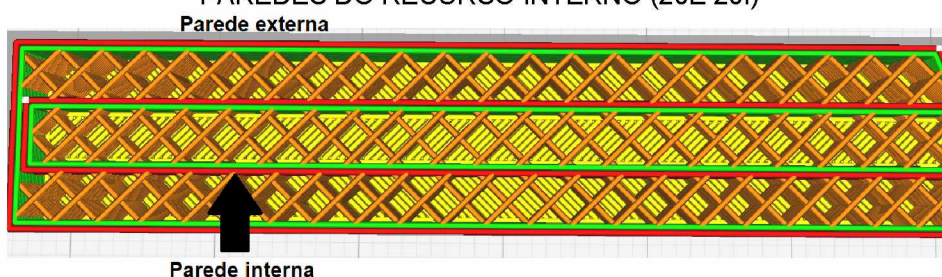
FIGURA 29 – REPRESENTAÇÃO DA PEÇA NO CURA COM 20% EXTERNO E 0% INTERNO DE PREENCHIMENTO (20E 0I)



FONTE: O autor (2023).

Na terceira parte foram impressos mais 3 lotes de 5 peças com as mesmas porcentagens escolhidas na primeira parte (20%, 50% e 80%). Novamente, sendo 1 lote de 5 peças para cada combinação. Porém, dessa vez com a adição recurso interno com mesma porcentagem de preenchimento externo, vide exemplo na FIGURA 30. A diferença da terceira parte com a primeira é a inserção da parede interna.

FIGURA 30 – REPRESENTAÇÃO DA PEÇA NO CURA COM 20% DE PREENCHIMENTO MAIS AS PAREDES DO RECURSO INTERNO (20E 20I)



FONTE: O autor (2023).

Logo, as combinações se deram da seguinte forma:

TABELA 3 – COMBINAÇÕES DE PORCENTAGENS DE PREENCHIMENTO: 3ª PARTE

EXTERNO (E)	INTERNO (I)
20%	20%
50%	50%
80%	80%

FONTE: O autor (2023).

Na quarta e última parte foram impressos outros 6 lotes de 5 peças, porém variando as porcentagens do recurso interno entre 20%, 50% e 80%. Sendo, de mesmo modo, 1 lote de 5 peças para cada combinação. As combinações se deram como apresentadas pela TABELA 4:

TABELA 4 – COMBINAÇÕES DE PORCENTAGENS DE PREENCHIMENTO

INTERNO (I)	EXTERNO (E)
20%	50%
20%	80%
50%	20%
50%	80%
80%	20%
80%	50%

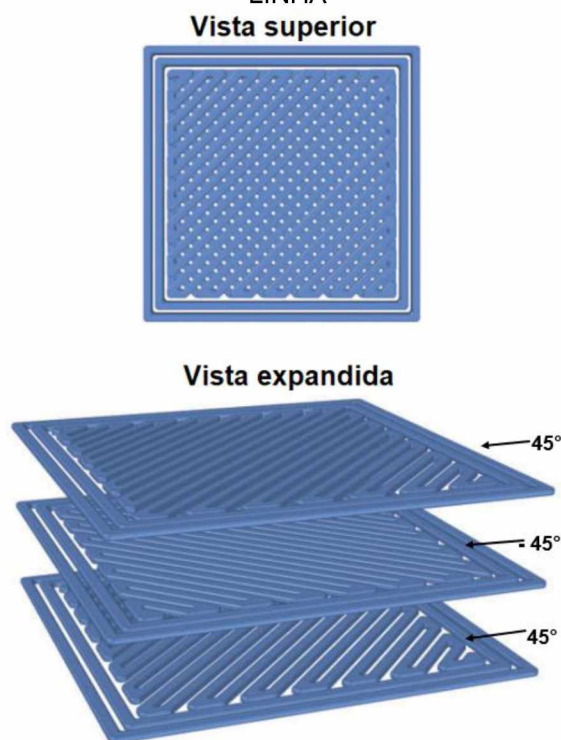
FONTE: O autor (2023).

Não há o valor de 100% em nenhuma das situações, pois ao colocar esse percentual no *slicer* na parte externa e um valor menor na parte interna, o programa não reconhecia a porcentagem menor, deixando a peça toda com 100% de preenchimento. Por essa razão, optou-se por não o utilizar.

Sobre o tipo de preenchimento, ele também é de grande importância pois pode afetar as propriedades mecânicas da peça. O *design* preenchimento escolhido para esse estudo foi o de tipo linha, pois é um dos mais utilizados nos estudos encontrados na literatura e por ter menor tempo de impressão.

Esse preenchimento tem como principal característica a deposição de camadas unidirecionais, embora possa utilizar mais de um ângulo de varredura. A título de exemplo, este trabalho utiliza dois ângulos de deposição: 45° (positivo) -45° (negativo). Neste caso, cada camada é depositada com um ângulo, sendo alternado até a construção final da peça. Além disso, a cada nova camada depositada, ela não entra em total contato com a anterior, exceto pelo encontro de alguns filamentos que formam nós. Desse modo, há alguns espaços vazios entre uma camada e outra. A FIGURA 31 ilustra essa situação.

FIGURA 31 - EXEMPLIFICAÇÃO DA CONSTRUÇÃO DAS CAMADAS DO PREENCHIMENTO TIPO LINHA



FONTE: Adaptado de Patterson *et al.* (2019).

Com isso feito, definiu-se também os demais parâmetros de impressão. Estes também foram baseados nos estudos encontrados na literatura. Os mesmos valores foram usados para todas as impressões. Vide QUADRO 4.

Em nenhuma das impressões foi utilizado controle de umidade e temperatura do ambiente, visto que o PLA é um material do qual não necessita de uma cabine de impressão fechada.

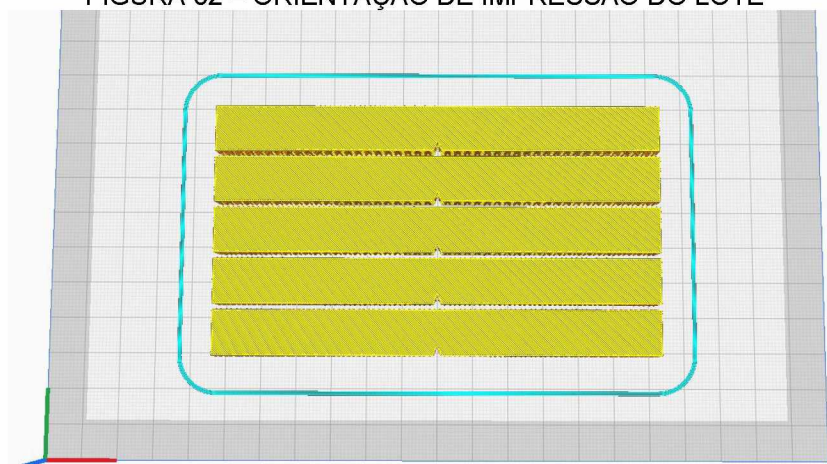
QUADRO 4 – PARÂMETROS GERAIS DE IMPRESSÃO UTILIZADOS NO TRABALHO

PARÂMETROS DE IMPRESSÃO	
Velocidade de impressão	50mm/s
Altura da camada	0,2mm
Temperatura de impressão	200°C
Temperatura da mesa de impressão	60°C
<i>Raster angle</i>	45°/-45°
Orientação de impressão	Horizontal - eixo X
Camadas da parede	2
Diâmetro do bico	0,4mm
Porcentagens de preenchimento	20%, 50% e 80%
Controle de umidade e temperatura do ambiente	Não

FONTE: O autor (2023).

Todas as peças foram impressas na horizontal no eixo X, devido ao fato de contar com a influência da resistência da cadeia polimérica na realização dos testes. Já se fossem impressas verticalmente, contariam majoritariamente com a resistência de ligação entre as camadas. Isso afetaria os resultados dos experimentos. O *raster angle* - ângulo de varredura foi de 45°/-45° (padrão do CURA). FIGURA 32 exemplifica a orientação na mesa de impressão.

FIGURA 32 – ORIENTAÇÃO DE IMPRESSÃO DO LOTE



FONTE: O autor (2023).

As impressões foram feitas em ordem aleatória. O QUADRO 5 apresenta as ordens de impressão das peças.

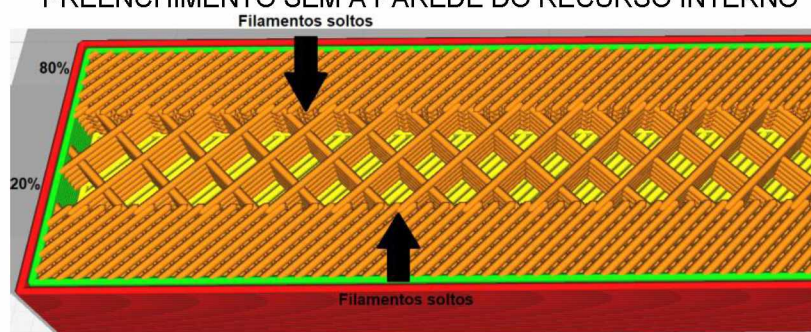
**QUADRO 5 – ORDEM DE IMPRESSÃO**

<b>Ordem de impressão</b>	<b>Combinações (lotes)</b>
2	20E
1	50E
3	80E
<b>Ordem de impressão</b>	<b>Combinações (lotes)</b>
3	20E 0I
1	50E 0I
2	80E 0I
<b>Ordem de impressão</b>	<b>Combinações (lotes)</b>
2	20E 20I
3	50E 50I
1	80E 80I
<b>Ordem de impressão</b>	<b>Combinações (lotes)</b>
2	20E 50I
5	20E 80I
1	50E 20I
4	50E 80I
3	80E 20I
6	80E 50I

FONTE: O autor (2023).

Destaca-se que em todos os casos que houve combinações, mesmo que com 0% ou porcentagens externas e internas iguais, tiveram as paredes do recurso interno. Isso se deu pelo fato de que se fossem impressas sem elas, os filamentos de preenchimento não iriam se aderir com a parte de porcentagem diferente, ficando soltos, como ilustrado pela FIGURA 33.

**FIGURA 33 – EXEMPLIFICAÇÃO DE PEÇA COM MAIS DE UMA PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO SEM A PAREDE DO RECURSO INTERNO**



FONTE: O autor (2023).

### 3.3 ETAPAS DE FABRICAÇÃO

Sobre as etapas de fabricação das peças, elas são divididas em:

1. **Deposição das paredes externas**, isto é, a casca.
2. **Construção da base inferior com 100% de preenchimento**. O tempo para a finalização dessa etapa depende do número de camadas desejado. Quanto mais camadas, mais demorado é o processo.
3. **Preenchimento interno da peça**. Nessa etapa, o *design* escolhido (estrutura interna) começa ficar evidente pois são depositadas as camadas de acordo com a porcentagem escolhida. Em porcentagens de preenchimentos menores, o tempo de impressão também é menor. Isso ocorre devido a movimentação menos espaçada que o cabeçote extrusor faz. Ao elevar a porcentagem de preenchimento, os espaços entre cada filamento depositado tornam-se menores, fazendo com que o cabeçote se movimente mais. Esse processo de deposição das camadas internas é feito repetidamente até o programado. As paredes externas são construídas na mesma camada que o preenchimento interno.
4. **Construção do topo com 100% de preenchimento**. Nesta parte é feito o preenchimento superior da peça com 100% de material.

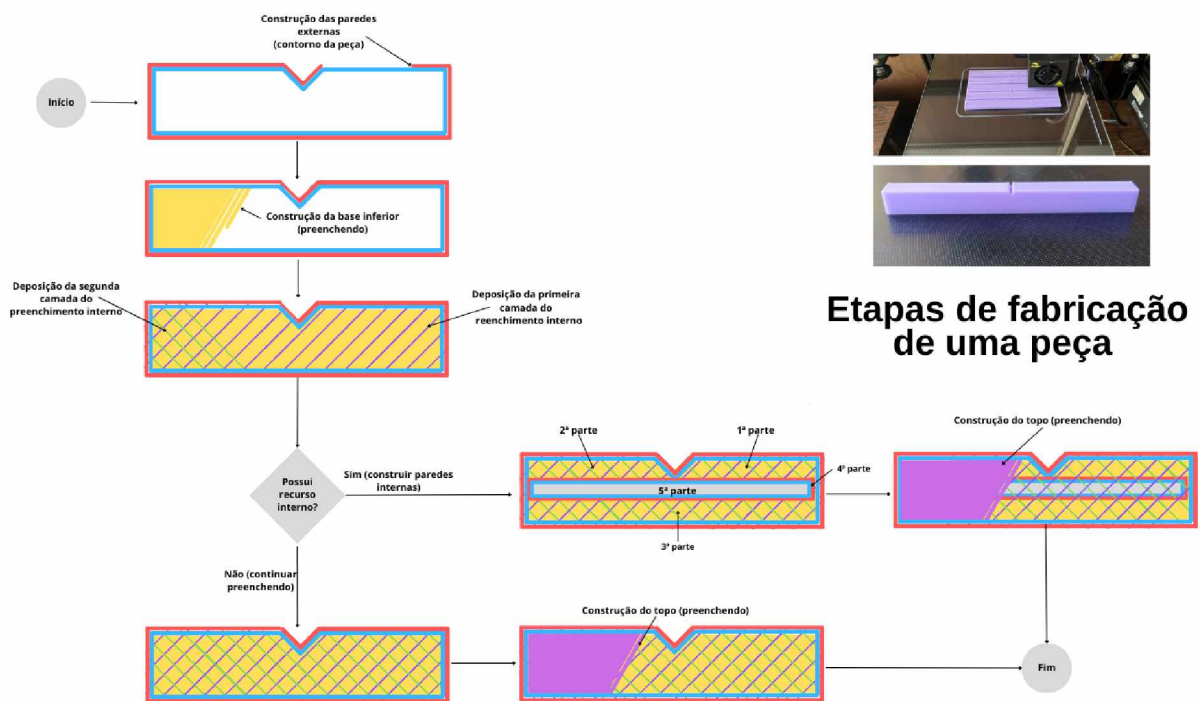
Caso haja recurso interno, as etapas de impressão ocorrem da seguinte forma:

1. **Deposição das paredes externas**. (similar a etapa anterior)
2. **Construção da base inferior com 100% de preenchimento**. (similar a etapa anterior)
3. **Preenchimento interno da peça**. Nesta parte, a impressora preencherá com o *design* básico escolhido até o ponto em que se inicia o recurso interno. Após, as etapas se dividem em:
  - Construção da primeira parte feita no lado direito do entalhe.
  - Construção da segunda parte feita no lado esquerdo do entalhe.
  - Construção da terceira parte feita no lado oposto ao entalhe.
  - Na quarta parte é feita a construção das paredes do recurso interno. Aqui, é possível definir a quantidade de paredes do recurso interno. Para esse trabalho, utilizou-se duas.

- Na quinta parte, caso esteja programado para o recurso interno ter preenchimento, ele será preenchido durante a deposição das novas camadas. Caso não tenha, serão feitas somente as paredes internas seguidas da construção do topo.
4. **Preenchimento restante e construção do topo com 100% de preenchimento.** Nesta etapa, a impressora preenche com o design básico até a altura especificada e finaliza o topo da peça com 100% de preenchimento.

A FIGURA 34 apresenta essas etapas de fabricação.

FIGURA 34 – ETAPAS DE FABRICAÇÃO DE UMA PEÇA 3D SEM E COM RECURSO INTERNO



FONTE: O autor (2023).

### 3.4 TESTE DE IMPACTO *CHARPY* E ANÁLISE ESTATÍSTICA

A Norma ASTM-D6110 dispõe das regras para a realização dos testes, dessa forma, seguiu-as como descritas. O processo se iniciou por posicionar as peças na máquina utilizando um gabarito. Segundo a norma, para testes de impacto *Charpy*, as

peças são posicionadas de forma que o entalhe fique contrário ao pêndulo. Um pêndulo de 1 Joule foi usado.

A norma ASTM D-6110 recomenda conduzir os testes em uma temperatura de  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $50 \pm 10\%$ , a menos que especificado de outra forma de acordo com o material. Neste estudo, o material utilizado foi o PLA. A temperatura em que os testes foram conduzidos foi de  $21^{\circ}\text{C}$  e a umidade relativa era de 52%.

Neste trabalho foram feitas 3 análises estatísticas. A primeira e a segunda análise foram um delineamento fatorial completo de dois fatores com dois níveis. E a terceira foi um delineamento fatorial completo de dois fatores com três níveis. Todas essas análises foram feitas utilizando o *software* Minitab 2017.

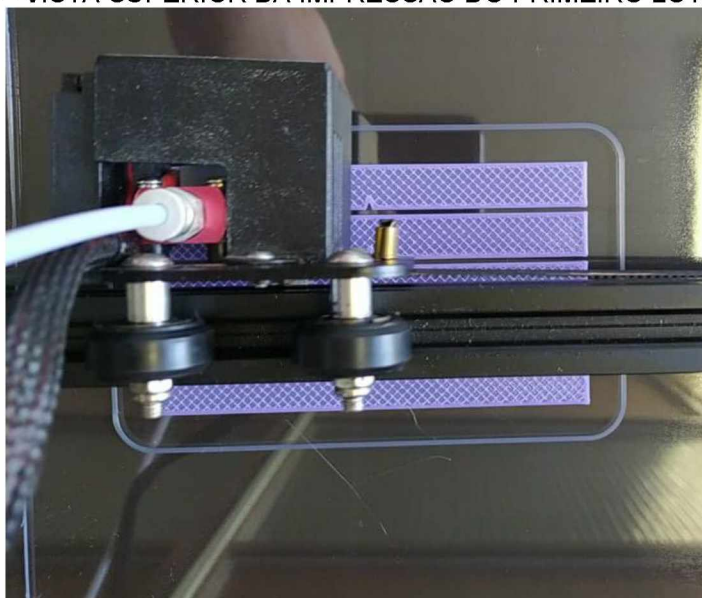
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo está organizado em blocos de discussão iniciando com as impressões, seguido pelos dados de impressão, após a análise das peças, por conseguinte os resultados dos ensaios de impacto e, por fim, a sequência de eventos de fratura das peças.

### 4.1 IMPRESSÕES

Com todos os parâmetros definidos, foi feito o fatiamento do sólido 3D dentro do próprio CURA e salvo em formato *gcode*; então, foi dado início nas impressões (FIGURA 35).

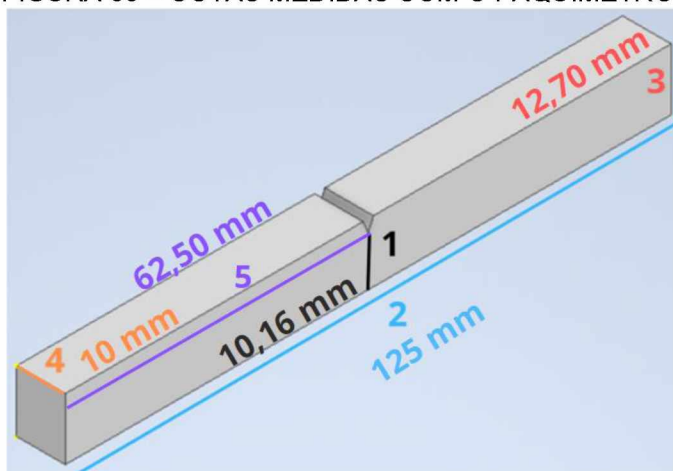
FIGURA 35 – VISTA SUPERIOR DA IMPRESSÃO DO PRIMEIRO LOTE DE PEÇAS



FONTE: O autor (2023).

Após a impressão do primeiro lote, foi selecionada uma peça aleatória para ser enviada a um laboratório de metrologia a fim de realizar medições e garantir maior confiabilidade à pesquisa. Devido às limitações financeiras, essa prática não foi realizada para todas as peças de todos os lotes. Contudo, foram realizadas as medições das cotas que eram possíveis de serem verificadas internamente. A FIGURA 36 mostra as cotas medidas com o paquímetro.

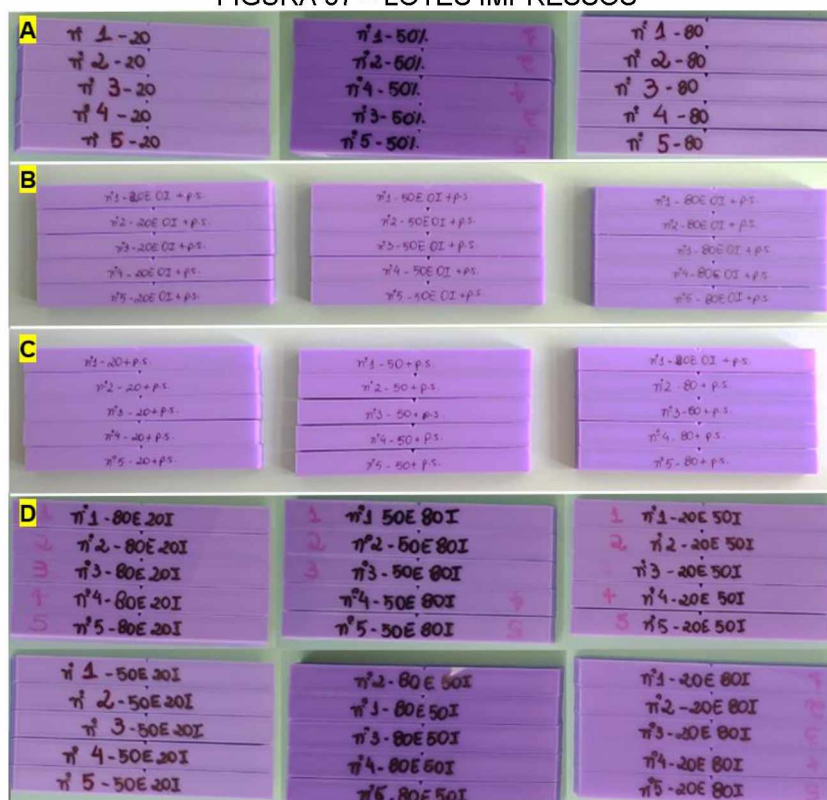
FIGURA 36 – COTAS MEDIDAS COM O PAQUÍMETROS



FONTE: O autor (2023).

Os demais lotes foram impressos um em cada dia da semana, sempre respeitando um período de pelo menos 9 horas entre uma impressão e outra para que não sobrecarregasse a máquina. No total foram impressas 75 peças. A FIGURA 37 (A) apresenta os lotes com porcentagens puras (20E, 50E, 80E). A FIGURA 37 (B) se trata dos lotes com 0% de preenchimento interno (20E 0I, 50E 0I, 80E 0I). A FIGURA 37 (C) apresenta os lotes com 20%, 50% e 80% com recurso interno de mesma porcentagem de preenchimento externo (20E 20I, 50E 50I, 80E 80I). Por último, a FIGURA 37 (D) traz os lotes com as combinações de 20%, 50% e 80% (20E 50I, 20E 80I, 50E 20I, 50E 80I, 80E, 20I, 80E 50I).

FIGURA 37 – LOTES IMPRESSOS



FONTE: O autor (2023).

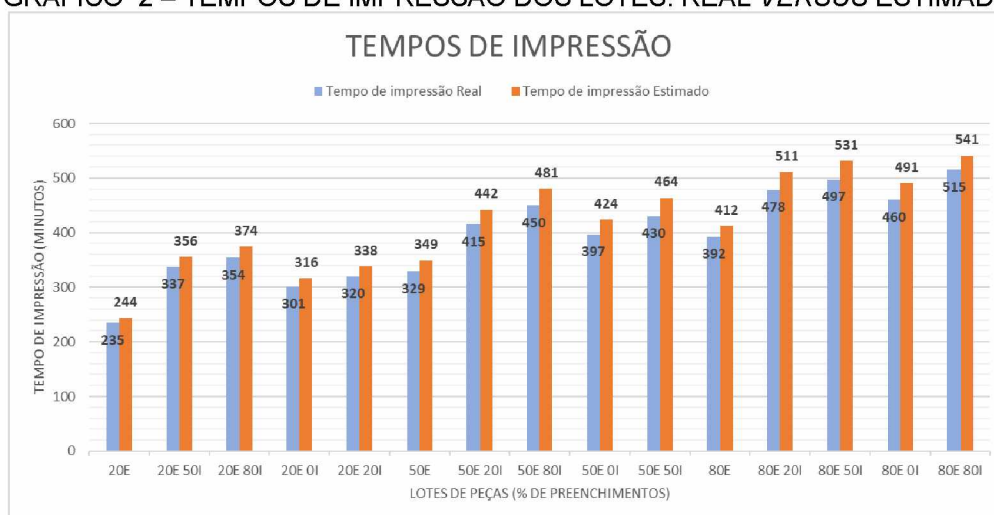
O entalhe das peças foi feito diretamente na impressora 3D e não usinado, pois além de ser mais prático e reduzir desperdícios, como se trata de uma peça que não é 100% preenchida, ao usiná-la corre-se o risco da parte de dentro ficar exposta. Isso, conseqüentemente, poderia afetar os resultados nos testes.

## 4.2 DADOS DA IMPRESSÃO

### 4.2.1 Tempos de impressão

O tempo de impressão de cada peça depende diretamente de uma série de fatores tais como: o tipo de preenchimento, isto é, a geometria; a porcentagem de preenchimento utilizada e a velocidade de deposição de material. Para a impressão total das 75 peças utilizadas nesta pesquisa gastou-se 98,5 horas (5910 minutos). O GRÁFICO 2 apresenta como se deu a distribuição real dos tempos de impressão de cada lote *versus* a distribuição estimada de tempo, fornecida pelo CURA.

GRÁFICO 2 – TEMPOS DE IMPRESSÃO DOS LOTES: REAL VERSUS ESTIMADO

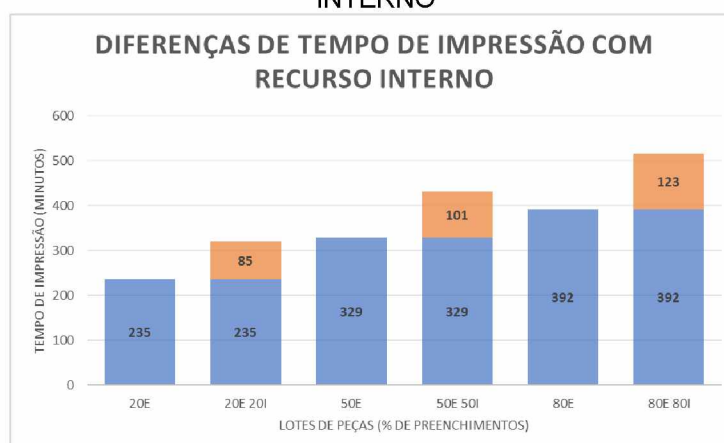


FONTE: O autor (2023).

Pode-se perceber que a impressão mais rápida foi a do lote de menor percentagem de preenchimento puro, 20E, com 235 minutos, aproximadamente 3 h 55 min. O que obteve o maior tempo de impressão foi o de 80E 80I, com 515 minutos, aproximadamente 8 h 35 min.

Um aspecto importante a ser considerado no aumento do tempo de impressão foi a inserção do recurso interno. Isso se aplicou tanto para os lotes em que variaram a percentagem de preenchimento interno, como para aqueles que possuíam a mesma percentagem de preenchimento interna e externa. O GRÁFICO 3 apresenta uma relação da diferença de tempo de impressão das peças feitas com preenchimentos puros, e peças feitas com recurso interno de mesma percentagem de preenchimento externo.

GRÁFICO 3 – COMPARAÇÃO DE TEMPOS DE IMPRESSÃO DE PEÇAS COM E SEM RECURSO INTERNO

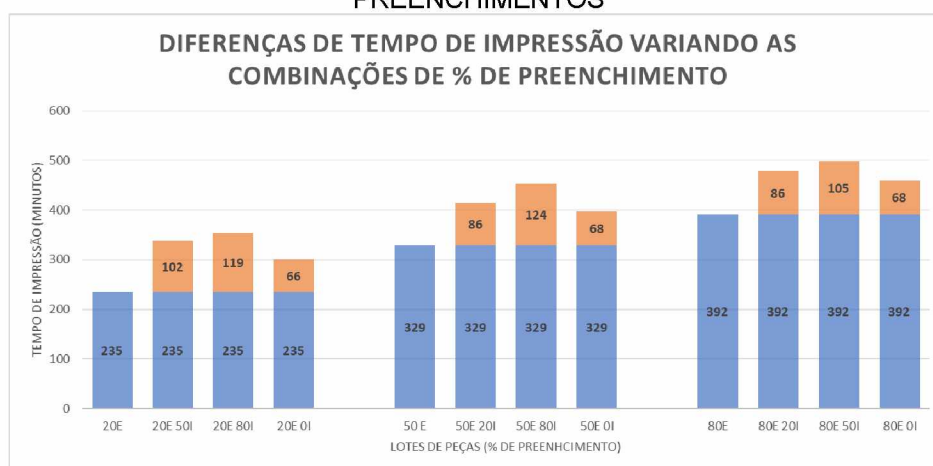


FONTE: O autor (2023).

Como mostrado pelo GRÁFICO 3, com a inserção do recurso interno o lote 20E 20I obteve um aumento 85 minutos, aproximadamente 36,1%, comparado com o lote 20E. O lote 50E 50I aumentou 101 minutos, aproximadamente 30,6%, em relação ao lote 50E. E o lote 80E 80I atingiu um aumento de 123 minutos, aproximadamente 31,3%, comparado ao lote 80E.

Em se tratando das diferenças de tempo de impressão variando as combinações de porcentagem de preenchimento, essas estão apresentadas no GRÁFICO 4.

GRÁFICO 4 – DIFERENÇAS DE TEMPO DE IMPRESSÃO NAS COMBINAÇÕES DE PREENCHIMENTOS



FONTE: O autor (2023).

Em todos os casos foi possível observar que, embora o recurso interno demande mais tempo para ser construído, combinações de porcentagens de preenchimentos menores conseguem um tempo menor de impressão. Como exemplo, os lotes com 0% de preenchimento interno (20E 0I; 50E 0I; e 80E 0I) conseguiram menores tempos de impressão quando comparados com os outros que variaram o preenchimento interno.

O mesmo acontece com os lotes 50E 20I e 80E 20I, quando comparados com preenchimento interno maiores como 50E 80I e 80E 50I. Também, a variação dos tempos de impressão das peças sem preenchimento no recurso interno foi praticamente igual para as 3 porcentagens externas (puras).

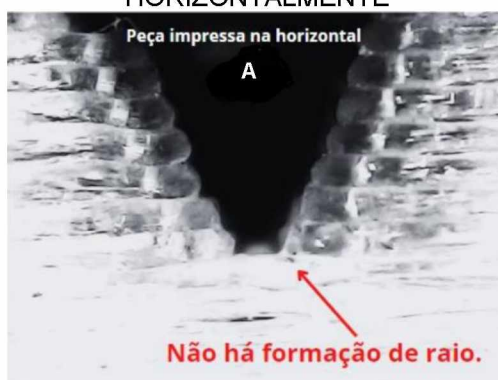
### 4.3 ANÁLISE DAS PEÇAS

#### 4.3.1 Influência da orientação de impressão no entalhe das peças

Um dos primeiros desafios encontrados no desenvolvimento desta pesquisa foi que as impressões não estavam obedecendo as medidas fornecidas pela norma regulamentadora.

O raio do entalhe não estava sendo produzido corretamente e o ângulo estava maior que o permitido, o que, conseqüentemente, impedia a realização dos testes. Isso porque, inicialmente, as peças estavam sendo impressas na horizontal de forma que o entalhe ficasse para cima. A FIGURA 38 mostra essa situação de forma aproximada.

FIGURA 38 – FOTO APROXIMADA DO ENTALHE DE UMA PEÇA IMPRESSA HORIZONTALMENTE



FONTE: O autor (2023).

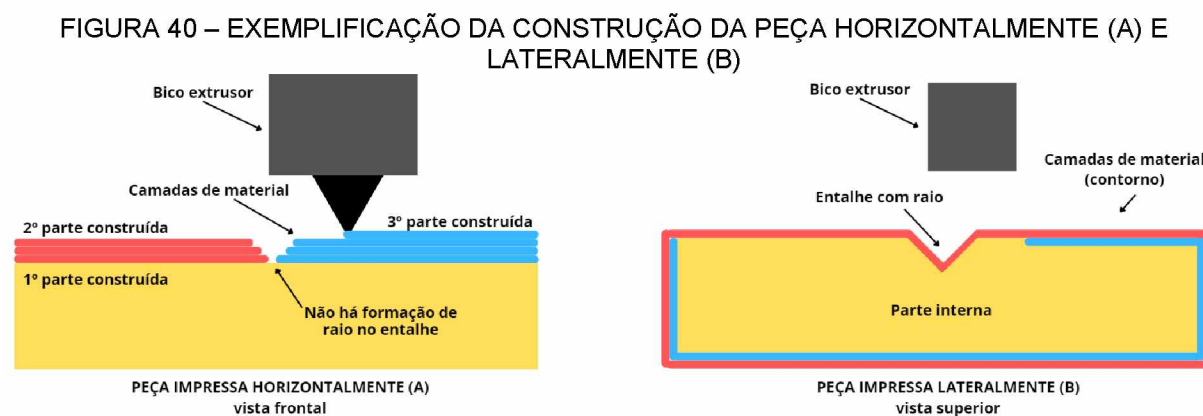
Após deliberar sobre o funcionamento da impressora, decidiu-se imprimir as peças na lateral e fazer as medições, vide FIGURA 39.

FIGURA 39 – FOTO APROXIMADA DO ENTALHE DE UMA PEÇA IMPRESSA LATERALMENTE



FONTE: O autor (2023).

Essa imprecisão dimensional da peça impressa horizontalmente, se dá pelo fato de a impressora primeiro construir a 1ª parte (um bloco de material até altura em que se inicia o entalhe) e, após, imprimir a 2ª parte (superior direita) seguida da 3ª e última parte (superior esquerda), como demonstrado pela FIGURA 40 (A).



FONTE: O autor (2023).

Nesse modo de impressão não há formação de raio pois a curvatura necessária não é produzida. Em outras palavras, a parte de baixo permanece reta impossibilitando sua medição. Além disso, há o fator de desvio dimensional da própria impressora na fabricação do entalhe.

Com as peças do lote impresso lateralmente – FIGURA 40 (B), como as camadas são depositadas já formando o entalhe da peça na mesa de impressão, tanto a angulação quanto o raio do entalhe são mais precisos, pois não sofrem muito com o desvio dimensional no eixo Z. Esses resultados foram publicados no Congresso Técnico-Científico da Engenharia e da Agronomia de 2022<sup>3</sup>.

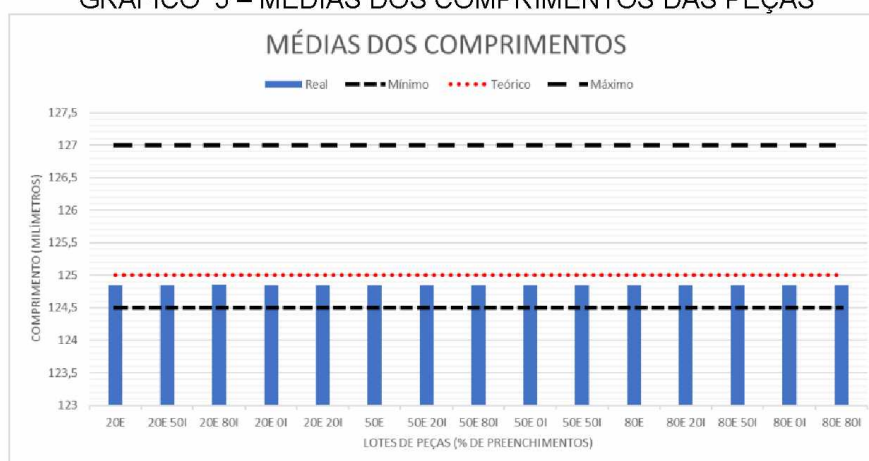
#### 4.3.2 Medidas externas das peças

Para que os resultados dos testes sejam confiáveis, é necessário que as medidas das peças estejam dentro do permitido pela norma utilizada. Neste trabalho, as medidas do comprimento, espessura, altura e seção transversal foram feitas por meio de um paquímetro.

<sup>3</sup> SILVA, R.J.O.; DROZDA, F.O.; e CHIXARO, D.S. **Precisão dimensional de corpos de prova impressos em 3D para testes de impacto IZOD**. Anais do CONTECC. 2022. Disponível para acesso em: < <https://www.confeca.org.br/eventos/contecc/contecc-2022/experiencia-profissional>>

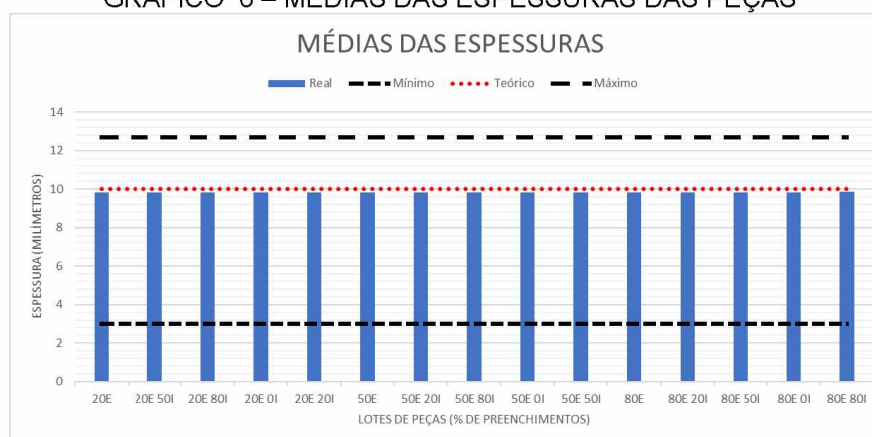
Devido à falta de equipamentos internos e recursos financeiros, somente uma peça foi enviada a um laboratório de metrologia para fazer as medições do ângulo e raio do entalhe. A seguir, o GRÁFICO 5, GRÁFICO 6, GRÁFICO 7, GRÁFICO 8 e GRÁFICO 9 comparam as médias reais dos comprimentos, das espessuras, das alturas e das seções transversais das peças. As barras em azul representam os valores reais obtidos nas medições. Mínimo é o menor valor possível permitido pela norma. Teórico é o valor projeto no CAD. Máximo é o maior valor possível permitido pela norma.

GRÁFICO 5 – MÉDIAS DOS COMPRIMENTOS DAS PEÇAS



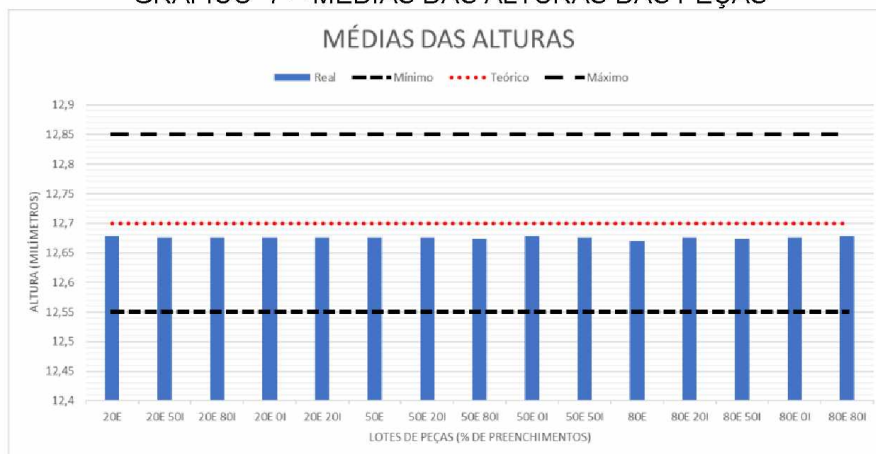
FONTE: O autor (2023).

GRÁFICO 6 – MÉDIAS DAS ESPESSURAS DAS PEÇAS



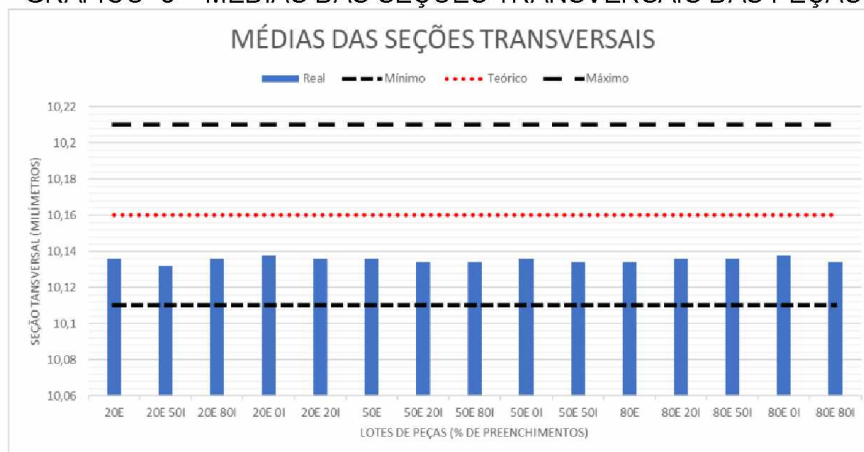
FONTE: O autor (2023).

GRÁFICO 7 – MÉDIAS DAS ALTURAS DAS PEÇAS



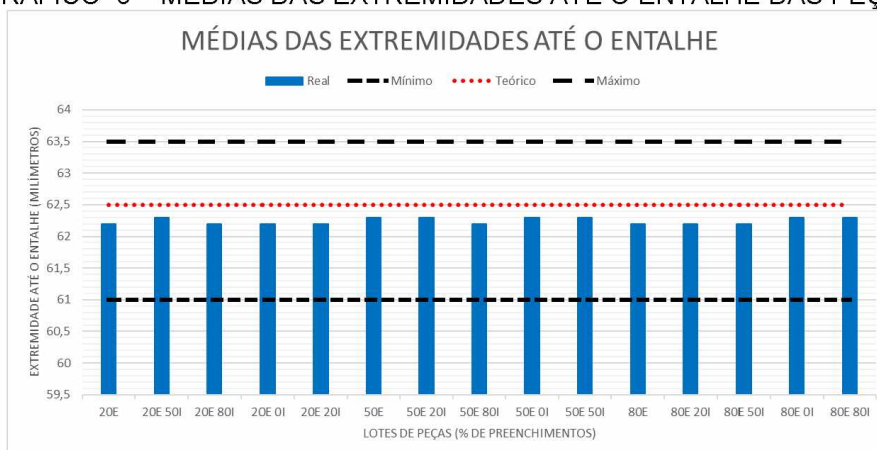
FONTE: O autor (2023).

GRÁFICO 8 – MÉDIAS DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DAS PEÇAS



FONTE: O autor (2023).

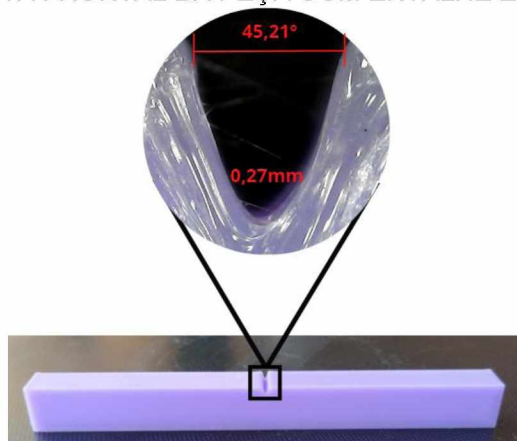
GRÁFICO 9 – MÉDIAS DAS EXTREMIDADES ATÉ O ENTALHE DAS PEÇAS



FONTE: O autor (2023).

Como é possível observar pelos Gráficos, todas as medições ficaram dentro do permitido pela norma. Adicionalmente, a FIGURA 41 apresenta o entalhe de uma das peças e suas medidas.

FIGURA 41 – VISTA FRONTAL DA PEÇA COM ENTALHE E SUAS MEDIÇÕES



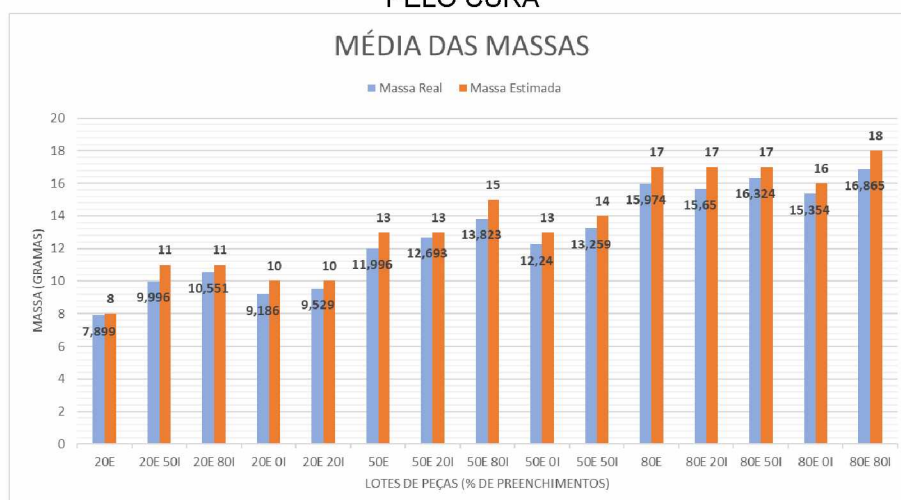
FONTE: O autor (2023).

Os valores nominais do entalhe eram ângulo de 45°, podendo ter uma variação entre 44° e 46°, e raio de 0,25 mm, podendo ter uma variação entre 0,20 mm e 0,30 mm.

#### 4.3.3 Massas das peças

O GRÁFICO 10 mostra o comparativo entre a massa real das peças e a massa estimada pelo CURA.

GRÁFICO 10 – COMPARATIVO ENTRE MASSA REAL DAS PEÇAS *VERSUS* MASSA ESTIMADA PELO CURA



FONTE: O autor (2023).

Com o Gráfico, é possível observar a influência do recurso interno no peso das peças. Observa-se que no lote 20E, sem paredes internas, o peso real foi de 7,899 g. Ao acrescentar o recurso interno, lote 20E 20I, o valor passou para 9,529 g, uma diferença de 1,630 g ou aproximadamente 20,6%.

Um aumento similar é visto nos outros lotes, como no de 50E cujo peso é de 11,996 g e o 50E 50I de peso 13,259 g, diferença de 1,263 g, aumento aproximado de 10,5%. E, por fim, no de 80E de peso 15,974 g aumentou para 16,865 g no lote 80E 80I; uma diferença de 0,891 g ou aproximadamente 5,5%.

Nos demais casos, além da influência do recurso interno, também há as variações de porcentagens de preenchimento no recurso interno.

A partir das massas das peças, calculou-se as porcentagens reais de massa de cada lote. Para isso, simulou-se no CURA uma peça com somente as paredes externas, sem preenchimento interno (0E – FIGURA 42); e uma com somente as paredes internas e externas, também sem preenchimento (0E 0I – FIGURA 43).

FIGURA 42 – SIMULAÇÃO DE PEÇA COM SOMENTE A PAREDE EXTERNA (0E)



FONTE: O autor (2023).

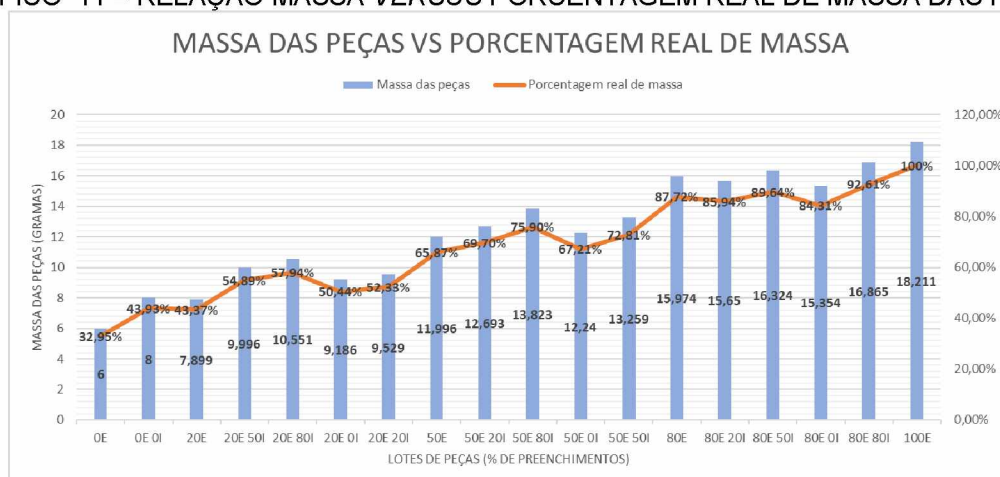
FIGURA 43 – SIMULAÇÃO DE PEÇA COM PAREDE EXTERNA E INTERNA (0E 0I)



FONTE: O autor (2023).

Essas peças foram simuladas pois, devido não terem preenchimento interno, suas impressões ficariam muito defeituosas, se chegassem a serem completadas. Ainda, foi impressa uma peça com 100% de preenchimento para fazer as comparações. Essas informações encontram-se detalhadas no GRÁFICO 11.

GRÁFICO 11 – RELAÇÃO MASSA VERSUS PORCENTAGEM REAL DE MASSA DAS PEÇAS



FONTE: O autor (2023).

O primeiro fato a se analisar é que, mesmo com 0% de preenchimento (0E), a porcentagem real de massa equivale a 32,95% do total. Ao inserir as paredes internas (0E 0I), esse valor passa a ser 43,93%.

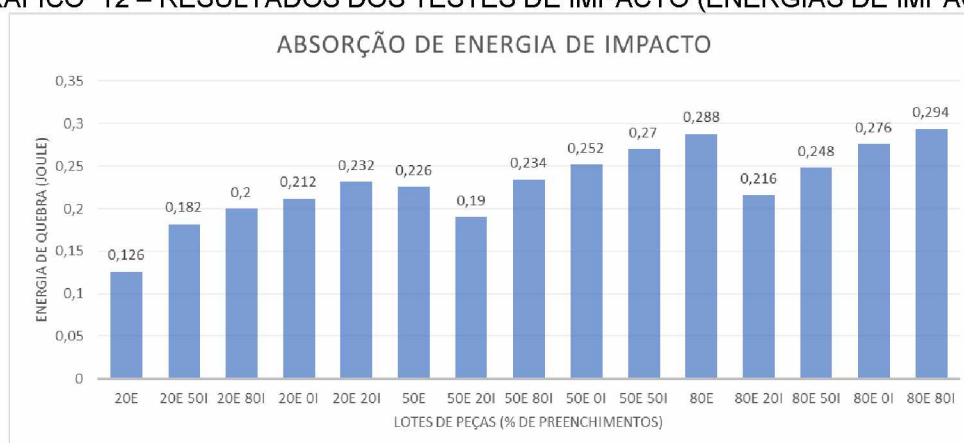
A partir deste Gráfico, também é possível analisar as porcentagens reais das combinações. Dessa forma, pode-se concluir que, por exemplo, uma peça com 20% de preenchimento não necessariamente tem 20% de massa, pois esse valor diz respeito somente a massa interna de preenchimento, não considerando as paredes da peça.

#### 4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO

Nesta parte, são apresentados os resultados obtidos nos testes de impacto *Charpy* orientados pela norma ASTM 6110-10. Todos os resultados são baseados na unidade *Joule* (J) de medida.

Após os testes *Charpy*, os resultados foram catalogados e feitos as médias de cada lote. Elas encontram-se demonstradas no GRÁFICO 12.

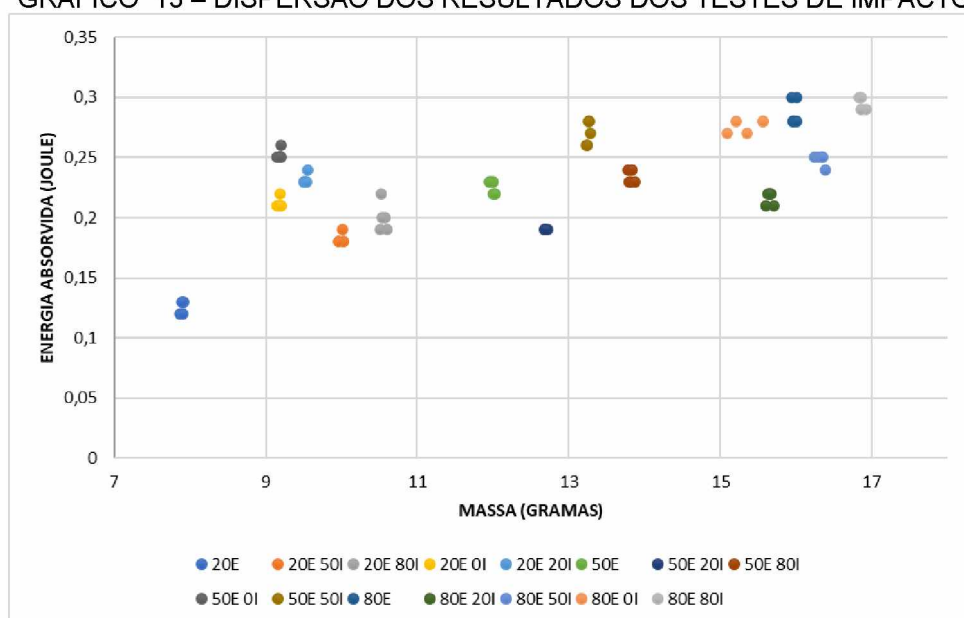
GRÁFICO 12 – RESULTADOS DOS TESTES DE IMPACTO (ENERGIAS DE IMPACTO)



FONTE: O autor (2023).

O GRÁFICO 13 apresenta a dispersão de todos os resultados.

GRÁFICO 13 – DISPERSÃO DOS RESULTADOS DOS TESTES DE IMPACTO



FONTE: O autor (2023).

O lote que teve a maior absorção de energia de impacto foi o 80E 80I, com 0,294 J. Se comparado com o de 80E, 0,288 J, o aumento aproximado foi de somente 2%. Analisando o lote de peças sem o preenchimento interno, 80E 0I com 0,276 J, houve um decréscimo aproximado de 4,1% em relação do lote 80E.

Com os lotes de porcentagem intermediária, o que teve a maior absorção de energia de impacto foi o 50E 50I com 0,270 J. Em relação ao de 50E com 0,226 J, o aumento foi de 19,4% aproximadamente. Já com o lote sem o preenchimento interno, 50E 0I com 0,252 J, houve um aumento de 11,5%.

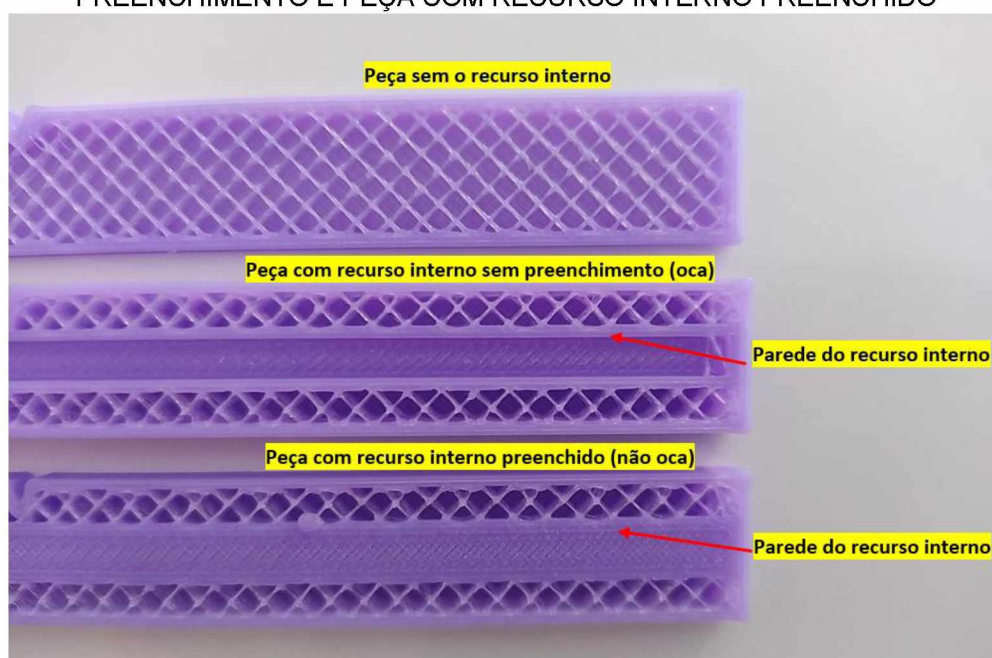
Por fim, o lote de 20E 20I obteve 0,232 J e seu aumento em relação ao lote 20E com 0,126 J foi de 84,1%. Já o lote 20E 0I com 0,212 J obteve um aumento de 68,2%, comparado com o de 20E.

A análise e o tratamento estatístico detalhado bem como as explicações para esses resultados encontram-se nas próximas seções.

#### 4.4.1 Análises estatísticas

Para facilitar a nomenclatura na realização das análises estatísticas, adotou-se o termo “ocas” para se referir as peças sem o preenchimento do recurso interno. A FIGURA 44 apresenta os 3 tipos de peças utilizadas nas análises e suas respectivas nomenclaturas.

FIGURA 44 – PEÇA SEM RECURSO INTERNO, PEÇA COM RECURSO INTERNO SEM PREENCHIMENTO E PEÇA COM RECURSO INTERNO PREENCHIDO



FONTE: O autor (2023).

Nesta primeira parte foi feito um experimento fatorial completo com dois fatores, A e B (sendo A preenchimento e B oco), dois níveis para cada fator (A com 20% e 80%; B com 0 para não oco e 1 para oco) e cinco amostras. Nesta etapa, todas as peças possuem recurso interno com e sem preenchimento. Ainda, na análise há a avaliação dos efeitos de interação entre os fatores e curvatura. Além disso, também foram incluídos os pontos centrais, sendo este o preenchimento com 50%.

Os resultados da ANOVA são apresentados na TABELA 5. Com eles, pode-se inferir que o fato de o recurso interno ter ou não preenchimento são fatores significativos para a medida da energia de impacto ( $p = 0,000$ ). Por fim, também se observa que não há indícios de interação entre o preenchimento e o recurso interno da peça ser oco ou não ( $p = 0,710$ ). A porcentagem de contribuição do fator preenchimento é de 83,66% e do fator oco é de 11,01%.

TABELA 5 – ANOVA ENERGIA DE IMPACTO – PREENCHIMENTO E OCO

FV	GL	SQ	Valor F	Valor-p
Preenchimento	1	0,019845	562,71	0,000
Oco	1	0,002613	74,10	0,000
Interação	1	0,000005	0,14	0,710
Curvatura	1	0,000375	10,63	0,003
Erro	21	0,000882		
Total	29	0,023720		

FONTE: O autor (2023).

A partir disso, apurou-se que o modelo de regressão configura 96,28% do processo (3).

$$P = \frac{SQ_A + SQ_B + SQ_{AB} + SQ_{curvatura}}{SQ_{TOTAL}} * 100 \quad (1)$$

$$P = \frac{0,022838}{0,023720} * 100 \quad (2)$$

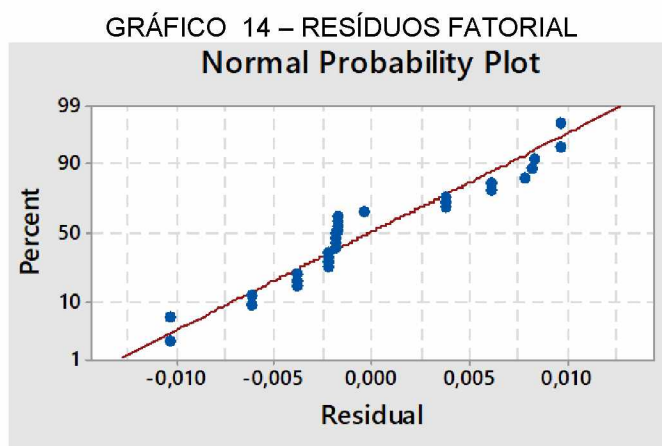
$$P = 96,28 \quad (3)$$

A equação do modelo é dada por (4), onde  $\hat{E}$  é o valor estimado para a energia de impacto,  $P$  é o percentual de preenchimento,  $O$  é o fator oco (0 para não oco e 1 para oco) e  $C$  é o ponto central.

$$\hat{E} = 0,20100 + 0,001050 P - 0,01017 O + 0,000017 P * O + 0,00750 C \quad (4)$$

Baseado na distribuição do gráfico de probabilidade normal (GRÁFICO 14) a qual é aproximadamente uma reta, pode-se inferir que os resíduos são possivelmente

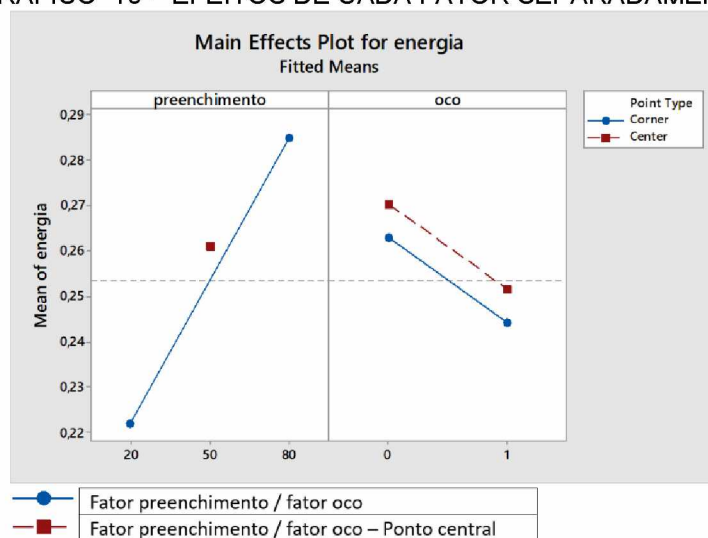
normalmente distribuídos. Desse modo, considera-se que o teste paramétrico da ANOVA foi suficiente para os resultados.



FONTE: O autor (2023).

Ao analisar os efeitos de cada fator separadamente, GRÁFICO 15, tem-se os resultados coerentes com o esperado. Eles mostram o aumento da energia de impacto conforme o aumento da porcentagem de preenchimento tanto das peças com recurso interno preenchidos quanto das ocas. No fator oco, os resultados também estão dentro do esperado, pois a peça oca (1) dever ser mais fácil de quebrar que a peça não oca (0).

GRÁFICO 15 – EFEITOS DE CADA FATOR SEPARADAMENTE

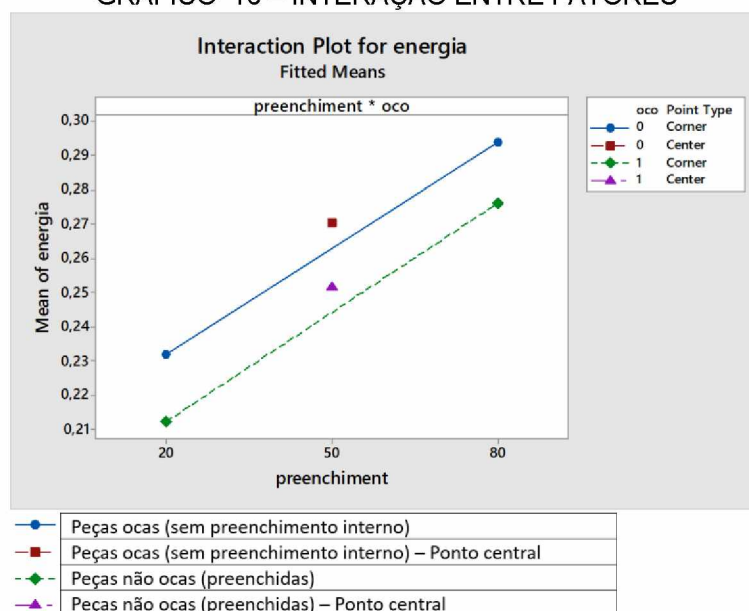


FONTE: O autor (2023).

Resultados da primeira análise: essa avaliação foi feita para saber se o fato de as peças serem ocas ou não faria diferença na energia de impacto. Destaca-se que todas as peças possuem recurso interno. Segundo os resultados tem-se que:

1. Ambos os fatores, preenchimento e oco, fazem diferença nos resultados. Entretanto, como mostrado pelas porcentagens de contribuição, o fator preenchimento é o que possui maior contribuição para o modelo. Na Figura acima foi possível confirmar o aumento que era esperado para cada nível de cada fator.
2. A curvatura afeta a medida com um percentual de contribuição baixo (1,58%). Por essa razão, optou-se por manter o percentual de preenchimento de 50% nas demais análises.
3. A interação não afeta a energia de impacto. Isso se resume no GRÁFICO 16. À medida que o preenchimento aumenta, tanto na peça oca quanto na não oca, a energia também aumenta, conforme esperado.

GRÁFICO 16 – INTERAÇÃO ENTRE FATORES



FONTE: O autor (2023).

Assim como feito anteriormente, para facilitar a nomenclatura na realização das análises, o fator “parede” foi designado para se referir as paredes do recurso interno.

Após esse primeiro resultado, questionou-se sobre o efeito das paredes do recurso interno sobre o resultado da energia de impacto. Um novo experimento foi realizado para analisar se esse fator possui contribuição no modelo, sendo que todas as peças possuem preenchimento interno. Novamente, tem-se um experimento fatorial completo com dois fatores (preenchimento A e parede B), dois níveis para cada

fator (A com 20% e 80%, B com 0 sem parede e 1 com parede), cinco amostras e ponto central como sendo o preenchimento de 50%.

Os resultados da ANOVA são apresentados na TABELA 6. Baseado neles, pode-se verificar que o preenchimento da peça e a parede são fatores significativos para a medida da energia de impacto ( $p = 0,000$ ). Ademais, existe efeito da interação entre o preenchimento e o interior da peça ter parede do recurso interno ou não ( $p = 0,000$ ). O mesmo para a curvatura. Nesta análise o percentual de contribuição do fator preenchimento é de 63,87% e o do fator parede é de 20,65%.

TABELA 6 – ANOVA ENERGIA DE IMPACTO – PREENCHIMENTO E PAREDE

FV	GL	SQ	Valor F	Valor-p
<b>Preenchimento</b>	1	0,062720	1005,13	0,000
<b>Parede</b>	1	0,020280	325,00	0,000
<b>Interação</b>	1	0,012500	200,32	0,000
<b>Curvatura</b>	1	0,001127	18,06	0,000
<b>Erro</b>	21	0,001560		
<b>Total</b>	29	0,098187		

FONTE: O autor (2023).

A partir disso, apurou-se que o modelo de regressão configura 98,41% do processo (7).

$$P = \frac{SQ_A + SQ_B + SQ_{AB} + SQ_{curvatura}}{SQ_{TOTAL}} * 100 \quad (5)$$

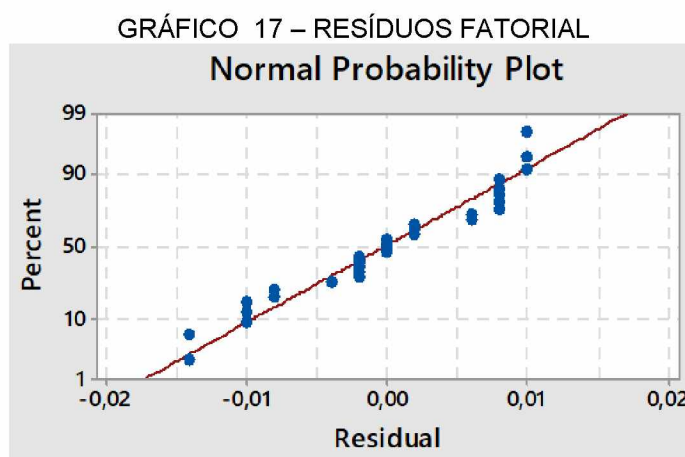
$$P = \frac{0,096627}{0,098187} * 100 \quad (6)$$

$$P = 98,41 \quad (7)$$

A equação do modelo é dada por (8), onde  $\hat{E}$  é o valor estimado pelo modelo para a energia de impacto,  $P$  é a porcentagem de preenchimento,  $O$  é o fator parede (0 sem parede do recurso interno e 1 com parede) e  $C$  é o ponto central.

$$\hat{E} = 0,14167 + 0,001867 P + 0,06767 O - 0,000833 P * O + 0,01300 C \quad (8)$$

Baseado na distribuição do gráfico de probabilidade normal (GRÁFICO 17), a qual é aproximadamente uma reta, pode-se inferir que os resíduos são possivelmente normalmente distribuídos. Novamente, considera-se que o teste paramétrico da ANOVA foi suficiente para os resultados.

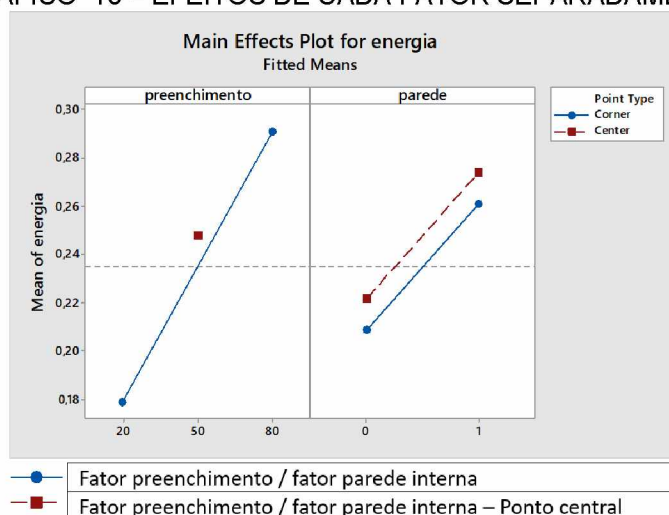


FONTE: O autor (2023).

O GRÁFICO 18 apresenta os efeitos de cada fator isoladamente. Ao observá-la, percebe-se que está coerente com o previsto, visto que mostra o aumento da energia de impacto de acordo com o aumento do preenchimento, ambos para as peças com e sem parede interna.

Tratando-se do fator parede interna, os resultados ficaram dentro do esperado, pois as peças com as paredes do recurso interno (1) devem ser mais difíceis de quebrar se comparadas com peças sem elas (0).

GRÁFICO 18 – EFEITOS DE CADA FATOR SEPARADAMENTE

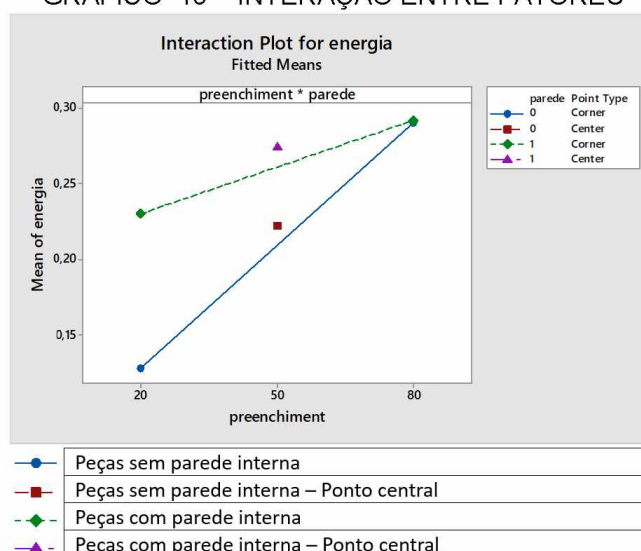


FONTE: O autor (2023).

Resultados da segunda análise: nessa avaliação, o objetivo foi saber se o fato de as peças terem paredes do recurso interno ou não, faria diferença na energia de impacto. Nessa análise, todas as peças possuíam preenchimento tanto externo quanto interno. Segundo os resultados observou-se que:

4. O preenchimento é um fator que importa na energia de impacto. Haver parede do recurso interno ou não também faz diferença nas medidas. Desse modo, pensar sobre o questionamento sobre o efeito das paredes, é coerente. De fato, a parede do recurso interno influencia na energia de impacto. Sua influência é de aumentá-la. Devido a isso, pode-se questionar a análise anterior, sobre o preenchimento interno, e avaliar se de fato a peça ser oca não causa influência nas medidas. Para responder esse questionamento foi conduzido o próximo experimento, com as combinações de preenchimentos mistas.
5. A interação afeta a medida da energia de impacto. Essa interação indica que o preenchimento combinado com as paredes modifica o resultado. Variações de tipos de preenchimento e tipos/ espessuras de parede terão resultados diferentes. No GRÁFICO 19 tem-se que a variação da energia nas peças com parede do recurso interno é menor do que a variação da energia das peças sem parede.
6. Referente a interação com o preenchimento de 80%, isso tem como possível explicação a quantidade de preenchimento ser bem próxima de 100%. A diferença de peso e absorção de energia por inserção da parede do recurso interno não se mostra muito notória por justamente ser um preenchimento alto. Em preenchimentos menores, tanto o peso da parede do recurso interno quanto os resultados dos testes assumem valores mais expressivos.

GRÁFICO 19 – INTERAÇÃO ENTRE FATORES



FONTE: O autor (2023).

Em seguida, um novo experimento foi realizado para analisar se os preenchimentos internos e externos possuem contribuição no modelo. Igualmente aos experimentos anteriores, tem-se uma ANOVA com dois fatores (preenchimento interno A e preenchimento externo B), agora com três níveis (20%, 50% e 80% para ambos os fatores) e cinco amostras.

Os resultados da ANOVA são apresentados na TABELA 7. Com eles, pode-se inferir que tanto o preenchimento interno quanto o externo são fatores significativos para a medida da energia de impacto ( $p = 0,000$ ). Além disso, há indício de interação entre eles pelo mesmo motivo.

Como o Valor-p de todos os fatores é significativo, é possível observar a porcentagem de contribuição deles. A porcentagem de contribuição do preenchimento externo é de 30,55%, já a do preenchimento interno é de 12,45%. A da interação é 54,17%. Dado que o percentual de contribuição da interação é maior que o do fator preenchimento interno, os efeitos do preenchimento interno e externo não podem ser analisados individualmente.

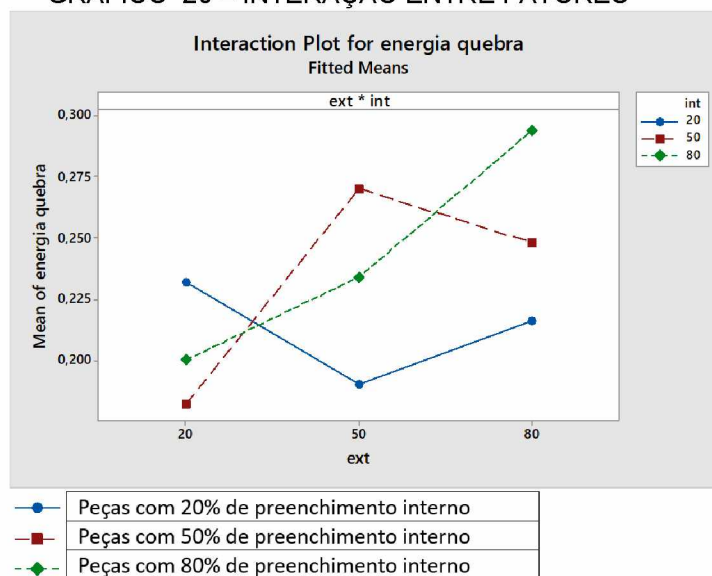
TABELA 7 – ANOVA ENERGIA DE IMPACTO: PREENCHIMENTO EXTERNO E INTERNO

FV	GL	SQ	Valor F	Valor-p
Externo	1	0,017351	195,20	0,000
Interno	1	0,007071	79,55	0,000
Interação	1	0,030769	173,07	0,000
Erro	21	0,001600		
Total	29	0,056791		

FONTE: O autor (2023).

Tomando como base o que foi descrito por Montgomery (2009, p. 557) de que “quando uma interação é grande, os efeitos principais correspondentes têm pouco significado”; não foi possível interpretar individualmente os efeitos desses fatores. O GRÁFICO 20 ilustra essa situação.

GRÁFICO 20 – INTERAÇÃO ENTRE FATORES



FONTE: O autor (2023).

Resultado da terceira análise: o objetivo aqui foi analisar se os preenchimentos internos e externos possuem contribuição no modelo. No entanto, esta última análise se torna inconclusiva devido a interação entre os fatores ser muito elevada. Além disso, devido à falta de tempo hábil para a impressão e realização de novos testes, esta análise não foi repetida.

#### 4.4.2 Ganhos em relação às combinações

Após a conclusão das análises, foi elaborada a TABELA 8, que apresenta as porcentagens de ganho em relação às combinações cujos resultados foram conclusivos nas análises estatísticas.

TABELA 8 – PORCENTAGENS DE GANHO DE MASSA, TEMPO DE IMPRESSÃO E ENERGIA ABSORVIDA EM RELAÇÃO ÀS COMBINAÇÕES

Lote	Massa (g)	Tempo de impressão (min)	Energia absorvida (J)
20E	7,899	235	0,126
20E 0I	9,186	301	0,212
<b>Ganho</b>	<b>16,2%</b>	<b>28%</b>	<b>68,2%</b>
20E 20I	9,529	320	0,232
<b>Ganho</b>	<b>20,6%</b>	<b>36,1%</b>	<b>84,1%</b>

Lote	Massa (g)	Tempo de impressão (min)	Energia absorvida (J)
50E	11,996	329	0,226
50E 0I	12,240	397	0,252
<b>Ganho</b>	<b>2%</b>	<b>20,6%</b>	<b>11,5%</b>
50E 50I	13,259	430	0,270
<b>Ganho</b>	<b>10,5%</b>	<b>30,6%</b>	<b>19,4%</b>

Lote	Massa (g)	Tempo de impressão (min)	Energia absorvida (J)
80E	15,974	392	0,288
80E 0I	15,354	460	0,276
<b>Ganho</b>	<b>-3,8%</b>	<b>17,3%</b>	<b>-4,1%</b>
80E 80I	16,865	515	0,294
<b>Ganho</b>	<b>5,5%</b>	<b>31,3%</b>	<b>2%</b>

FONTE: O autor (2023).

No lote 20E 0I, a massa aumentou em 16,2%, o tempo de impressão em 28% e a absorção de energia aumentou em 68,2%. Enquanto no lote 20E 20I, os ganhos foram maiores, com um aumento de 20,6% na massa, 36,1% no tempo de impressão e 84,1% na absorção de energia.

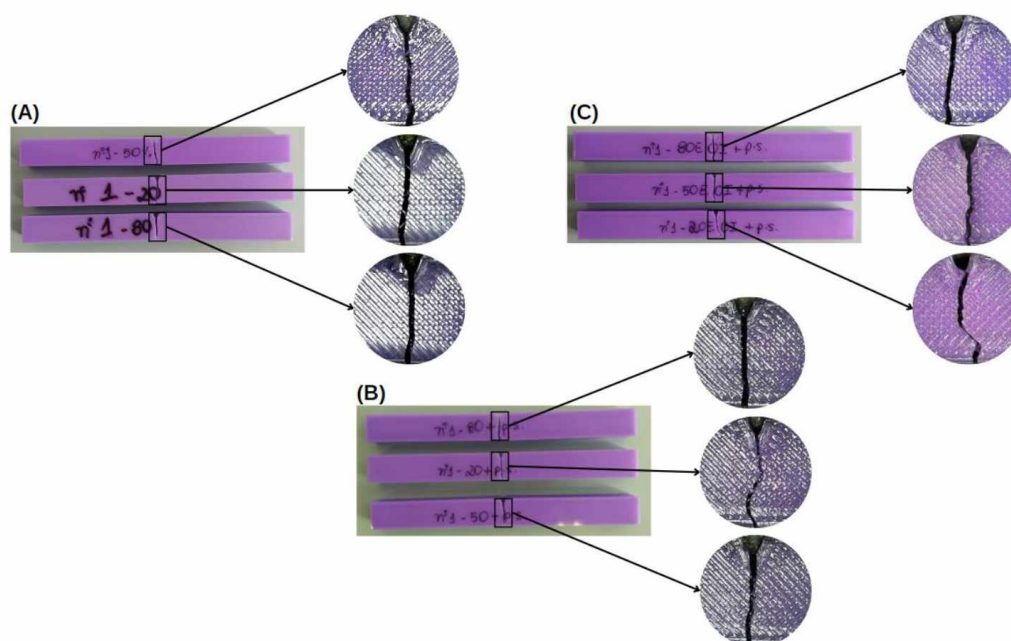
No lote 50E 0I, houve um aumento de 2% na massa, 20,6% no tempo de impressão e de 11,5% na absorção de energia. Já no lote 50E 50I, os ganhos foram de 10,5% na massa, 30,6% no tempo de impressão e de 19,4% na absorção de energia.

No lote 80E 0I, houve uma diminuição de 3,8% na massa e uma diminuição de 4,1% na absorção de energia, mas houve um aumento de 17,3% no tempo de impressão. Ao passo que no lote 80E 80I houve um aumento de 5,5% na massa, 31,3% no tempo de impressão e apenas 2% na absorção de energia.

#### 4.4.3 Micrografias das regiões de fratura

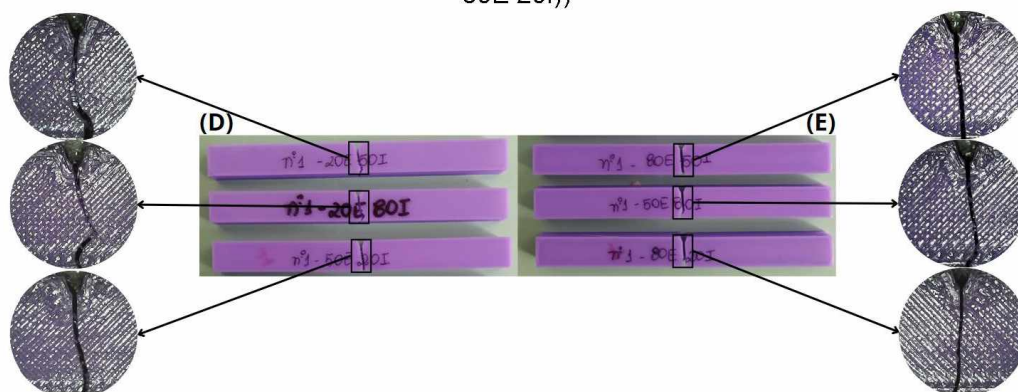
A FIGURA 45 e a FIGURA 46 mostram como ficaram as peças após a realização dos testes.

FIGURA 45 – PEÇAS APÓS TESTE *CHARPY* ((A: 20E, 50E, 80E); (B: 20E 20I, 50E 50I, 80E 80I); (C: 20E 0I, 50E 0I, 80E 0I))



FONTE: O autor (2023).

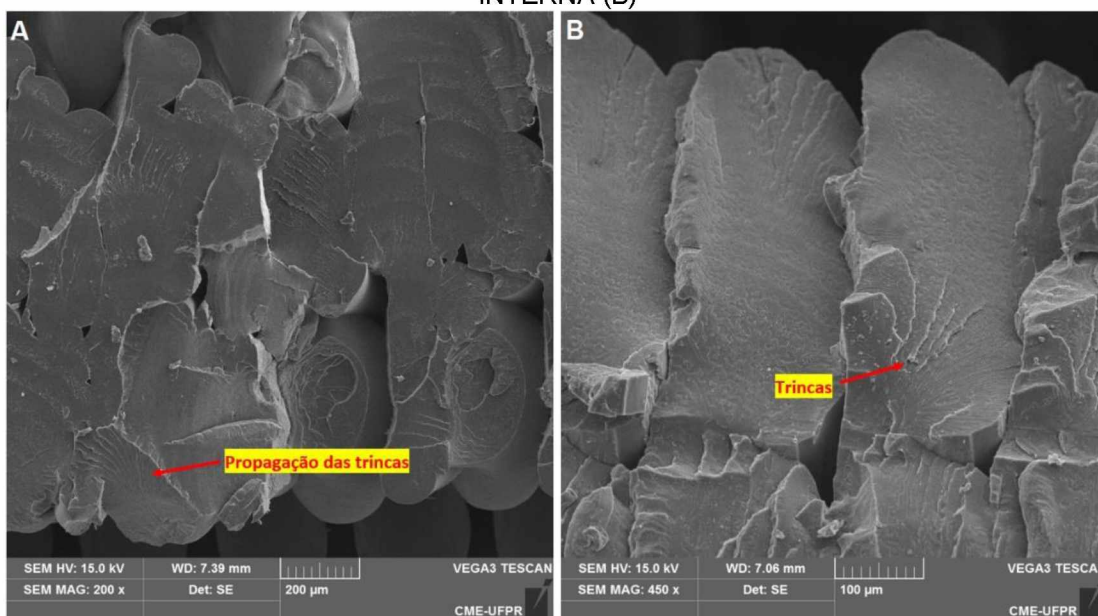
FIGURA 46 – PEÇAS APÓS TESTE *CHARPY* ((D: 20E 50I, 20E 80I, 50E 20I); (E: 80E 50I, 50E 80I, 80E 20I))



FONTE: O autor (2023).

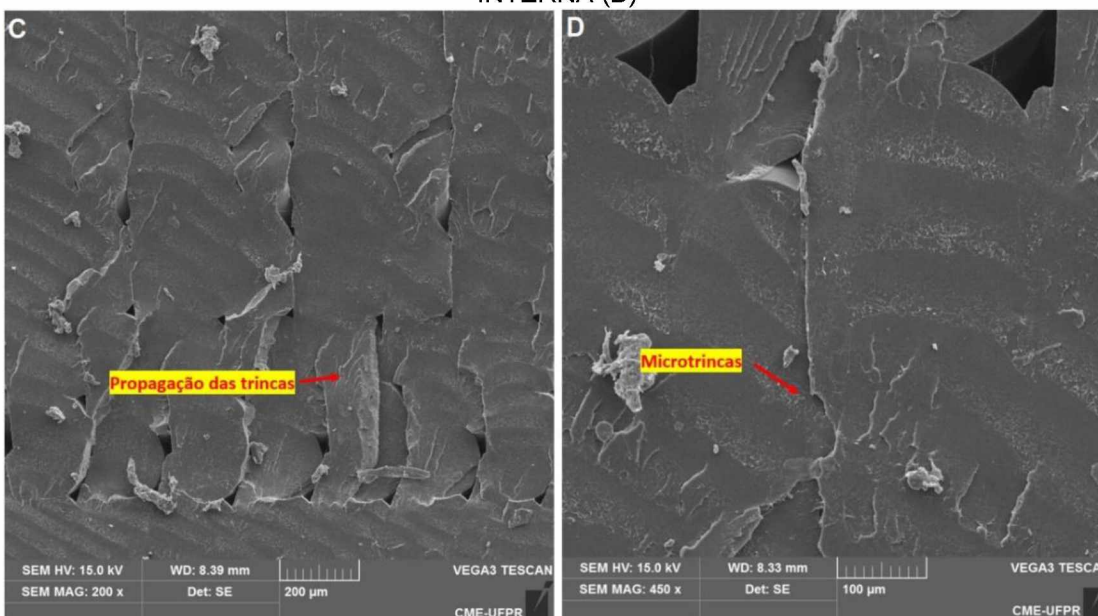
A FIGURA 47, FIGURA 48 e a FIGURA 49 apresentam as micrografias feitas por meio do MEV. Uma peça com 20% de preenchimento externo e 0% interno (20E 0I), uma com 50% de preenchimento externo e 0% interno (50E 0I), e uma com 80% de preenchimento externo e 0% interno (80E 0I) constituíram a análise. Ademais, em cada uma delas foi analisada a parte próxima ao entalhe e a parede do recurso interno.

FIGURA 47 – MICROGRAFIA DA PEÇA 20E 0I PRÓXIMO AO ENTALHE (A) E NA PAREDE INTERNA (B)



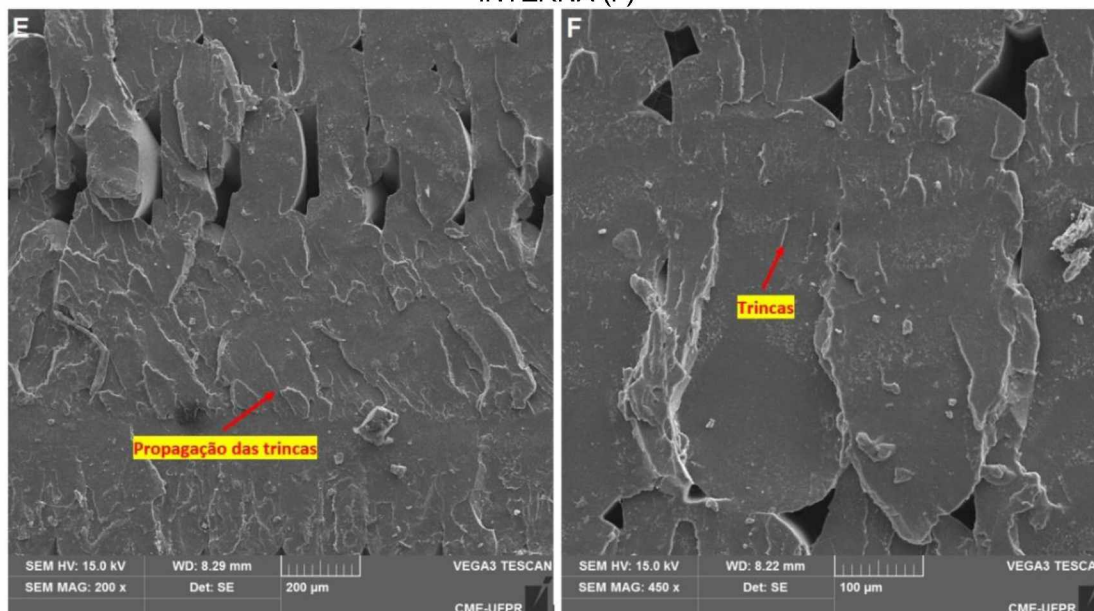
FONTE: O autor (2023).

FIGURA 48 - MICROGRAFIA DA PEÇA 50E 0I PRÓXIMO AO ENTALHE (C) E NA PAREDE INTERNA (D)



FONTE: O autor (2023).

FIGURA 49 - MICROGRAFIA DA PEÇA 80E 01 PRÓXIMO AO ENTALHE (E) E NA PAREDE INTERNA (F)



FONTE: O autor (2023).

Visto a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) do PLA ser entre 57°C e 60°C (AHMED, 2017), o tipo de fratura que ocorreu nas peças foi do tipo frágil.

Nota-se que a peça 20E 01 (A, B) foi a que teve maior concentração de propagação de trincas. Em muitas delas foi possível distinguir o início da trinca, a propagação e a dissipação. Isso provavelmente ocorreu devido a peça testada ser de baixa porcentagem de preenchimento, fazendo com que as tensões se tivessem menos meios para se dissiparem.

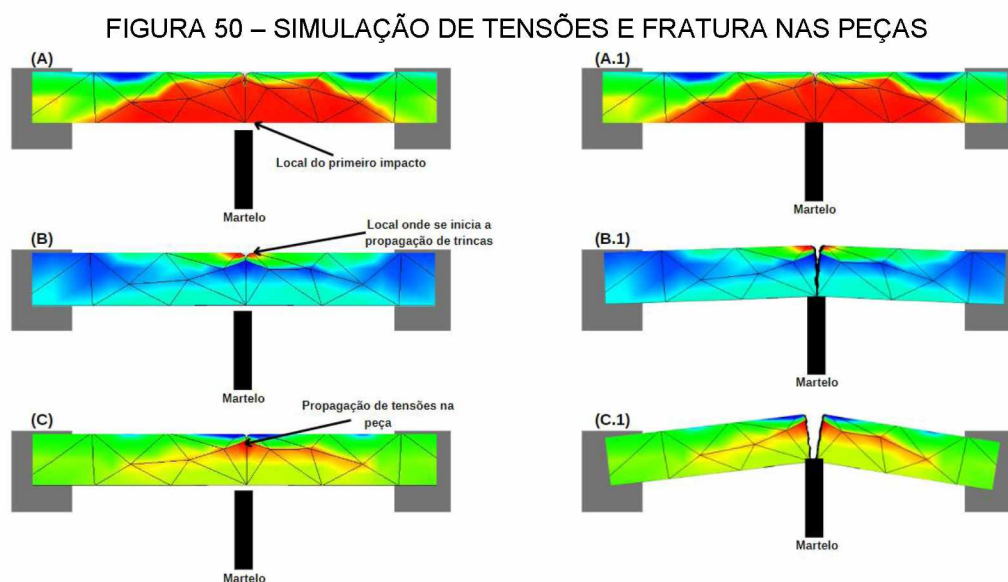
Na peça 50E 01 (C, D), observou-se menor, ou menos evidente, propagação de trincas em comparação com a peça 20E 01. Isso possivelmente ocorreu pois ela absorveu mais energia de impacto em virtude da maior porcentagem de preenchimento. Outra característica interessante de se observar é que sua fratura ocorreu de forma mais uniforme.

Por fim, a peça 80E 01 (E, F), assim como as demais, possui trincas; mas essas são menos evidentes pois encontraram dificuldade para se propagarem. Isso pode ser atribuído a quantidade de material da peça, visto que maiores porcentagens de preenchimento e menores concentrações de trincas podem representar uma maior resistência a fratura.

Ao atentar para a região das paredes do recurso interno, percebe-se que, em todos os casos, as trincas encontraram dificuldades para se propagarem.

#### 4.5 SEQUÊNCIA DE EVENTOS DE FRATURA DAS PEÇAS

Como meio de ilustração da sequência de eventos de fratura das peças, foi simulado no software Inventor 3 situações nas quais apresentam as concentrações de tensões (FIGURA 50). Salienta-se que essas simulações foram feitas somente para fins demonstrativos e que não foi conduzido um estudo aprofundado de elementos finitos nas peças.

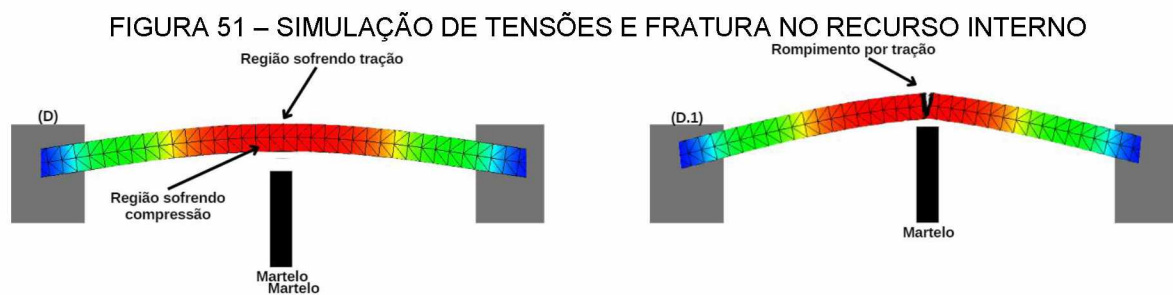


FONTE: O autor (2023).

Dada geometria da peça e disposição na máquina para a realização dos testes, a primeira simulação (A, A.1) mostra que a parte posterior ao entalhe é o lugar onde sofre o maior impacto. Isso porque aquela é a região onde recebe o golpe do martelo. Contudo, a fratura não é iniciada naquele lugar, mas no entalhe.

A próxima simulação (B, B.1) apresenta, na região do entalhe, uma concentração de tensões – função principal dele – por onde são iniciadas as trincas que são propagadas. Por fim, na parte (C, C.1), é apresentado as tensões que são originadas e espalhadas logo abaixo do entalhe.

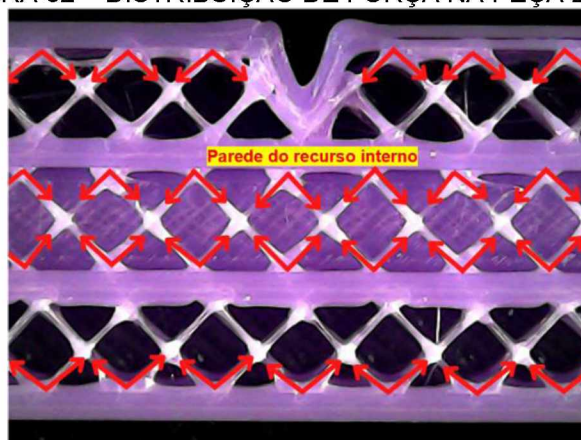
Como o recurso interno não possui entalhe, embora a trinca tenha início no entalhe da parte externa, sua fratura possivelmente acontece de forma diferente. Tendo em vista as micrografias apresentadas nas quais as trincas encontram certa dificuldade para se propagarem pelas paredes internas. Dessa forma, pressupõe que sua fratura ocorre por tração, como apresentado na simulação da FIGURA 51.



FONTE: O autor (2023).

Quando a peça recebe o impacto, supõe-se que há uma dissipação da força devido a geometria e a quantidade de preenchimento da peça. Em preenchimentos de porcentagens menores, como apresentado na FIGURA 53 de 20%, a força é pouco dissipada e mais concentrada nos filamentos.

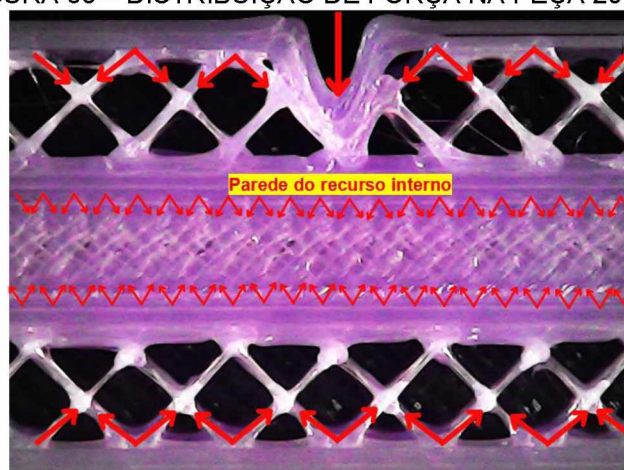
FIGURA 52 – DISTRIBUIÇÃO DE FORÇA NA PEÇA 20E 20I



FONTE: O autor (2023).

Destaca-se que ao aumentar a porcentagem de preenchimento interno, a máquina não aumenta a espessura dos filamentos, mas diminui o espaço entre eles devido a inclusão de mais material. Portanto, com preenchimentos maiores, há maior dissipação da energia entre os filamentos e conseqüentemente maior absorção de energia. Como meio de ilustrar essa situação, apresenta-se na FIGURA 53 o recurso interno com 80% de preenchimento.

FIGURA 53 – DISTRIBUIÇÃO DE FORÇA NA PEÇA 20E 80I



FONTE: O autor (2023).

Conforme mostraram as análises estatísticas, peças com o recurso interno possuem vantagem na quantidade de energia absorvida. Isso pode ser explicado por dois motivos principais. O primeiro é referente a massa da peça. Peças com mais massa tendem a absorver mais energia por terem mais meios para a força se dissipar; como foi possível de se observar com os testes.

Em peças cujas porcentagens de preenchimento eram menores, a massa do recurso interno tinha um impacto maior. Já com a porcentagem de 80, a diferença não foi tão grande por já ser uma porcentagem alta.

O segundo motivo diz respeito a estrutura interna da peça. Ao colocar o recurso interno, as paredes dele são construídas em linha reta na horizontal, não obedecendo a geometria padrão feita. Vide FIGURA 54 para maior compreensão.

FIGURA 54 – SENTIDO DA PAREDE DO RECURSO INTERNO



FONTE: O autor (2023).

Ao receber o impacto, as forças encontram dificuldade de se dissiparem devido a orientação da parede do recurso interno. O mesmo acontece na propagação das trincas. Isso fica claro com os resultados entre as peças de preenchimento puro e as com preenchimento no recurso interno igual ao externo. Ao adicionar o recurso interno, a energia absorvida aumentou em todos os casos.

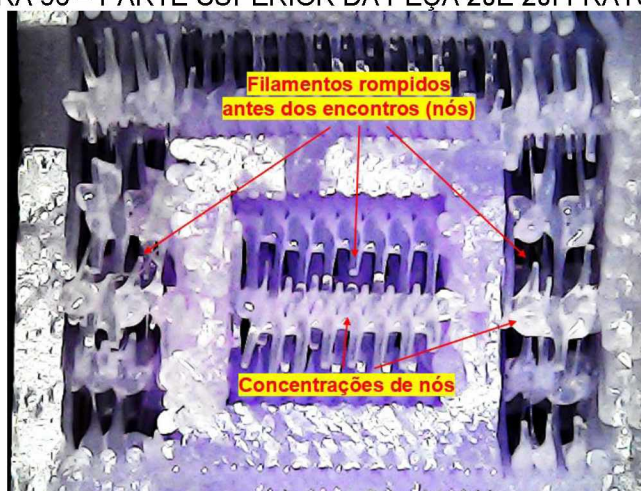
Outro fato importante a ser considerado é que as fraturas não acontecem diretamente no encontro dos filamentos (nós), mas de forma adjacente. A FIGURA 55 e a FIGURA 56 exemplificam a direção das trincas e a visão superior da peça fraturada, respectivamente.

FIGURA 55 – REPRESENTAÇÃO DE FRATURA VISTA INTERNAMENTE EM UMA PEÇA 20E 20I



FONTE: O autor (2023).

FIGURA 56 – PARTE SUPERIOR DA PEÇA 20E 20I FRATURADA



FONTE: O autor (2023).

A principal razão para esse acontecimento pode ser explicada pelos nós e pelos espaços vazios entre os filamentos. O preenchimento do tipo linha tem como

característica a deposição de camadas unidirecionais. Em outras palavras, embora o ângulo de deposição seja de  $45^\circ/-45^\circ$ , cada camada é feita com um ângulo por vez.

Devido a essas concentrações de nós, a resistência no local é aumentada e, por consequência, os filamentos próximos a eles acabam sendo as partes mais suscetíveis a fratura.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas condições testadas nesta pesquisa, cujo objetivo geral foi analisar a influência de diferentes porcentagens de preenchimento em peças fabricadas em PLA por tecnologia FFF na absorção de energia de impacto, pode-se chegar como conclusões que:

1. O lote 20E 20I obteve o melhor aumento de absorção de energia de impacto, com 84,1%, seguido pelo lote 20E 0I, o segundo melhor com 68,2%. A variação da massa para cada um deles foi de 16,2% e 20,6%, respectivamente.
2. O lote 80E 0I obteve o menor percentual de redução de massa, com -3,8%; entretanto, também com diminuição da absorção de energia em -4,1%. Isso pode ser explicado pelo fato de 80% estar muito próximo de 100% de preenchimento, como apresentado pelas análises estatísticas. Por conseguinte, o lote 50E 0I obteve o segundo melhor percentual de alteração de massa, com 2%, e aumento de 11,5% na absorção de energia.
3. Os dados apresentados nesta pesquisa sugerem que o uso do recurso interno pode ser vantajoso especialmente em peças com percentual de preenchimento mais baixos, como o de 20%.
4. Os lotes com o recurso interno com a mesma porcentagem de preenchimento externo conseguiram os melhores resultados de absorção de energia, sendo um deles 20E 20I. Isso se deve ao aumento de massa das peças e a redefinição da estrutura interna.
5. A parede do recurso interno tem efeito sobre os resultados dos testes. Em casos como os lotes 20E 0I e 50E 0I, embora o recurso interno estivesse sem preenchimento, a absorção de energia teve um aumento considerável.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, em consonância com a ideia da inserção de um recurso interno proposta neste trabalho, sugere-se:

1. Desenvolver peças utilizando o PETG, dado suas boas propriedades mecânicas. Também, investigar se o comportamento identificado nesta dissertação se manterá na realização de experimentos usando-o.
2. Variar, em uma mesma peça, os tipos de estruturas internas, tais como o giróide, *honeycomb* (favo de mel) e octeto. Essa investigação possibilitará analisar o efeito das estruturas internas na absorção da energia de impacto.
3. Avaliar o efeito da variação do número de paredes, internas e externas, na absorção da energia de impacto. Além disso, testar diferentes geometrias (largura, altura e comprimento) para o recurso interno, a fim de obter uma melhor relação entre peso e resistência ao impacto.

## REFERÊNCIAS

- AGARWAL, K.; MATHUR, D.; SHIYPURI, R.; LEMBO, J. **Evaluation of ProMetal technique for application to dies for short run forgings**. In: 2002 International Solid Freeform Fabrication Symposium. 2002.
- AL KHAWAJA, H.; ALABDOULI, H.; ALQAYDI, H.; MANSOUR, A.; AHMED, W.; E AL JASSMI, H. Investigating the mechanical properties of 3D printed components. In: **2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)**. IEEE, 2020. p. 1-7.
- ALVES, T. P.; DE JESUS, A. V. S.; PINTO, G. V. S.; RIBEIRO., R. R. M.; RODRIGUES, L. K. O. **Análise da influência do padrão de preenchimento e da altura de camada de deposição nas propriedades mecânicas de peças fabricadas em PLA a partir de impressão 3d**. Desafios - Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins, v. 8, n. 1, p. 95-103, 2021.
- AHMED, J. Thermal properties of polylactides and stereocomplex. **Glass Transition and Phase Transitions in Food and Biological Materials**, p. 261-279, 2017.
- ANWAR, S; SINGH, G. K.; MILLER, J.; SHARMA, M.; MANNING, P.; BILLADELLO J. J.; EGHESADY, P.; WOODARD P. K. 3D printing is a transformative technology in congenital heart disease. **JACC: Basic to Translational Science**, v. 3, n. 2, p. 294-312, 2018
- ASTM STANDARD D 6110-10. Standard test methods for determining the Charpy impact resistance of notched specimens of plastics. **Annual Book of ASTM Standards**, 2010.
- AVÉROUS, L. Polylactic acid: synthesis, properties and applications. In: **Monomers, polymers and composites from renewable resources**. Elsevier, 2008. p. 433-450.
- BRISCHETTO, S., TORRE, R., FERRO, C. G. **Experimental Evaluation of Mechanical Properties and Machine Process in Fused Deposition Modelling Printed Polymeric Elements**. Anais AHFE 2019 International Conference on Additive Manufacturing, Modeling Systems and 3D Prototyping, 377–389, (2019).
- CABREIRA, V.; SANTANA, R. M. C. Effect of infill pattern in Fused Filament Fabrication (FFF) 3D Printing on materials performance. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, 2020.
- CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos polímeros**. Artiliber editora, São Paulo, p. 110-115, 2002.

CHAOUADI, R.; FABRY, A. On the utilization of the instrumented Charpy impact test for characterizing the flow and fracture behavior of reactor pressure vessel steels. In: **European Structural Integrity Society**. Elsevier, 2002. p. 103-117.

CREMONA, L.; MEZZENZANA, M.; RAVARINI, A.; BUONANNO, G. **How additive manufacturing adoption would influence a company strategy and business model**. MIBES Transactions, v. 10, n. 2, p. 23-34, 2016.

COELHO, A. W. F.; ARAUJO, A. C.; THIRÉ, R. M. da S. M.; Manufatura aditiva por estereolitografia: análise da geometria da peça e da influência da posição e orientação de fabricação. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, 2018.

CORREA, C. A.; YAMAKAWA, R. S.; HAGE JR, E. Determinação de temperatura de transição dúctil-frágil de plásticos através de testes de impacto instrumentado. **Polímeros**, v. 9, n. 1, p. 76-84, 1999.

CUAN-URQUIZO, E.; BAROCIO, E.; TEJADA-ORTIGOZA, V.; PIPES, R. B.; RODRIGUEZ, C. A.; ROMAN-FLORES, A. Characterization of the mechanical properties of FFF structures and materials: A review on the experimental, computational and theoretical approaches. **materials**, v. 12, n. 6, p. 895, 2019.

DA ROCHA, G. B. T.; PEREIRA, L. M. M.; FARIAS, L. D. P.; GANDUR, N. L.; FLORES, P. M.; DE OLIVEIRA, R. M.; DA SILVA, M. H. P. **Análise fractográfica em MEV–fratura dúctil x fratura frágil**. Ciência e Tecnologia, p. 85, 2016.

DEY, A.; YODO, N. A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 3, n. 3, p. 64, 2019.

DIZON, J. R. C.; ESPERA JR, A. H.; CHEN, Q.; ADVINCULA, R. C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. **Additive manufacturing**, v. 20, p. 44-67, 2018.

3DLAB. Resistência da peça na impressão 3D e altura da camada: entenda a relação. Disponível em <<https://3dlab.com.br/resistencia-da-peca-na-impressao-3d/>> Acesso em: 19/02/2022.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio de Materiais**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2012

GARZON-HERNANDEZ, S.; GARCIA-GONZALEZ, D.; JÉRUSALEM, A.; E ARIAS, A. Design of FDM 3D printed polymers: An experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties. **Materials & Design**, v. 188, p. 108414, 2020.

GEBHARDT, A. **Understanding additive manufacturing**. Munich: Hanser Publishers, 2011.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies**. New York: Springer, 2010.

GTMAX. GTMax 3D Core AD. Disponível em:

<<https://www.gtmax3d.com.br/impressora-3d-pro/gtmax3d-core-ad>>. Acesso em: 29/08/2021.

HABEEB, H. A., ABOOD, A. H., E MOHAN, A. E. Influence of Layer Thickness and Infill Density on the Impact Strength of Carbon Particle and Polylactic Acid (CP/PLA) Composite. **Solid State Technology**, v. 63, n. 2, 2020.

HALEEM, A.; JAVAID, M.; SAXENA, A. Additive manufacturing applications in cardiology: a review. **The Egyptian Heart Journal**, v. 70, n. 4, p. 433-441, 2018.

HENTON, D. E.; GRUBER, P.; LUNT, J.; RANDALL, J. Polylactic acid technology. **Natural fibers, biopolymers, and biocomposites**, v. 16, p. 527-577, 2005.

HORBAN, M. A.; SILVA, A. A.; MAYDL, M. P.; CASTELLA, R.; LUNELLI, C. E. PRODUÇÃO DE POLI (ÁCIDO LÁTICO) A PARTIR DO SORO DO LEITE. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 3, n. 8, p. 1136-1150, 2017.

HUANG, H.S.; PENG, L.; MOKASDAR A; HOU, L; Additive manufacturing and its societal impact a literature review, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 67, Oct.2012, p.1191-1203.

JIANG, R.; KLEER, R.; PILLER, F. T. Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 117, p. 84-97, 2017.

KAČĚRGIS, L.; MITKUS, R.; SINAPIUS, M. Influence of fused deposition modeling process parameters on the transformation of 4D printed morphing structures. **Smart Materials and Structures**, v. 28, n. 10, p. 105042, 2019.

KUMAR, S. Selective laser sintering: a qualitative and objective approach. **Jom**, v. 55, n. 10, p. 43-47, 2003.

LAY, M.; THAJUDIN, N. L. N.; HAMID, Z. A. A.; RUSLI, A.; ABDULLAH, M. K.; SHUIB, R. K. Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding. **Composites Part B: Engineering**, v. 176, p. 107341, 2019.

LIMA, C. F.; MOMM G. H.; MATOS V. A.; CAMPREGHER V. P. Relatório de ensaio de impacto realizado com polímero PLA. 2018

LU, K.; REYNOLDS, W. T. 3DP process for fine mesh structure printing. **Powder technology**, v. 187, n. 1, p. 11-18, 2008.

LUBOMBO, C.; HUNEAULT, Michel A. Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D-printed cellular PLA parts. **Materials Today Communications**, v. 17, p. 214-228, 2018.

LWT SISTEMAS. Como funciona uma impressora 3D. Disponível em: <<https://www.lwtsistemas.com.br/2020/11/16/como-funciona-uma-impressora-3d/#:~:text=Basicamente%20a%20impressora%203D%20%C3%A9,chamamos%20%20tecnologia%20de%20impress%C3%A3o%203D.>> Acesso em: 19/02/2022.

MARQUES, J.; MARQUES, M. A. M. **Estatística básica para os cursos de engenharia**. 2 ed. Curitiba: Domínio do Saber, 2009.

MANO, E. B; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. São Paulo: Edgard Blücher. 2ª ed. 1999.

MARTINS, T. Influência dos parâmetros de fabrico nas propriedades mecânicas de peças obtidas por impressão 3D com um único material. Instituto Superior Técnico de Lisboa. Dissertação. 2017.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical behavior of materials**. Cambridge university press, 2008.

MISHRA, P. K.; SENTHIL, P.; ADARSH, S.; ANOOP, M. S. An investigation to study the combined effect of different infill pattern and infill density on the impact strength of 3D printed polylactic acid parts. **Composites Communications**, v. 24, p. 100605, 2021.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. John Wiley & Sons, 2009.

MUNDO DAS FERRAMENTAS DO BRASIL. Disponível em: <[https://br.toolsworld.com/product/8962\\_br/](https://br.toolsworld.com/product/8962_br/)> Acesso em: 06/02/2023.

MURARIU, M.; DUBOIS, P. PLA composites: From production to properties. **Advanced drug delivery reviews**, v. 107, p. 17-46, 2016.

NAM, S.; e PEI, E. The influence of shape changing behaviors from 4D printing through material extrusion print patterns and infill densities. **Materials**, v. 13, n. 17, p. 3754, 2020.

NISHIMURA, P. L. G.; RODRIGUES, O. V.; JÚNIOR, G. B.; SILVA, L. A. Prototipagem rápida: um comparativo entre uma tecnologia aditiva e uma subtrativa. **Blucher Design Proceedings**, v. 2, n. 9, p. 4481-4491, 2016.

PATTERSON, A. E.; PEREIRA, T. R.; ALLISON, J. T.; MESSIMER, S. L. IZOD impact properties of full-density FDM polymer materials with respect to raster angle and print orientation. **Proceedings of IMECHE Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 1, p. 13, 2019.

PALČIČ, I.; BALAŽIĆ, M.; MILFELNER, M.; BUCHMEISTER, B. Potential of laser engineered net shaping (LENS) technology. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 24, n. 7-8, p. 750-753, 2009.

PALERMO, E. What is Laminated Object Manufacturing? Disponível em: <<http://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>>. Acesso em: 28/08/2021.

PARK, J.; TARI, M. J.; HAHN, H. T. Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process. **Rapid Prototyping Journal**, 2000.

PERES, F. M. **Métodos de mecânica da fratura aplicados a polietileno de média densidade destinado à extrusão de tubos**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PORSANI, R. N.; SILVA, B. B.; HELLMEISTER, L. A. V. Revisão teórica da história da manufatura aditiva e das propriedades dos principais insumos e estruturas de preenchimento nas impressoras 3d fdm. **Anais do II Congresso Internacional e VIII Workshop: Design & Materiais**, 2017.

RAJPUROHIT, S. R.; DAVE, H. K. Analysis of tensile strength of a fused filament fabricated PLA part using an open-source 3D printer. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 101, n. 5, p. 1525-1536, 2019.

RODRÍGUEZ-PANES, A.; CLAVER, J.; CAMACHO, A. M. The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM: A comparative analysis. **Materials**, v. 11, n. 8, p. 1333, 2018.

SANTANA, L.; ALVES, J. L.; SABINO NETTO, A. D. C.; MERLINI, C. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. **Matéria** (Rio de Janeiro), 23. 2018.

SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial**. Edipro, 2016.

SILVA, C.; PAIS, A. I.; CALDAS, G.; GOUVEIA, B. P.; ALVES, J. L.; BELINHA, J. Study on 3D printing of gyroid-based structures for superior structural behaviour. **Progress in Additive Manufacturing**, p. 1-15, 2021.

SMITH, C. Bio-focus Turns to Durability, **Compd. World**, 31–36, 2013.

SMITH, C. Why green plastics are here to stay, **Compd. World**, 45–51, 2012.

SINGH, R. Process capability study of polyjet printing for plastic components. **Journal of mechanical science and technology**, v. 25, n. 4, p. 1011-1015, 2011.

SOLOMON, I. J.; SEVELL, P.; GUNASEKARAN, J. A review on the various processing parameters in FDM. **Materials Today: Proceedings**, v. 37, p. 509-514, 2021.

SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. **Materials & Design**, v. 31, n. 1, p. 287-295, 2010.

SRINIVASAN, R.; KUMAR, K. N.; IBRAHIM, A. J.; ANANDU, K. V.; GURUDHEVAN, R. Impact of fused deposition process parameter (infill pattern) on the strength of PETG part. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 1801-1805, 2020.

SYRLYBAYEV, D.; ZHARYLKASSYN, B.; SEISEKULOVA, A.; AKHMETOV, M.; PERVEEN, A.; TALAMONA, D. Optimization of strength properties of FDM printed parts—A critical review. **Polymers**, v. 13, n. 10, p. 1587, 2021.

TANVEER, M. Q.; HALEEM, A.; SUHAIB, M. Effect of variable infill density on mechanical behaviour of 3-D printed PLA specimen: an experimental investigation. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 12, p. 1-12, 2019.

TOPINK 3D. Disponível em: <<https://www.topink3d.com.br/creality-ender-5-pro>> Acesso em: 19/02/2022.

VOLPATO, N.; CARVALHO, J. **Introdução à Manufatura Aditiva ou impressão 3D**. In: VOLPATO, Neri (Org). *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. Editora Blucher, 2017.

WANG, L.; GRAMLICH, W. M.; GARDNER, D. J. Improving the impact strength of Poly (lactic acid)(PLA) in fused layer modeling (FLM). **Polymer**, v. 114, p. 242-248, 2017.

WANG, X.; JIANG, M.; ZHOU, Z.; GOU, J.; HUI, D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. **Composites Part B**, v. 110, p. 442–458, 2017

WONG, K. V.; HERNANDEZ, A. A review of additive manufacturing. **International scholarly research notices**, v. 2012, 2012.

ZAPAROLLI, Domingos. **O avanço da impressão 3D**. Pesquisa FAPESP. p. 60-65, 2019. Disponível em: < <https://revistapesquisa.fapesp.br/2019/02/11/o-avanco-da-impressao-3d/>>. Acesso em: 29/08/2021.

ZÄH, M. F.; LUTZMANN, S. Modelling and simulation of electron beam melting. **Production Engineering**, v. 4, n. 1, p. 15-23, 2010.

ZHOU, Y. G.; ZOU, J. R.; WU, H. H.; XU, B. P. Balance between bonding and deposition during fused deposition modeling of polycarbonate and acrylonitrile-butadiene-styrene composites. **Polymer Composites**, v. 41, n. 1, p. 60-72, 2020.

ZHARYLKASSYN, B.; PERVEEN, A.; TALAMONA, D. Effect of process parameters and materials on the dimensional accuracy of FDM parts. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 1307-1311, 2021.

## ANEXO A

# GT*MaX*3D

## PLA Plus

**Material:** PLA

**Cor:** Todas as cores

**Diâmetro:** 1.75mm

**Temperatura de transição vítrea:** 60°C

### Informações de impressão

Temperatura de extrusão (bico)	190°C à 220°C
Temperatura da mesa (mesa)	0°C à 60°C
Velocidade de impressão	até 150mm

\*Recomendamos o uso do cooler para ventilar a peça durante a impressão.

\*Esses parâmetros são apenas uma recomendação, podendo variar de acordo com o equipamento utilizado.

Propriedade	Método de teste	Unidade	Valor
Resistência a tensão	D882	MPa	7,700 (53)
Alongamento na ruptura	D882	%	6
Módulo de flexão	D882	GPa	500 (3.5)
Resistência ao impacto IZOD	D256	J/m	0.3 (16)