

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial

Luã Fonseca Seixas

**Influência da Orientação Espacial de Impressão nas propriedades
de Peças de Polipropileno produzidas Via Manufatura aditiva
Multi Jet Fusion (MJF)**

Salvador

2023

Luã Fonseca Seixas

**Influência da Orientação Espacial de Impressão nas propriedades
de Peças de Polipropileno produzidas Via Manufatura aditiva
Multi Jet Fusion (MJF)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Santiago Coelho

Salvador

2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

S457i Seixas, Luã Fonseca

Influência da orientação espacial de impressão nas propriedades de peças de polipropileno produzidas via manufatura aditiva Multi Jet Fusion (MJF) / Luã Fonseca Seixas. – Salvador, 2023.

201 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Santiago Coelho.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2023.

Inclui referências.

1. Manufatura aditiva. 2. Orientação de impressão. 3. Polipropileno. 4. Fusão em leito de pó. 5. Multi Jet Fusion. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Coelho, Rodrigo Santiago. III. Título.

CDD 668.4

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC**Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia Industrial**

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada **“Influência da orientação espacial de impressão nas propriedades de peças de polipropileno produzidas via manufatura aditiva Multi Jet Fusion (MJF)”** apresentada no dia 29 de março de 2023, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Electronically signed by:
RODRIGO Santiago Coelho
CPF: ***.303.486-**
Date: 4/12/2023 6:33:36 PM -03:00

Sistema FIEB | **SENAI**
CENTRO UNIVERSITÁRIO

Orientador:

Prof. Dr. Rodrigo Santiago Coelho
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:
Josiane Dantas Viana
CPF: ***.515.704-**
Data: 30/03/2023 07:08:39 -03:00

Sistema FIEB | **SENAI**
CENTRO UNIVERSITÁRIO

Membro Interno:

Prof.^a Dr.^a Josiane Dantas Viana Barbosa
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:
Henrique Takashi Idogava
CPF: ***.313.338-**
Data: 29/03/2023 15:24:00 -03:00

Sistema FIEB | **SENAI**
CENTRO UNIVERSITÁRIO

Membro Externo:

Prof. Dr. Henrique Takashi Idogava
UNIVASF

Assinado eletronicamente por:
Tiago Nunes Lima
CPF: ***.770.455-**
Data: 29/03/2023 15:23:23 -03:00

Sistema FIEB | **SENAI**
CENTRO UNIVERSITÁRIO

Membro Externo:

Prof. Dr. Tiago Nunes Lima
FIEB

Dedico este trabalho a minha família que me incentivam a crescer e a acreditar no meu potencial, em especial aos meus pais, por tudo o que puderam fazer para que eu me tornasse a pessoa e profissional que sou hoje.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Rodrigo Coelho, pelas orientações e ensinamentos oferecidos ao longo dessa jornada, bem como pelas orientações e conselhos do Bruno Caetano dos Santos, Tiago Nunes e Luis Fernando Folle.

Agradeço aos meus colegas no SENAI CIMATEC pelas valiosas trocas de conhecimento e por todo apoio. Agradeço especialmente a equipe do Bureau SENAI CIMATEC de Manufatura aditiva, do Centro de competência em manufatura aditiva do SENAI CIMATEC, dos projetos 4RAM (*For robotics, additive manufacturing*) e dos laboratórios de materiais do SENAI CIMATEC, pelos suportes no desenvolvimento do projeto, fabricações e realizações de testes, bem como pelos grandes aprendizados consolidados ao longo do meu mestrado, em especial ao Gabriel Candeias e a Marcela Menezes.

Agradeço ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Gestão e Tecnologia Industrial (PPGETEC) do SENAI CIMATEC pelas aulas e aprendizados e a toda a coordenação do PPGETEC pelo excelente apoio durante todo o programa.

Agradeço ainda a HP e a SKA, pelos treinamentos e materiais disponibilizados referente a tecnologia Multi Jet Fusion estudada neste trabalho.

RESUMO

No processo de manufatura aditiva (MA) utilizando a tecnologia de fusão em leito de pó da HP (Multi Jet Fusion – MJF), os principais parâmetros de processo que afetam o desempenho dos produtos impressos são a orientação de impressão, posicionamento das peças dentro da área de impressão e parâmetros de deposição de energia e de resfriamento. Considerando que a tecnologia MJF é um processo relativamente novo, na literatura ainda há pouca informação sobre a influência dos parâmetros de processo no desempenho de produtos fabricados por esta tecnologia. Além disso, os estudos publicados se concentram primariamente com o material Poliamida 12. Pouco foi publicado em estudos sobre os outros materiais disponíveis para o processo MJF. Destes, o Polipropileno (PP) é um polímero classificado como *commodity* amplamente aplicado na indústria e, portanto, desperta muito interesse em diversas aplicações. Assim, este trabalho tem como objetivo investigar os efeitos da variação da orientação espacial de impressão no desempenho mecânico de amostras de PP impressas por MJF e no desempenho do processo em si. Para isto, inicialmente foi realizado um planejamento experimental utilizando DOE (Design of experiments) para impressão de amostras em diferentes orientações espaciais de impressão de acordo com o método de superfície de resposta com duas variáveis. Avaliou-se propriedades mecânicas de tração e impacto das amostras de PP, além de análises térmicas, de porosidade e morfológicas. Para avaliação do processo, foram simuladas cubas de impressão de acordo com o método de superfície de resposta com três variáveis, avaliando-se características de custo, produtividade e consumo de matéria-prima sob a influência da orientação de impressão de cubas simuladas. Os resultados obtidos revelaram que, pelo modelo experimental aplicado, foi identificada significância estatística para a influência da orientação de impressão apenas nas propriedades de tensão máxima sob tração, alongamento, porosidade e cristalinidade, embora as variações das propriedades sejam baixas. Quanto a avaliação do processo, foi identificada pouca influência da orientação em fatores como custo, tempo de impressão e consumo de material, sendo estes fatores mais dependentes da quantidade de peças contidas na cuba e da densidade de empacotamento. A aplicação do método de superfície de resposta permitiu a elaboração de gráficos de superfície que dão diretrizes de otimização da impressão de peças de PP via MJF para melhorias na produtividade e no desempenho mecânico das peças.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, Orientação de impressão, Polipropileno, Fusão em leito de pó, Multi Jet Fusion, Otimização.

ABSTRACT

Influence of Printing Spatial Orientation on the properties of Polypropylene Parts produced via Multi Jet Fusion (MJF) Additive Manufacturing.

In the additive manufacturing (AM) process using HP's powder bed fusion technology (Multi Jet Fusion – MJF), the main process parameters that affect the performance of printed products are the printing orientation, positioning of parts within the printing area and energy deposition and cooling parameters. Considering that the MJF technology is a relatively new process, in the literature there is still few information about the influence of process parameters on the performance of products manufactured using this technology. Furthermore, the published studies focus primarily on the material Polyamide 12. Little has been published on studies of the other materials available for the MJF process. Of these, Polypropylene (PP) is a polymer classified as a commodity widely applied in industry and, therefore, arouses much interest in several applications. Thus, this work aims to investigate the effects of varying the spatial orientation of printing on the mechanical performance of PP samples printed by MJF and on the performance of the process itself. For this, an experimental design was initially carried out using DOE (Design of experiments) to print samples in different spatial printing orientations according to the response surface method with two variables. Mechanical properties of traction and impact of the PP samples were evaluated, in addition to thermal, porosity and morphological analyses. To evaluate the process, printing vats were simulated according to the response surface method with three variables, evaluating cost, productivity and raw material consumption characteristics under the influence of the printing orientation of simulated vats. The results obtained revealed that, by the applied experimental model, statistical significance was identified for the influence of print orientation only on the properties of maximum tension under traction, elongation, porosity and crystallinity, although variations in properties are low. As for the evaluation of the process, little influence of orientation was identified on factors such as cost, printing time and material consumption, these factors being more dependent on the number of parts contained in the vat and packaging density. The application of the response surface method allowed the elaboration of surface graphics that provide guidelines for optimizing the printing of PP parts via MJF for improvements in productivity and mechanical performance of the parts.

Keywords: Additive manufacturing, Printing orientation, Polypropylene, Powder bed fusion, Multi Jet Fusion, Optimization.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Perspectivas de crescimento de mercado para a manufatura aditiva (SMARTTECH, 2021)..... | 25 |
| Figura 2. Gráficos de crescimento anual acumulado de patentes de MA, análise de curva S (SILVA et al., 2021)..... | 27 |
| Figura 3. Gráficos de crescimento anual acumulado de patentes envolvendo tecnologias de fusão em leito de pó, análise de curva S (SILVA et al., 2021)..... | 27 |
| Figura 4. Comparações de crescimento de vendas de equipamentos de manufatura aditiva de polímeros por tipo de processo e taxas de crescimento de mercado. (XU et al., 2020)..... | 28 |
| Figura 5. Crescimento de publicações anuais acumuladas, a) para manufatura aditiva em geral e para processos de fusão em leito de pó e b) para Multi Jet Fusion considerando estudos de orientação de impressão e com polipropileno. Fonte própria..... | 29 |
| Figura 6. As nove categorias das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 (CHESINI, 2021). | 33 |
| Figura 7. Ilustração e exemplos das manufaturas subtrativa, formativa e aditiva. Fonte própria. | 34 |
| Figura 8. Evolução histórica da manufatura aditiva, do período de desenvolvimento, baseado em (ASM INTERNATIONAL, 2020)..... | 34 |
| Figura 9. Evolução histórica da manufatura aditiva, do período moderno, baseado em (ASM INTERNATIONAL, 2020) | 35 |
| Figura 10. Principais setores de aplicações industriais da manufatura aditiva, baseado em (ASM INTERNATIONAL, 2020; GISARIO et al., 2020). | 36 |
| Figura 11. Procedimentos típicos das etapas de um processo de manufatura aditiva, baseado em (GIBSON et al., 2021)..... | 38 |
| Figura 12. Maturidade tecnológica e industrial dos processos de MA para polímeros e para metais (AMPOWER, 2021)..... | 41 |
| Figura 13. Comparação geral entre as categorias de tecnologia de manufatura aditiva em relação a energia utilizada nos processos, velocidade de fabricação e resolução das peças impressas (TOFAIL et al., 2018)..... | 43 |
| Figura 14. Esquema com as características típicas dos processos de fusão em leito de pó. Fonte Própria. | 44 |
| Figura 15. Exemplos de peças fabricadas por processos de fusão em leito de pó com diferentes materiais. a) Componentes de helicópteros fabricados por SLS; b) Próteses dentais de cerâmica | |

| | |
|--|----|
| fabricadas por fusão em leito de pó. c) prótese de PA12 fabricada por MJF; d) Reconstrução de ossos de mandíbula de aço inox fabricadas por DMLS; e) Molde com canais conformais de metal fabricado por fusão em leito de pó (ASM INTERNATIONAL, 2020; AWAD et al., 2021; SINGH et al., 2019). | 46 |
| Figura 16. Processos de MA para impressão de peças de polímero (FORMNEXT, 2021). | 49 |
| Figura 17. Processos de MA para impressão de peças de metais (FORMNEXT, 2021). | 50 |
| Figura 18. Processos de MA para materiais diversos (FORMNEXT, 2021). | 51 |
| Figura 19. Visão geral dos princípios de processos diretos de MA para materiais poliméricos (ABNT, 2018). | 52 |
| Figura 20. Visão geral dos princípios de processos diretos de MA para materiais metálicos (ABNT, 2018). | 53 |
| Figura 21. Visão geral dos princípios de processos diretos de MA para materiais cerâmicos (ABNT, 2018). | 53 |
| Figura 22. Visão geral dos princípios de processos indiretos de MA para materiais diversos (ABNT, 2018). | 54 |
| Figura 23. Disponibilidade de polímeros para os processos de fusão em leito de pó (TAN, ZHU e ZHOU, 2020). | 55 |
| Figura 24. Disponibilidade de polímeros para os processos de extrusão de material (TAN, ZHU e ZHOU, 2020). | 55 |
| Figura 25. Exemplos de peças de polímeros fabricadas por processos de MA a) Vestimenta impressa por fusão em leito de pó de termoplástico; b) Balão de elastômero impresso em fotopolimerização em cuba com capacidade de aumentar 3x seu tamanho; c) Órtese de PEEK impressa por SLS; d) Duto de termoplástico impresso em fusão em leito de pó; e) Escavadora com componentes inteiramente impressos em ABS por processo de extrusão de material; f) primeiro carro inteiramente impresso em 3D por extrusão de material de polímeros; g) Capacete ortopédico impresso por MJF; h) Peça de polímero multicolorida impressa por jateamento de aglutinante (ASM INTERNATIONAL, 2020; LIGON et al., 2017; TAN, ZHU e ZHOU, 2020). | 58 |
| Figura 26. Exemplos de tesselação com diferentes tolerâncias. No centro, uma malha mais refinada e mais precisa, e a direita, uma malha mais grossa, menos precisa (I.MATERIALISE, 2021). | 59 |
| Figura 27. Otimizações e simulações para preparação de peças e de impressão. a) otimização da cuba de impressão para redução da altura de impressão e melhoria da densidade de empacotamento. B) análise de interlocking (peças presas umas nas outras); c) Geração de | |

| | |
|--|----|
| estruturas de preenchimento em configuração lattice; d) Análise de risco de distorções, região vermelha está sujeita a má distribuição de calor; e) Geração de estruturas de suporte e análise de possibilidade de distorção na peça e nos suportes (MATERIALISE, 2020)..... | 60 |
| Figura 28. Etapas do processo de Multi Jet Fusion, baseado em material disponibilizado pela HP (HP, 2018). | 62 |
| Figura 29. Esquema da impressão por Multi Jet Fusion, com direções de deposição de material e de energia perpendiculares (HP, 2018)..... | 63 |
| Figura 30. Representações de pixels em impressões 2D e voxels em impressões 3D (HP, 2018). | 64 |
| Figura 31. Equipamentos da série 5000, com a impressora 3D HP Jet Fusion 5200 ao centro (HP, 2021). | 65 |
| Figura 32. Lâmpadas térmicas superiores e lâmpadas de fusão em uma impressora 3D HP Jet Fusion 4200 (MOURA, 2021)..... | 66 |
| Figura 33. Visão da câmera térmica de monitoramento das impressoras MJF da HP (MOURA, 2021)..... | 67 |
| Figura 34. Esquema da deposição de agentes funcionais durante o processo de MJF. baseado em HP (2017)..... | 70 |
| Figura 35. Exemplos de peças fabricadas pela tecnologia de manufatura aditiva Multi jet Fusion, a) PA11, b) PA12, c) PA12 com esferas de vidro, d) PP, e) TPU e f) TPA, baseado em (HP, 2019). | 72 |
| Figura 36. Guia de seleção de materiais de impressão 3D para MJF (HP, 2020). | 73 |
| Figura 37. Os histogramas da distribuição de tamanho de pó de PP novo, usado e misturado (ŠAFKA et al., 2021)..... | 75 |
| Figura 38. Imagens da morfologia do pó de PP para MJF obtidas por MEV, (a) novo; (b) usado; (c) e (d) misturado (ŠAFKA et al., 2021)..... | 75 |
| Figura 39. (a) Ponto de cristalinidade de pós de PP (novos, usados, mistos); e (b) Ponto de fusão de pós de PP (novos, usados, mistos) (ŠAFKA et al., 2021)..... | 76 |
| Figura 40. Posições das amostras utilizadas no estudo de Safka et al. (2021) demonstrando as diferentes direções e rotações analisadas (ŠAFKA et al., 2021). | 76 |
| Figura 41. Resistência ao impacto para as diferentes configurações de orientação testadas com amostras de PP impressas por MJF (ŠAFKA et al., 2021)..... | 77 |
| Figura 42. Tensão máxima a tração e modulo elástico para as diferentes configurações de orientação testadas com amostras de PP impressas por MJF (ŠAFKA et al., 2021)..... | 77 |

| | |
|---|----|
| Figura 43. Deformação até tensão máxima e Deformação até ruptura para as diferentes configurações de orientação testadas com amostras de PP impressas por MJF (ŠAFKA et al., 2021). | 78 |
| Figura 44. Tensão máxima a flexão e modulo de flexão para as diferentes configurações de orientação testadas com amostras de PP impressas por MJF (ŠAFKA et al., 2021). | 78 |
| Figura 45. Exemplos de notação de orientações que leva em consideração a orientação ortogonal e a simetria dos objetos (ABNT, 2019). | 82 |
| Figura 46. Exemplos em que a simetria permite abreviatura de notação de orientação ortogonal de peças fabricadas por MA. | 82 |
| Figura 47. Orientações avaliadas por a) LEE et al. (2020); b) O`CONNOR et al. (2018); c) SAGBAS (2020) e d) MEHDIPOUR et al. (2021). | 83 |
| Figura 48. Imagens de micro CT para varredura de porosidade em amostras com diferentes orientações de impressão (LEE et al. 2020). | 83 |
| Figura 49. Ilustração que descreve a dificuldade de empacotamento do pó no plano horizontal (LEE, PANDELIDI e KAJTAZ, 2020). | 84 |
| Figura 50. Gráficos de tensão por deformação para a) Amostras de tração de PA11 e b) Amostras de tração de PA12 impressas por MJF (O`CONNOR, DICKSON e DOWLING, 2018; LEE, PANDELIDI e KAJTAZ, 2020). | 85 |
| Figura 51. Superfícies de fratura de amostras tracionadas de SLS e MJF, para amostras em XYZ(a e d); ZXY(b e e) e YXZ(c e f) (SAĞBAŞ, 2020). | 85 |
| Figura 52. Comparação de dados de medição das amostras, com graus de variações: a) Entre o modelo e a amostra a 90°; b) Entre o modelo e a amostra a 45° e c) Entre as amostras a 90° e 45° (SAĞBAŞ, 2020) adaptado. | 87 |
| Figura 53. A) Orientações utilizadas no trabalho de Mele et al. (2020) e b) Diferenças identificadas nas densidades das amostras de PA12 para cada orientação testada (MELE et al., 2020). | 88 |
| Figura 54. Esquematização das áreas de absorção (em laranja) correspondendo a diferentes posições em relação as passagens das lâmpadas de fusão no processo de MJF (MELE et al., 2020). | 88 |
| Figura 55. Exemplo de disposição de cubas de impressão no MJF. A esquerda uma cuba com acúmulo de peças muito juntas e pobremente posicionadas, podendo gerar concentração de calor e defeitos. A direita, Peças com bom espaçamento e rotações apropriadas para preservar a precisão dimensional (HP, 2019). | 89 |

| | |
|--|-----|
| Figura 56. Exemplo de disposição correta de a) distanciamento entre peças densas e, b) posicionamento em relação as extremidades da cuba de impressão (HP, 2019)..... | 90 |
| Figura 57. Gráficos de (a) resistência a tração e (b) alongamento até ruptura (ductilidade) para amostras impressas por fusão em leito de pó orientadas em Z. O posicionamento das barras representa a localização no leito de pó, tendo como referência a distância até as extremidades da cuba de impressão (ASM INTERNATIONAL, 2020). | 90 |
| Figura 58. A distribuição da área impressa por camada (coluna da direita) é usada como um indicador de homogeneidade na direção Z para evitar grandes diferenças na absorção de energia das peças. a) Um exemplo de configuração de trabalho não recomendada exibindo não homogeneidade nas três dimensões; b) Um trabalho que é homogêneo no plano XY, mas com uma lacuna distinta e potencialmente problemática ao longo do eixo Z; c) A lacuna ao longo do eixo Z é mais suave após girar os cubos, a fim de evitar a exposição de grandes áreas às últimas camadas a serem impressas; d) Usando otimização de empacotamento automática, a distribuição da área impressa é suavizada ainda mais, minimizando os efeitos térmicos adversos (HP, 2019). | 92 |
| Figura 59. Propriedades mecânicas de amostras de PA12 impressas com pós com diferentes ciclos de reprocessamento (Riedelbauch, Rietzel e Witt, 2019). | 94 |
| Figura 60. Propriedades mecânicas de amostras de PA12 impressas com diferentes taxas de mistura de pós (RIEDELBAUCH, RIETZEL e WITT, 2019)..... | 95 |
| Figura 61. Fluxograma geral da metodologia empregada no trabalho. | 96 |
| Figura 62. Etapas do Planejamento Experimental..... | 100 |
| Figura 63. Matriz do planejamento experimental pelo método de Superfície de Resposta, apresentando os 9 experimentos, ou conjuntos de amostras, variando os ângulos em cada orientação..... | 101 |
| Figura 64. A) Representação modelada das amostras nas respectivas orientações definidas pelo método de Superfície de Resposta. Apresenta orientações com vistas isométrica, superior e lateral; b) Representação os ângulos selecionados como variável quantitativa de entrada no modelo experimental. As amostras foram modeladas e imagens obtidas através do Software SolidWorks. | 101 |
| Figura 65. Divisão das amostras para realização dos ensaios mecânicos, térmicos e morfológicos..... | 102 |
| Figura 66. Otimização da cuba de impressão gerada pelo software Materialise Magics para as amostras dos estudos de caso..... | 104 |

| | |
|---|-----|
| Figura 67. Amostras do trabalho de avaliação da orientação de impressão, separadas após o desempacotamento e jateamento..... | 105 |
| Figura 68. Região das amostras selecionadas para utilização nos testes de medição de porosidade aparente..... | 108 |
| Figura 69. Regiões das amostras de tração selecionadas para obtenção de micrografias..... | 110 |
| Figura 70. Planejamento experimental de modelo central composto (Superfície de resposta) com as respectivas combinações de variáveis aplicadas neste modelo. | 111 |
| Figura 71. Modelo 3D de peça selecionada para análises, sendo uma peça frontal de armação de óculos manufaturados aditivamente. | 112 |
| Figura 72. Cubas simuladas geradas por otimização de empacotamento no software Materialise Magics, para todas as combinações de variáveis analisadas neste modelo. | 113 |
| Figura 73. Gráfico de distribuição de (área de) camadas obtidas pela exportação dos dados do software Materialise Magics e sua análise..... | 116 |
| Figura 74. Exemplos de áreas transversais em alturas na base, meio e topo da cuba impressa. | 116 |
| Figura 75. Análise de coloração gradiente gerada pelo software Materialise Magics para a cuba de impressão das amostras. | 117 |
| Figura 76. Análise de risco de construção gerada pelo software Materialise Magics para a cuba de impressão das amostras. | 118 |
| Figura 77. Gráfico contendo as curvas de Tensão vs Deformação para todas as orientações de impressão avaliadas..... | 119 |
| Figura 78. Amostras de tração após realização dos ensaios com a classificação das orientações. | 119 |
| Figura 79. Gráfico comparando médias e desvios padrões dos resultados de Resistência a tração (tensão máxima sob tração, MPa) das orientações avaliadas..... | 121 |
| Figura 80. Esquema demonstrando a influência da direção de deposição de energia nas amostras com diferentes orientações..... | 121 |
| Figura 81. Esquema demonstrando a influência da direção de deposição de energia em peças com diferentes formatos e orientações..... | 122 |
| Figura 82. Gráficos de resíduos para os testes de ANOVA One Way e normalidade dos dados de resistência a tração. | 123 |
| Figura 83. Gráfico normal de efeitos padronizados do modelo de superfície de resposta para a resposta de Resistência a tração. | 124 |

| | |
|---|-----|
| Figura 84. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para a Resistência a tração..... | 125 |
| Figura 85. Disposição da camada impressa de acordo com a direção da carga de tração: (a) Orientação horizontal e (b) Orientação vertical (CALIGNANO, GIUFFRIDA e GALATI, 2021)..... | 126 |
| Figura 86. Curvas de tensão x deformação para amostras de PA12 impressas em MJF orientadas em a) horizontal e b) 25°, com variações de taxa de força. Adaptado de Abdallah, Ali e Pervaiz (2022)..... | 127 |
| Figura 87. Gráfico comparando médias e desvios padrões dos resultados de Módulo elástico (MPa) das orientações avaliadas..... | 127 |
| Figura 88. Gráficos de resíduos para os testes de ANOVA One Way e normalidade dos dados de módulo elástico..... | 129 |
| Figura 89. Gráfico comparando médias e desvios padrões dos resultados de Alongamento até ruptura (Deformação até ruptura, %) das orientações avaliadas. | 130 |
| Figura 90. Esquema demonstrando a interação entre a direção de camadas e direção de aplicação da força de tração..... | 131 |
| Figura 91. Gráficos de resíduos para os testes de ANOVA One Way e normalidade dos dados de alongamento..... | 132 |
| Figura 92. Gráfico normal de efeitos padronizados do modelo de superfície de resposta para a resposta de Alongamento..... | 133 |
| Figura 93. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para o Alongamento. | 134 |
| Figura 94. Área transversal das medições dimensionais da região central das amostras de tração. | 135 |
| Figura 95. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para a área transversal média das regiões centrais das amostras de tração..... | 137 |
| Figura 96. Amostras dos ensaios de impacto após a realização dos testes, com as orientações avaliadas marcadas. | 137 |
| Figura 97. Gráfico comparando médias e desvios padrões dos resultados de Resistência ao impacto (KJ/m ²) das orientações avaliadas. | 138 |
| Figura 98. Exemplos de amostras de impacto fraturadas, com características de fratura frágil. | 139 |

| | |
|--|-----|
| Figura 99. Amostra de impacto da orientação 45°/45°, detalhamento com maior proximidade a região fraturada na esquerda e uma micrografia com aproximação de 6,4 x da face fraturando revelando as porosidades. | 139 |
| Figura 100. Gráficos de resíduos para os testes de ANOVA One Way e normalidade dos dados de resistência ao impacto. | 140 |
| Figura 101. Gráfico de área transversal para as amostras de impacto nas diferentes orientações avaliadas..... | 141 |
| Figura 102. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para a área transversal média das amostras de impacto. | 143 |
| Figura 103. Medições de massas seco, imerso e “cozido”, para cálculo de porosidade aparente. | 144 |
| Figura 104. Gráfico de porosidade aparente para as orientações avaliadas, em ordem crescente considerando o ângulo em relação ao plano XZ. | 145 |
| Figura 105. Gráficos de resíduos para os testes de ANOVA One Way e normalidade dos dados de porosidade aparente..... | 146 |
| Figura 106. Gráfico normal de efeitos padronizados do modelo de superfície de resposta para a resposta de Alongamento. | 147 |
| Figura 107. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para o porosidade aparente | 147 |
| Figura 108. Gráfico de DSC para teste com pó virgem do PP para MJF. | 148 |
| Figura 109. Gráfico de DSC para teste com as duas extremidades da amostra de tração a 0°/45°, com vista lateral da peça e direções de deposição de camadas e de movimento das lâmpadas de radiação infravermelha..... | 150 |
| Figura 110. Gráfico de DSC para teste com as duas extremidades da amostra de tração a 45°/45°, com vista lateral da peça e direções de deposição de camadas e de movimento das lâmpadas de radiação infravermelha..... | 150 |
| Figura 111. Gráfico de DSC para teste com as duas extremidades da amostra de tração a 90°/45°, com vista lateral da peça e direções de deposição de camadas e de movimento das lâmpadas de radiação infravermelha..... | 150 |
| Figura 112. Gráfico de DSC para teste com as duas extremidades da amostra de tração a 45°/0°, com vista superior da peça e direções de deposição de camadas e de movimento das lâmpadas de radiação infravermelha..... | 151 |

| | |
|--|-----|
| Figura 113. Gráfico de DSC para teste com as duas extremidades da amostra de tração a 45°/45°, com vista superior da peça e direções de deposição de camadas e de movimento das lâmpadas de radiação infravermelha. | 151 |
| Figura 114. Gráfico de DSC para teste com as duas extremidades da amostra de tração a 45°/90°, com vista superior da peça e direções de deposição de camadas e de movimento das lâmpadas de radiação infravermelha. | 151 |
| Figura 115. Resultados de Taxa de cristalinidade para as amostras variando o ângulo em relação ao plano XY..... | 153 |
| Figura 116. Diferença no gradiente térmico em relação a área afetada pelo movimento de deposição de energia infravermelha, para peças com áreas transversais diferentes..... | 153 |
| Figura 117. Diferença no gradiente térmico em relação a área afetada pelo movimento de deposição de energia infravermelha, para peças com áreas transversais iguais, mas orientadas de forma diferente..... | 154 |
| Figura 118. Resultados de Taxa de cristalinidade para as amostras variando o ângulo em relação ao plano XZ. | 155 |
| Figura 119. Gráficos para médias de a) Taxa de cristalinidade das orientações testadas e b) Temperatura de fusão das orientações testadas. | 155 |
| Figura 120. Face da fratura de tração de amostra orientada em 0°/45°..... | 156 |
| Figura 121. Face da fratura de tração de amostra orientada em 45°/ 0°..... | 157 |
| Figura 122. Face da fratura de tração de amostra orientada em 45°/45°..... | 157 |
| Figura 123. Face da fratura de tração de amostra orientada em 45°/90°..... | 157 |
| Figura 124. Face da fratura de tração de amostra orientada em 90°/45°..... | 158 |
| Figura 125. Esquema demonstrando como ocorre o efeito de capilaridade nas peças impressas por MJF, adaptado de Mele et al. (2021)..... | 159 |
| Figura 126. Micrografias de amostra orientada em 0°/45° para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes. | 160 |
| Figura 127. Micrografias de amostra orientada em 13°/13° para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes. | 161 |
| Figura 128. Micrografias de amostra orientada em 13°/77° para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de | |

| | |
|--|-----|
| 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes. | 161 |
| Figura 129. Micrografias de amostra orientada em 45°/0° para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes. | 162 |
| Figura 130. Micrografias de amostra orientada em 45°/45° para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes. | 162 |
| Figura 131. Micrografias de amostra orientada em 45°/90° para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes. | 163 |
| Figura 132. Micrografias de amostra orientada em 77°/13° para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes. | 163 |
| Figura 133. Micrografias de amostra orientada em 77°/77° para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes. | 164 |
| Figura 134. Micrografias de amostra orientada em 90°/45° para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes. | 164 |
| Figura 135. Efeitos de escada observados nas superfetes das peças impressas em MJF para a) o presente trabalho (orientação 45°/0° como exemplo), b) o trabalho de Yelamanchi et al. (2021) e c) o trabalho de Nazir e Jeng (2019). | 165 |
| Figura 136. Indicações das cavidades e porosidades presentes nas micrografias analisadas, com a micrografia da amostra orientada em 0°/45° como referência. | 166 |
| Figura 137. Distribuição de danos por métodos de elementos finitos em diferentes níveis de deformação axial: (a) 0,83%, (b) 2,0%, (c) 5,0%, (d) 10,0%, (e) 15,0% e (f) 19,0%. As regiões marcadas por curvas traço preto atingem o limite de dano. A modelagem dos poros nas peças | |

| | |
|--|-----|
| de PA12 foram obtidas por medições reais de amostras de PA12 por microCT (CHEN et al., 2021)..... | 166 |
| Figura 138. Gráfico de distribuição de camadas (Área transversal das camadas) para as cubas simuladas com 20 peças no modelo experimental de análise de processo..... | 168 |
| Figura 139. Gráfico de distribuição de camadas (Área transversal das camadas) para as cubas simuladas com 40 peças no modelo experimental de análise de processo..... | 168 |
| Figura 140. Gráfico de distribuição de camadas (Área transversal das camadas) para as cubas simuladas com 60 peças no modelo experimental de análise de processo..... | 169 |
| Figura 141. Gráfico para Área transversal média estimadas para as cubas simuladas..... | 169 |
| Figura 142. Exemplos para as análises de risco executadas, para cubas com 6, 20, 40, 60 e 74 peças. | 170 |
| Figura 143. Gráfico normal de efeitos padronizados do modelo de superfície de resposta para a resposta de Área transversal média. | 172 |
| Figura 144. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para a Área transversal média, com quantidade de peças na cuba fixada em 40 unidades e para a peça selecionada..... | 172 |
| Figura 145. Gráficos de altura total de cuba e tempo estimado de impressão para as cubas simuladas. | 173 |
| Figura 146. Gráfico normal de efeitos padronizados do modelo de superfície de resposta para a resposta de Tempo estimado de impressão..... | 174 |
| Figura 147. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para o Tempo estimado de impressão, com quantidade de peças na cuba fixada em 60 unidades e para a peça selecionada..... | 175 |
| Figura 148. Gráfico para custo estimado de impressão das cubas simuladas. | 176 |
| Figura 149. Gráfico normal de efeitos padronizados do modelo de superfície de resposta para a resposta de Custo estimado de impressão..... | 179 |
| Figura 150. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para o Custo estimado de impressão, para uma quantidade peças fixada em 60 unidades e para a peça selecionada..... | 179 |
| Figura 151. Gráfico para densidade de empacotamento das cubas simuladas em %. A porcentagem total representa também o total de material consumido na impressão, enquanto 10% desse material consumido é descartado no pós-processamento..... | 180 |
| Figura 152. Representação da região afetada pelo agente de detalhamento no processo MJF, que é descartada durante o pós-processamento. | 180 |

| | |
|---|-----|
| Figura 153. Gráfico normal de efeitos padronizados do modelo de superfície de resposta para a resposta de Densidade de empacotamento..... | 182 |
| Figura 154. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para a Densidade de empacotamento, para uma quantidade peças fixada em 60 unidades e para a peça selecionada..... | 182 |
| Figura 155. Exemplo de otimização de resposta combinada para minimização da porosidade e maximização da resistência a tração, possível por meio dos resultados obtidos no trabalho. | 186 |
| Figura 156. Exemplo de otimização de resposta combinada para minimização da área transversal média e minimização do tempo estimado de impressão, possível por meio dos resultados obtidos no trabalho. Considerando uma quantidade de peças fixada em 60 unidades, para a peça testada..... | 188 |
| Figura 157. Exemplo de otimização de resposta combinada para minimização da área transversal média e maximização da densidade de empacotamento, possível por meio dos resultados obtidos no trabalho. Considerando uma quantidade de peças fixada em 60 unidades, para a peça testada..... | 189 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1. Benefícios da manufatura aditiva nas áreas de design e engenharia, manufatura e serviços (BROMBERGER E KELLY, 2017). | 37 |
| Tabela 2. Impactos e aplicações da MA na Indústria 4.0 (MEHRPOUYA et al., 2019; ZHANG et al., 2020). | 39 |
| Tabela 3. Terminologias das classificações de tecnologias de manufatura aditiva conforme as normas ISO ASTM 52900 de 2015 e ABNT NBR 52900 de 2018. | 42 |
| Tabela 4. Disponibilidade geral de materiais para manufatura aditiva, por tipo de tecnologia e forma de matéria-prima (ASM INTERNATIONAL, 2020; SINGH, RAMAKRISHNA e SINGH, 2017; TOFAIL et al., 2018)..... | 48 |
| Tabela 5. Principais softwares compatíveis com MA com funções de otimização e gestão de arquivos e de processos (Gibson et al., 2021; Sotomayor, Caiazza e Alfieri, 2021) | 61 |
| Tabela 6. Principais características da impressora HP MJF 5200 (HP, 2020a). | 65 |
| Tabela 7. Principais etapas do fluxo de trabalho das impressoras Multi Jet Fusion (HP, 2020). | 67 |
| Tabela 8. Propriedades gerais do PP para MJF, disponibilizado pela Basf (HP, 2020)..... | 74 |
| Tabela 9. Resultados para parâmetros de rugosidade de peças de PA11 impressas em MJF com diferentes orientações de impressão (SAĞBAŞ, 2020)..... | 86 |
| <i>Tabela 10. Detalhamentos das etapas do trabalho</i> | 97 |
| Tabela 11. Relação dos ensaios e análises técnicas planejadas para o projeto de pesquisa. .. | 102 |
| Tabela 12. Orientações associadas aos códigos ressaltados nas amostras. | 103 |
| Tabela 13. Índices da Análise de variância dos dados individuais de resistência a tração. ... | 122 |
| Tabela 14. Análise de variância da Resistência a tração. | 123 |
| Tabela 15. Índices da Análise de variância dos dados individuais de modulo elástico. | 128 |
| Tabela 16. Análise de variância do Modulo elástico..... | 129 |
| Tabela 17. Índices da Análise de variância dos dados individuais de alongamento até ruptura. | 132 |
| Tabela 18. Análise de variância do Alongamento..... | 133 |
| Tabela 19. Índices da Análise de variância dos dados individuais de espessura, largura e área transversal das regiões centrais das amostras de tração. | 135 |
| Tabela 20. Análise de variância das dimensões das regiões centrais das amostras de tração no modelo de superfície de resposta..... | 136 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 21. Índices da Análise de variância dos dados individuais de resistência ao impacto. | 140 |
| Tabela 22. Análise de variância da Resistência ao impacto. | 141 |
| Tabela 23. Índices da Análise de variância dos dados individuais de espessura, largura e área transversal das amostras de impacto. | 142 |
| Tabela 24. Análise de variância das dimensões amostras de impacto no modelo de superfície de resposta..... | 142 |
| Tabela 25. Índices da Análise de variância dos dados individuais de porosidade aparente. . | 145 |
| Tabela 26. Análise de variância da porosidade aparente. | 146 |
| Tabela 27. Análise de variância da área transversal média..... | 171 |
| Tabela 28. Análise de variância do tempo estimado de impressão..... | 173 |
| Tabela 29. Comparações de projeções de custo acumulado para um cenário com 10 lotes por mês em um período de um ano. | 177 |
| Tabela 30. Análise de variância do custo estimado de impressão. | 178 |
| Tabela 31. Análise de variância para a densidade de empacotamento. | 181 |
| Tabela 32. Indicações de otimização obtidas no trabalho pelo modelo experimental de análise das peças. | 184 |
| Tabela 33. Indicações de otimização obtidas no trabalho pelo modelo experimental de análise do processo..... | 187 |

SUMÁRIO

| | | |
|---------|---|-----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 25 |
| 1.1 | OBJETIVOS..... | 30 |
| 1.1.1 | <i>Objetivo Geral</i> | 30 |
| 1.1.2 | <i>Objetivos Específicos</i> | 30 |
| 1.2 | LIMITES E LIMITAÇÕES | 31 |
| 1.3 | ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO | 32 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 33 |
| 2.1 | MANUFATURA ADITIVA..... | 33 |
| 2.1.1 | <i>Manufatura aditiva e Indústria 4.0</i> | 38 |
| 2.1.2 | <i>Maturidade tecnológica</i> | 41 |
| 2.1.3 | <i>Tecnologias de manufatura aditiva</i> | 42 |
| 2.1.4 | <i>Fusão em leito de pó (Powder bed fusion – PBF)</i> | 44 |
| 2.1.5 | <i>Materiais na manufatura aditiva</i> | 47 |
| 2.1.6 | <i>Manufatura aditiva de polímeros</i> | 54 |
| 2.1.7 | <i>Softwares de gestão de impressão na manufatura aditiva</i> | 58 |
| 2.2 | MULTI JET FUSION (MJF)..... | 61 |
| 2.2.1 | <i>Equipamentos de impressão por MJF</i> | 64 |
| 2.2.2 | <i>Fluxo de trabalho no processo MJF</i> | 67 |
| 2.2.3 | <i>Agentes funcionais</i> | 69 |
| 2.2.4 | <i>Materiais aplicados no processo MJF</i> | 72 |
| 2.2.5 | <i>Polipropileno</i> | 73 |
| 2.2.6 | <i>Parâmetros do processo MJF</i> | 80 |
| 2.2.7 | <i>Orientação espacial das peças</i> | 80 |
| 2.2.8 | <i>Posicionamento das peças na cuba de impressão</i> | 89 |
| 2.2.9 | <i>Taxa de mistura do material</i> | 92 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 95 |
| 3.1 | AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS PEÇAS DE POLIPROPILENO | 99 |
| 3.1.1 | <i>Planejamento experimental</i> | 99 |
| 3.1.2 | <i>Fabricação das amostras</i> | 103 |
| 3.1.2.1 | <i>Modelagem e otimização da cuba de impressão</i> | 103 |
| 3.1.2.2 | <i>Materiais e impressão das amostras</i> | 104 |
| 3.1.3 | <i>Ensaio mecânicos</i> | 105 |
| 3.1.3.1 | <i>Ensaio de tração</i> | 106 |
| 3.1.3.2 | <i>Ensaio de impacto</i> | 106 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.1.3.3 | <i>Medições dimensionais</i> | 107 |
| 3.1.4 | <i>Porosidade aparente</i> | 107 |
| 3.1.5 | <i>Ensaio térmico</i> | 108 |
| 3.1.6 | <i>Análises morfológicas</i> | 109 |
| 3.2 | AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PROCESSO MJF..... | 110 |
| 3.2.1 | <i>Planejamento experimental das simulações de cubas</i> | 110 |
| 3.2.2 | <i>Modelagem e configuração das cubas</i> | 111 |
| 3.2.3 | <i>Obtenção de dados e análise de custos</i> | 113 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 115 |
| 4.1 | FABRICAÇÃO DE AMOSTRAS..... | 115 |
| 4.2 | ENSAIOS MECÂNICAS..... | 118 |
| 4.2.1 | <i>Ensaio de tração</i> | 118 |
| 4.2.1 | <i>Ensaio de impacto</i> | 137 |
| 4.3 | POROSIDADE APARENTE..... | 143 |
| 4.4 | ENSAIO TÉRMICO..... | 148 |
| 4.4.1 | <i>Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) do PP particulado</i> | 148 |
| 4.4.2 | <i>Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) das amostras de PP impressas</i> | 148 |
| 4.5 | ANÁLISES MORFOLÓGICAS..... | 156 |
| 4.5.1 | <i>Micrografias das fraturas de tração</i> | 156 |
| 4.5.1 | <i>Micrografias das superfícies externas e internas</i> | 159 |
| 4.6 | ANÁLISES DO PROCESSO POR SIMULAÇÃO DE CUBAS..... | 167 |
| 4.6.1 | <i>Distribuição de camada e análise de risco</i> | 167 |
| 4.6.2 | <i>Comparações de desempenho do processo</i> | 172 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 183 |
| 5.1 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 189 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 191 |
| | PRODUÇÃO TÉCNICA E CIENTÍFICA..... | 197 |

1 INTRODUÇÃO

A indústria 4.0, ou quarta revolução industrial é marcada pelo uso de dados, sistemas ciberfísicos e maior automação dos processos. Com a crescente adoção da também chamada revolução digital, veio a necessidade de sistemas produtivos capazes de impulsionar estas transformações. A manufatura aditiva é considerada como um dos pilares da indústria 4.0 devido sua capacidade de promover maior controle na produção, maior customização, digitalização, produtividade, monitoração e automação, além de diversos outros fatores que vêm consolidando cada vez mais a manufatura aditiva em diversos setores industriais como automotivo, de bens de consumo, médico, aeroespacial, energia, óleo e gás, defesa e eletrônicos. Os levantamentos acerca do mercado da manufatura aditiva em geral demonstram uma taxa de crescimento anual superior de 20% até 2025, como apresentado na Figura 1. Em 2019 o mercado anual de MA no geral ultrapassou o valor de 10 bilhões de dólares, e é previsto que até 2025 passe os 30 bilhões e que em 2029 ultrapasse os 50 bilhões (SMARTECH, 2021).

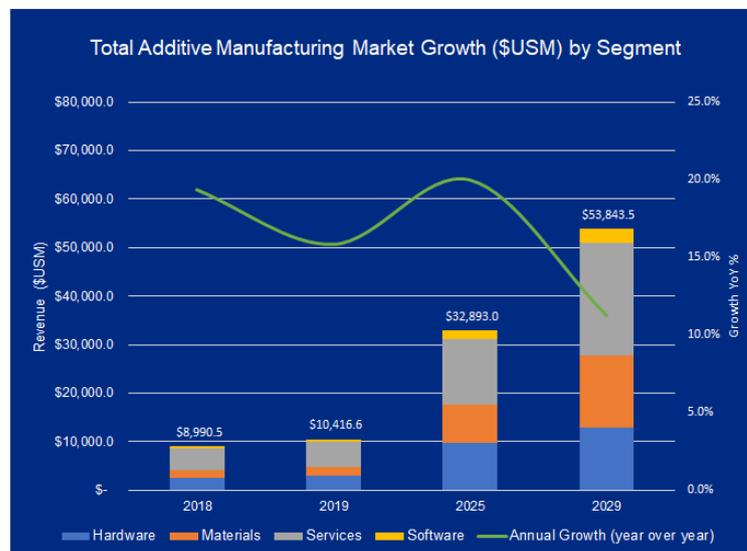


Figura 1. Perspectivas de crescimento de mercado para a manufatura aditiva (SMARTECH, 2021).

A MA possui uma série de diferentes processos que são categorizados em sete classificações tecnológicas principais que utilizam como base para definição o tipo de ligação entre os materiais, a forma do material que é depositado no sistema (líquido, particulado, laminado, filamento), as operações de deposição e união do processo e a fonte e tipos de energia aplicada. Esses grupos de tecnologias são definidos como Jateamento de aglutinante, Fusão em leito de pó, Deposição de energia direcional, Laminação de folhas, Jateamento de material, Extrusão de material e Fotopolimerização em cuba. Dentre estas categorias de manufatura aditiva pode-se dar um destaque aos processos de fusão em leito de pó devido a suas vantagens

tais como a alta resolução e alta qualidade de impressão, que o tornam adequado para impressão de estruturas complexas usadas em diversas indústrias para aplicações simples e até avançadas, menores taxas de desperdício de material, possibilidade de processar polímeros, cerâmicas, metais e compósitos, dentre outras (NGO et al., 2018; ASM INTERNATIONAL, 2020). Especialmente quanto ao mercado de manufatura aditiva com polímeros, esta categoria tem a maior projeção de crescimento e espera-se que seja o principal atuante neste setor (SMARTTECH, 2018).

Em um estudo realizado por Silva et al. (2021), foi executada uma análise de dados por meio da metodologia de curvas S, a abordagem de suavização exponencial para avaliar a maturidade das tecnologias de manufatura aditiva em termos de publicações de trabalhos científicos e de patentes. A Figura 2 apresenta a curva S para estratégias de busca com foco em manufatura aditiva enquanto a Figura 3 apresenta a curva S para estratégias de busca com foco nas tecnologias de Fusão em leito de pó (*Powder bed fusion*) e nas tecnologias de manufatura em geral. Estes resultados demonstram que a MA esté em fase inicial de crescimento, avançando significativamente em desenvolvimento de tecnologias nos últimos anos. Este comportamento foi encontrado também no estudo de Nicolás et al. (2018) para algumas categorias de processos de manufatura aditiva, por uma análise de maturidade de tecnologia com base em curvas S para determinar o nível de preparação de tecnologia (TRL - *Technology Readiness Level*) das diferentes categorias de processos de manufatura aditiva. Eles identificaram que as tecnologias de jateamento de aglutinante e laminação de folhas estão em TRL 1-2 e a deposição de energia direcionada é classificada como TRL 4-5. Já as categorias de fusão de leito de pó, extrusão de material, jato de material e fotopolimerização em cuba são classificadas como TRL 6-7, como processos de maior avanço tecnológico, de acordo com o indicador TRL, que é a abordagem mais aceita para avaliação da maturidade tecnológica em escala numérica padronizada, desenvolvida pela *US National Aeronautics and Space Administration* (NASA).

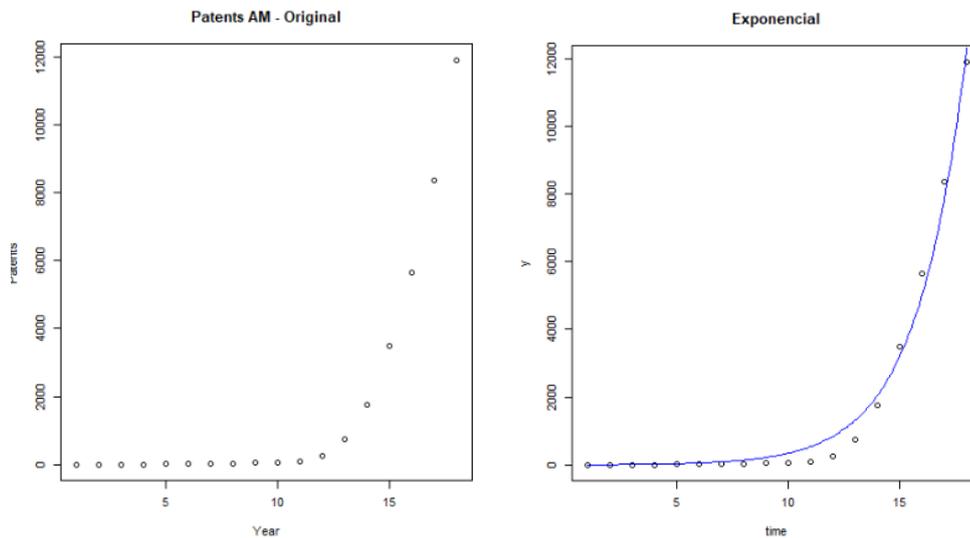


Figura 2. Gráficos de crescimento anual acumulado de patentes de MA, análise de curva S (SILVA et al., 2021).

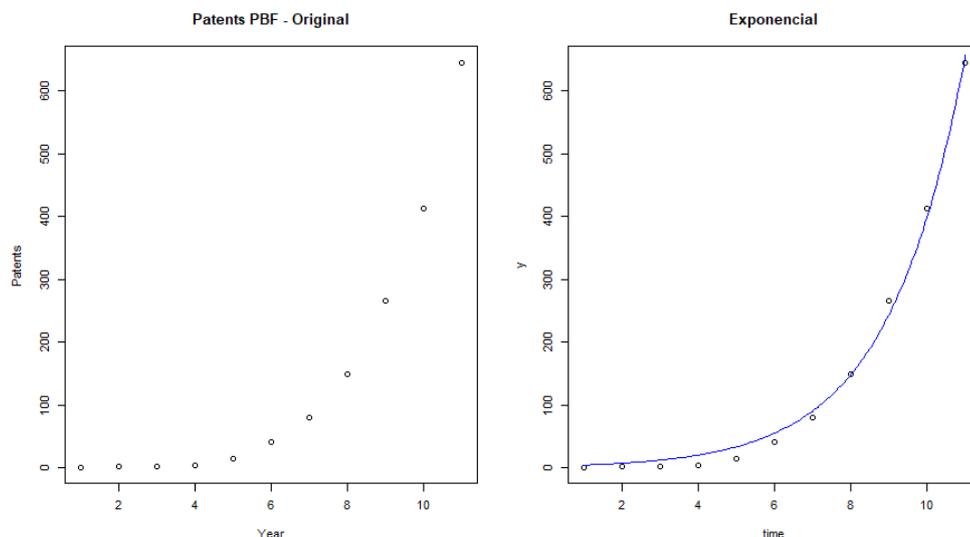


Figura 3. Gráficos de crescimento anual acumulado de patentes envolvendo tecnologias de fusão em leito de pó, análise de curva S (SILVA et al., 2021).

A tecnologia de manufatura aditiva desenvolvida pela HP para fusão em leito de pó de materiais poliméricos chamada de Multi Jet Fusion ou MJF, vem se destacando entre este tipo de categoria devido as diversas melhorias identificadas em estudos focados neste processo, como melhor desempenho mecânico das peças impressas, menor incidência de defeitos, menor tempo de impressão, melhor qualidade de impressão, maior eficiência energética, menor custo de produção e maior taxa de crescimento de mercado ao se comparar com tecnologias concorrentes de fusão em leito de pó para polímeros (LEE et al., 2020; LONDON, 2020; XU et al., 2020). No mercado o MJF tem se destacado também pelo alto crescimento na sua adoção, mesmo competindo com tecnologias presente no mercado por mais tempo. A Figura 4 indica comparações de taxa de crescimento de venda de máquinas entre algumas tecnologias de

manufatura aditiva para polímeros, com o MJF como a segunda com mais taxa, de 15 % de crescimento anual previsto até 2024, além de possuir uma taxa de crescimento de mercado positiva de 8 % para as tecnologias de fusão em leito de pó (XU et al., 2020).

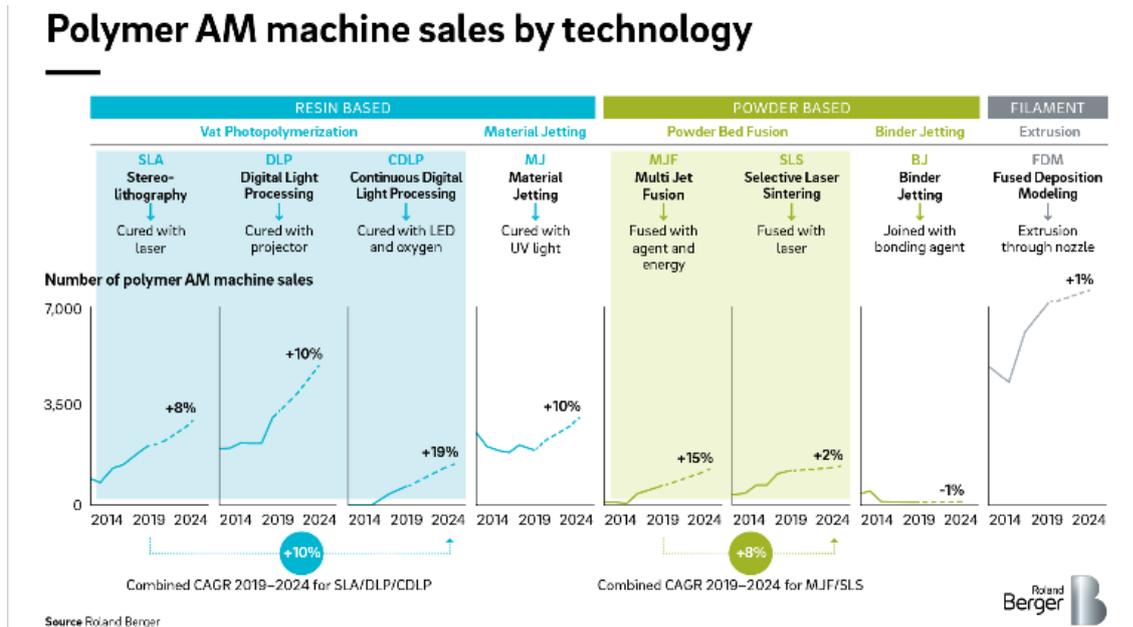


Figura 4. Comparações de crescimento de vendas de equipamentos de manufatura aditiva de polímeros por tipo de processo e taxas de crescimento de mercado. (XU et al., 2020).

Quando ao desenvolvimento de pesquisa, também é identificado um grande interesse por estas tecnologias. A Figura 5 apresenta gráficos de publicações acumuladas para a manufatura aditiva, em “a)” considerando uma curva para manufatura aditiva em geral (“*additive manufacturing**” OR “*3d printing**”) e para processos de fusão em leito de pó (“*additive manufacturing**” OR “*3d printing**”) AND (“*powder bed fusion*” OR “*selective laser sintering*” OR “*Multi Jet Fusion*” OR “*high speed sintering*”). Enquanto “b)” considera as curvas para a tecnologia MJF (“*additive manufacturing**” OR “*3d printing**”), MJF com filtro para publicações sobre orientação de impressão (“*additive manufacturing**” OR “*3d printing**”) AND (“*Multi Jet Fusion*” OR “*mjf*”) AND (“*orientation*” OR “*build orientation*” OR “*printing orientation*”), MJF com filtro para publicações sobre polipropileno (“*additive manufacturing**” OR “*3d printing**”) AND (“*Multi Jet Fusion*” OR “*mjf*”) AND (“*polypropylene*”) e considerando a combinação dos dois filtros (“*additive manufacturing**” OR “*3d printing**”) AND (“*Multi Jet Fusion*” OR “*mjf*”) AND (“*orientation*” OR “*build orientation*” OR “*printing orientation*”) AND (“*polypropylene*”). Esta busca foi realizada no banco de dados do portal Web of Science e considerou apenas as publicações realizadas até o ano de 2022. Pelo primeiro gráfico é evidente um comportamento de crescimento exponencial tanto no contexto

geral como para processos de fusão em leito de pó, indicando que estas temáticas estão no topo do estado da arte, em fases de crescimento quanto ao desenvolvimento de pesquisas científicas. O mesmo pode ser identificado quanto as publicações referentes ao MJF. Considerado uma tecnologia relativamente nova, já demonstra grande envolvimento no meio acadêmico e científico, com 109 publicações totais até o ano de 2022.

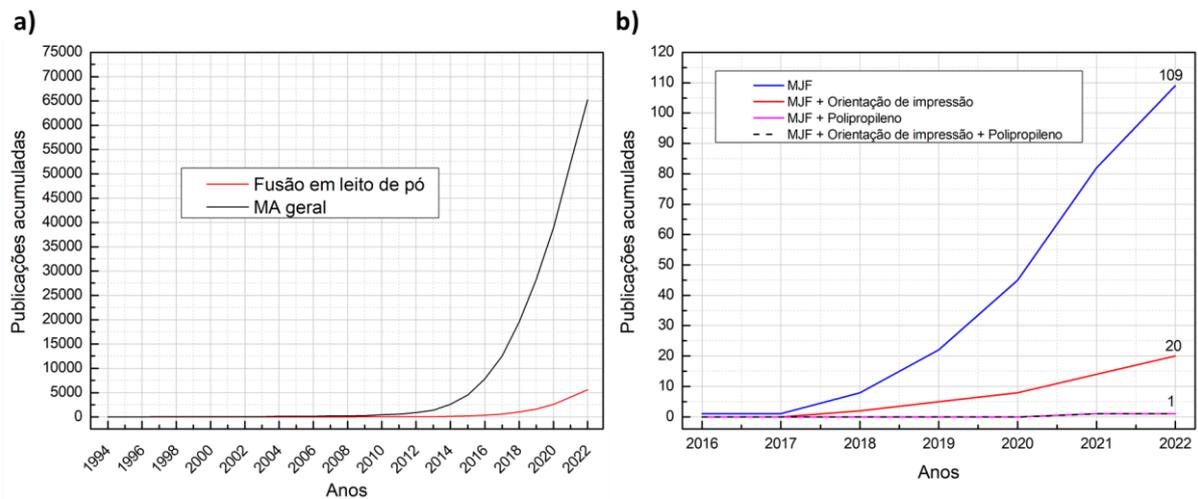


Figura 5. Crescimento de publicações anuais acumuladas, a) para manufatura aditiva em geral e para processos de fusão em leito de pó e b) para Multi Jet Fusion considerando estudos de orientação de impressão e com polipropileno. Fonte própria.

Embora o número de pesquisas tenha aumentado ainda existem oportunidades de estudos acerca da tecnologia MJF. Em geral os objetivos destes estudos visam entender características de materiais e os parâmetros dos processos de manufatura aditiva, entendendo a correlação entre estes dois fatores e como implementar este conhecimento na produção de peças. Quanto a parâmetros de processo, na manufatura aditiva a orientação espacial de impressão é considerada como um parâmetro chave capaz de influenciar diversos fatores como desempenho de processo e propriedades finais das peças (ASM INTERNATIONAL, 2020). Assim entender como esse parâmetro atua em um processo de manufatura aditiva é crucial para tirar proveito deste processo e melhor adequar aplicações e desempenho, além de mitigar defeitos ou reduzir desperdícios. O MJF é capaz de processar materiais termoplásticos, como poliamida 11, poliamida 12 e polipropileno, alguns termoplásticos elastômeros, como poliuretano termoplástico e a poliamida termoplástico e um material compósito, a poliamida 12 preenchida com esferas de vidro. Dentre estes, a grande maioria das publicações sobre MJF teve como foco as poliamidas, com significativamente menos considerações quanto a elastômeros, compósitos ou o polipropileno. Até então apenas uma publicação teve como foco o polipropileno, publicada em 2021, por Safka et al. (2021), que embora tenha avaliado a

orientação de impressão, o modelo experimental proposto em seu estudo gerou resultados com muita variação e inconclusivos quanto ao efeito deste parâmetro.

Desta forma, considerando a alta relevância, tanto nos setores industriais como na pesquisa científica, e considerando as lacunas em pesquisas acerca da tecnologia de manufatura aditiva Multi Jet Fusion, este trabalho propõe um estudo para avaliação da influência da orientação de impressão no desempenho de peças de polipropileno impressas via Multi Jet Fusion. A avaliação desta influência tem como intuito a otimização do processo, pelo controle do parâmetro orientação de impressão. Para tal, foram variados diferentes ângulos de posicionamento em relação aos planos horizontal e vertical, de forma a poder se aplicar a metodologia de planejamento experimental de superfície de resposta. Através deste modelo experimental foi possível analisar o desempenho do material processado por MJF em termos de propriedades mecânicas (análise tecnológica) e analisar o desempenho do processo em si em termos de produtividade, custo e consumo de material (análise gerencial), de forma a obter orientações claras e objetivas de como controlar o parâmetro de orientação espacial de impressão para otimizar estas características.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Investigar a tecnologia de manufatura aditiva Multi Jet Fusion e suas características, identificando como a orientação espacial de impressão influenciam do desempenho de peças de polipropileno e do processo e como otimizá-los.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar desempenho mecânico, morfologia e propriedades térmicas de amostras de polipropileno impressas por Multi Jet Fusion;
- Analisar desempenho do processo Multi Jet Fusion em termos de produtividade, custo e consumo de material (polipropileno);
- Estabelecer indicações de orientação espacial de impressão para otimização do desempenho de peças de polipropileno impressas por Multi Jet Fusion e do desempenho do processamento deste material.

1.2 Limites e Limitações

Processos de manufatura aditiva possuem em geral altos custos de fabricação devido ao custo de matéria-prima e custos operacionais. Desta forma, para o desenvolvimento deste trabalho, precisou-se considerar uma metodologia que buscasse obter resultados significativos, contudo de forma otimizada. Para isso, foi selecionada a utilização de métodos estatísticos, no caso de planejamento experimental (*Design of experiments* – DOE) para uma estruturação experimental otimizada que pudesse responder às questões levantadas sem a necessidade de fabricação exagerada de amostras, poupando custos e tempo de fabricação. Como meta foi estabelecido um planejamento experimental que constasse em apenas uma cuba de impressão, ou seja, que em uma única impressão fosse possível obter todas as amostras necessárias para a realização do estudo.

Outra limitação é o prazo de desenvolvimento do projeto de estudo, com 2 anos de duração, sendo necessário um planejamento experimental que conseguisse cumprir com estes prazos. O uso de métodos estatísticos visa também adequar a quantidade de experimentos para atender a este prazo.

Quanto à análise do processo, optou-se pelas simulações de cubas ao invés de impressões reais, pois considerando que a análise envolve um grande número de cubas de impressão, a fabricação real destas cubas representaria em custos muito elevados. Assim, as cubas foram apenas simuladas no software de gestão de impressão Materialise Magics, que é recomendado pela HP, fabricante das impressoras de MJF, devido ao seu módulo próprio desenvolvido para estas impressoras e pelas análises capazes de prever com confiança características do processo de impressão.

Outra limitação seria quanto ao acesso à infraestrutura necessária para a realização das análises descritas na metodologia. Devido à ausência de equipamentos que permitam a execução de algumas técnicas de análise mais avançadas na infraestrutura disponível, como o caso da microtomografia computadorizada para mapeamento escaneado digital de porosidade ou uso de escaneadores digitais para avaliações dimensionais, foi preciso encontrar meios de realizar o estudo proposto com os meios e equipamentos disponíveis, como exemplo, o uso do método de Arquimedes para avaliação de porosidade. Embora este possa não ser tão preciso quanto uma microtomografia, é capaz de gerar resultados que possam trazer análises importantes para este estudo.

1.3 Organização do Documento

O trabalho a seguir é aberto pela revisão bibliográfica, que se inicia com uma introdução abrangente da manufatura aditiva, abordando histórico, definições, seu papel na indústria 4.0, categorias e processos e materiais e em seguida se afunila quanto ao processo Multi Jet Fusion com um grande aprofundamento em detalhes sobre esta tecnologia trazendo informações sobre equipamentos, materiais, parâmetros, peculiaridades e o estado da arte.

Em seguida é apresentada toda a metodologia do estudo com uma visão geral, para assim ser descrito os detalhes de cada atividade e etapa desenvolvida na execução do estudo. Iniciando com o planejamento experimental e análises da avaliação das amostras de polipropileno e seguindo com o planejamento experimental e análises da avaliação do processo Multi Jet Fusion.

Os resultados são apresentados seguindo a mesma divisão da metodologia, com as análises correspondentes a cada teste executado e as análises estatísticas aplicadas com os dados obtidos. O trabalho finaliza com a conclusão que levanta os principais pontos observados no estudo e as indicações de otimização de resposta, com exemplos de utilizar algumas destas indicações, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Manufatura Aditiva

Através dos avanços tecnológicos e da digitalização dos processos, a indústria nacional e mundial está enfrentando mercados cada vez mais exigentes, com maiores demandas de qualidade e responsividade. Para se adaptar a estes novos mercados, a indústria mundial se vê diante do movimento denominado como Indústria 4.0, a quarta revolução industrial, pautada na digitalização da indústria, pela adoção de tecnologias que otimizem os processos produtivos, potencializando a capacidade de respostas das empresas aos mercados com demandas cada vez mais variáveis e mais competitivas (HALEEM e JAVAID, 2019; MEHRPOUYA *et al.*, 2019).

A Indústria 4.0 usa os benefícios da integração de tecnologias de manufatura modernas e sistemas de informação para promover capacidades de produção, melhorando a competitividade a longo prazo, otimizando mão de obra, energia e material para entregar produtos e serviços de alta qualidade e encontrar uma resposta rápida para a alta variação de demandas do mercado. A Indústria 4.0 se pauta em 9 pilares, que são categorias de tecnologias classificadas como as tecnologias habilitadoras da quarta revolução industrial, a saber, a robótica, a realidade aumentada, as simulações, a integração de sistemas, a internet das coisas (IoT), a segurança da informação, a computação em nuvem, a manufatura aditiva e a *Big Data*, como ilustrado na Figura 6 (HALEEM e JAVAID, 2019; MEHRPOUYA *et al.*, 2019).



Figura 6. As nove categorias das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 (CHESINI, 2021).

Segundo as normas ABNT, ASTM e ISO, a manufatura aditiva é definida como processo de união de materiais para fazer peças a partir de dados de modelos 3D, geralmente

camada sobre camada, em oposição às metodologias de manufatura subtrativa e manufatura formativa, como é ilustrado na Figura 7. A manufatura aditiva é conhecida informalmente pelo termo antigo impressão 3D, que hoje está mais associado a equipamentos de uso pessoal, enquanto os equipamentos de MA estão mais atrelados a indústria, com focos que hoje extrapolam a prototipagem, para atender a produção escalável de produtos prontos para o uso final. A Figura 8 e a Figura 9 apresentam a evolução histórica das tecnologias de MA, desde os conceitos experimentais até os processos comerciais.

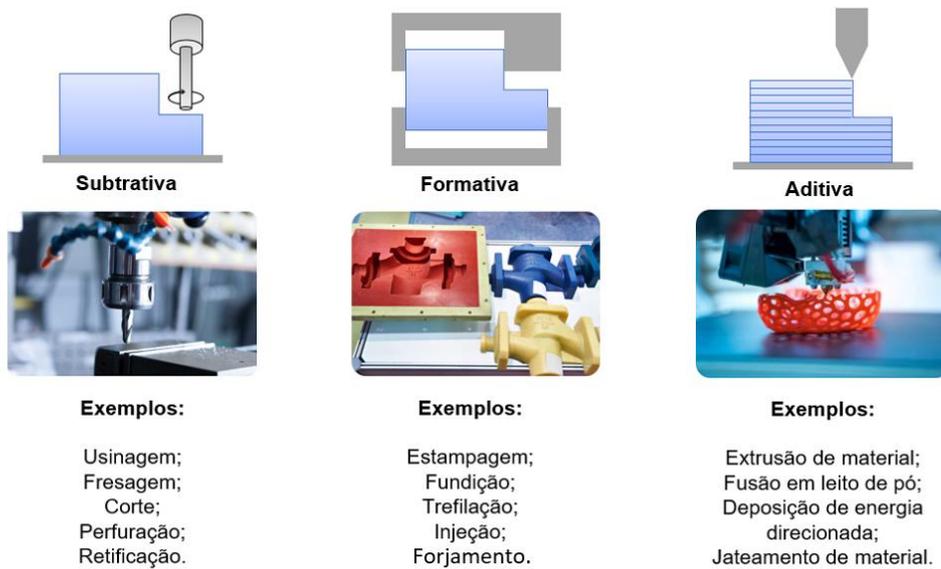


Figura 7. Ilustração e exemplos das manufaturas subtrativa, formativa e aditiva. Fonte própria.

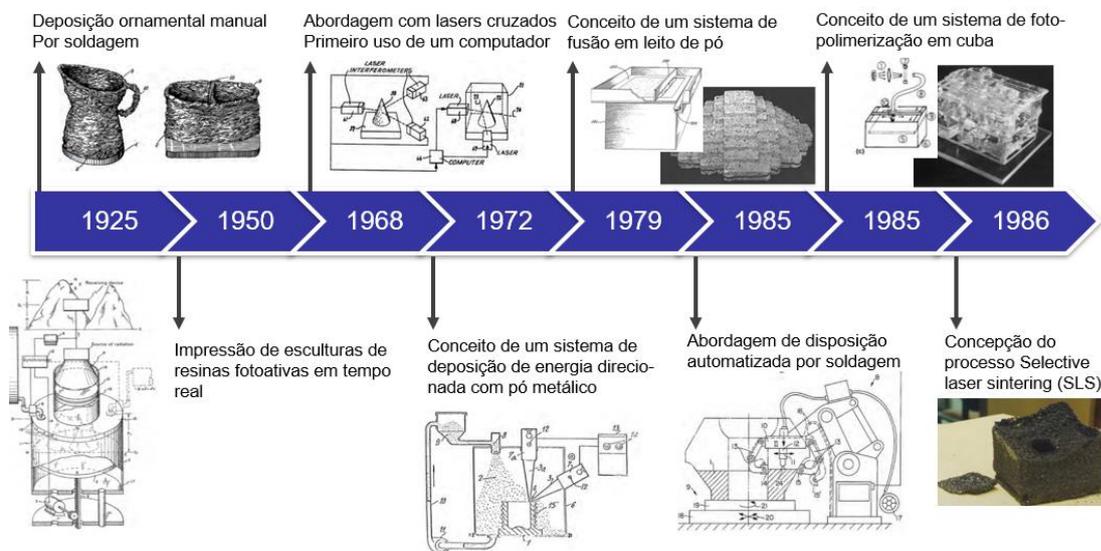


Figura 8. Evolução histórica da manufatura aditiva, do período de desenvolvimento, baseado em (ASM INTERNATIONAL, 2020).

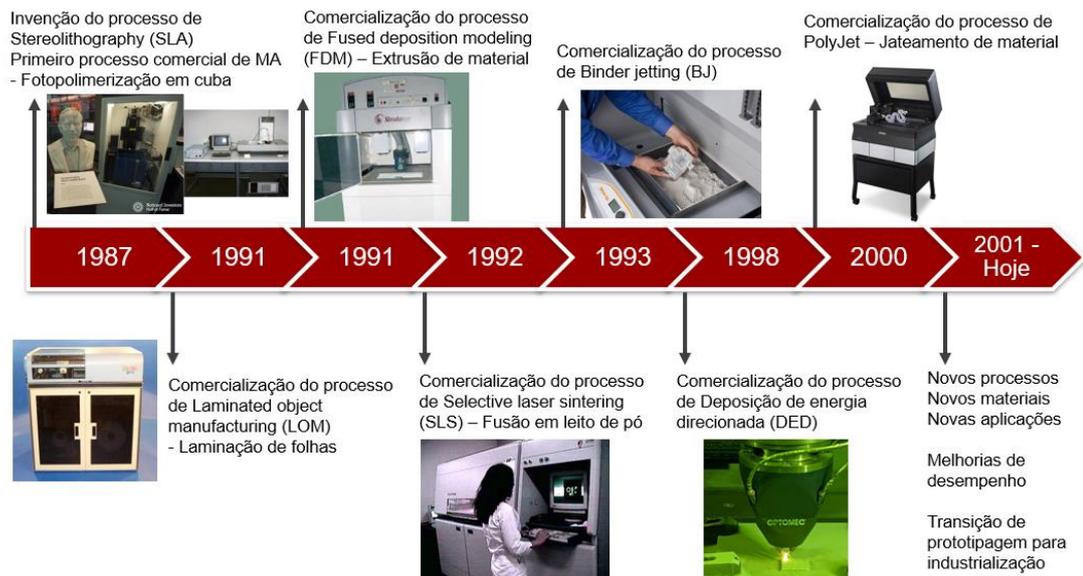
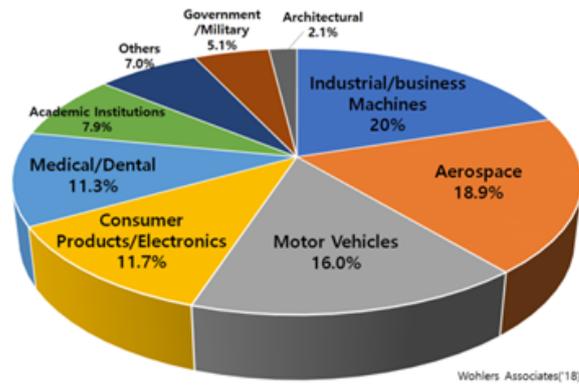


Figura 9. Evolução histórica da manufatura aditiva, do período moderno, baseado em (ASM INTERNATIONAL, 2020)

Inicialmente a MA era conhecida por manufatura digital ou por prototipagem rápida, que se referem a caracterização da MA como um pilar da Indústria 4.0 e a aplicação inicial desta tecnologia, respectivamente. À medida que as tecnologias de MA foram ganhando mercado e desenvolvendo sua maturidade, com novos processos, novos materiais aplicáveis e melhoria de desempenho de produção e qualidade das peças impressas, teve sua gama de aplicações aberta para os mais variados setores da indústria. A Figura 10 apresenta os principais setores de aplicação da MA e a listagem das principais formas de aplicação (ASM INTERNATIONAL, 2020; GISARIO *et al.*, 2020)



| | |
|--|---|
| <p>Indústrias aeroespacial e de defesa</p> <ul style="list-style-type: none"> Componentes com redução de pesos e baixo volume; Materiais avançados; Componentes complexos; Materiais de difícil processamento; Turbinas; | <p>Indústrias médica e dental</p> <ul style="list-style-type: none"> Próteses e órteses; Implantes dentais; Implantes de ossos; Equipamentos médicos; Ferramentas cirúrgicas e componentes médicos sob medida; Tecidos biodegradáveis; Simulação de órgãos e modelos de referência para planejamento de procedimentos cirúrgicos. |
| <p>Indústria automotiva</p> <ul style="list-style-type: none"> Protótipos de design; Protótipos funcionais; Componentes customizados; Componentes de carros de corrida; Componentes de reposição; Mercado de restauração e manutenção | <p>Indústrias de bens de consumo</p> <ul style="list-style-type: none"> Componentes esportivos; Vestimentas customizadas; Joalheria; Decoração; Aplicativos; |
| <p>Manufatura industrial</p> <ul style="list-style-type: none"> Punções e matrizes; Moldes e padrões; Otimização de trocas térmicas e consumo de energia; Filtração; Remanufatura e reparo | <p>Indústrias de energia, óleo e gás</p> <ul style="list-style-type: none"> Células combustíveis; Baterias; Células solares; Componentes complexos; Componentes para condições extremas; Peças de reposição. |
| <p>Indústrias de serviços e softwares</p> <ul style="list-style-type: none"> CAD, CAE e CAM; Consultorias; Serviços legais; Base de dados especializada; Fornecimento de materiais (particulado, filamento ou líquido); Equipamentos periféricos de suporte para fabricação; Pós-processamento; PD&I. | <p>Arquitetura e construção</p> <ul style="list-style-type: none"> Impressão com concreto; Componentes de construção; Componentes complexos; Modelos em escala; Componentes estruturais (suportes, encaixes, etc.). |

Figura 10. Principais setores de aplicações industriais da manufatura aditiva, baseado em (ASM INTERNATIONAL, 2020; GISARIO et al., 2020).

Houve um aumento da adoção da MA pois o seu desenvolvimento trouxe benefícios que permitiram que o seu papel na indústria passasse de apenas prototipagem para impactar toda a cadeia de suprimentos, agregando mais valor e gerando novos modelos de negócios, centrados em customização em massa, personalização de produtos, modelos digitais, softwares e hardwares, serviços de consultorias e *bureaus* (Organizações que oferecem serviços diversos para um determinado ramo), dentre outros (ASM INTERNATIONAL, 2020). A Tabela 1 lista os principais benefícios da MA.

Tabela 1. Benefícios da manufatura aditiva nas áreas de design e engenharia, manufatura e serviços (BROMBERGER E KELLY, 2017).

| Áreas beneficiadas | Benefícios da MA |
|----------------------------|---|
| Design e Engenharia | <ul style="list-style-type: none"> • Menor lead time; • Prototipagem rápida; • Ajustes de design rápidos; • Liberdade total de complexidade; • Maior customização; • Maior diversificação de produtos; • Melhores funcionalidades e performance de produtos; <ul style="list-style-type: none"> • Novos conceitos de design; • Redução de material, o conceito “<i>lightweight</i>”. |
| Manufatura | <ul style="list-style-type: none"> • Processos mais rápidos e mais flexíveis; <ul style="list-style-type: none"> • Redução de setup; • Redução de etapas e interfaces de produção; <ul style="list-style-type: none"> • Redução de partes produzidas; • Redução de tempo e necessidade de montagem; <ul style="list-style-type: none"> • Melhoria da qualidade; • Redução de equipamentos dedicados a produção; <ul style="list-style-type: none"> • Redução do desperdício de material; • Novas funções de materiais. |
| Serviços | <ul style="list-style-type: none"> • Simplificação da cadeia de suprimentos; <ul style="list-style-type: none"> • Produção localizada; • Eliminação de peças obsoletas; • Reformulação de componentes; • Menor dependência de fornecedores; <ul style="list-style-type: none"> • Customização de produção; • Processos de venda, mais eficientes. |

De forma geral, os processos de MA envolvem etapas que vão da adequação dos modelos em CAD virtual para a impressão e o pós-processamento. Os processos de MA possuem características próprias que precisam ser consideradas quando um projeto envolve a utilização deste tipo de tecnologia. Processos de MA tem alta dependência de como o modelo

digital é tratado. Este precisa ter extensão de arquivo compatível com os equipamentos modernos de MA (geralmente com formato de arquivo STL ou 3MF), que são modelos de perímetro de superfície composto por uma malha de triângulos feito a partir do modelo da peça, que então deve ser fatiado pelo software do equipamento (transformação do objeto em camadas digitais) para então ser propriamente impresso. Alguns processos específicos de MA, podem envolver outros ajustes no modelo 3D. Ainda após a impressão, outro ponto de grande importância na MA é o pós-processamento, pois é conhecido que peças impressas em 3D geralmente possuem superfície irregulares, ou tensões residuais, que precisam ser trabalhados por procedimentos de acabamento superficial ou tratamentos térmicos e químicos (GIBSON *et al.*, 2021). A

Figura 11 esquematiza de forma geral os procedimentos tipos e etapas de um processo de MA.

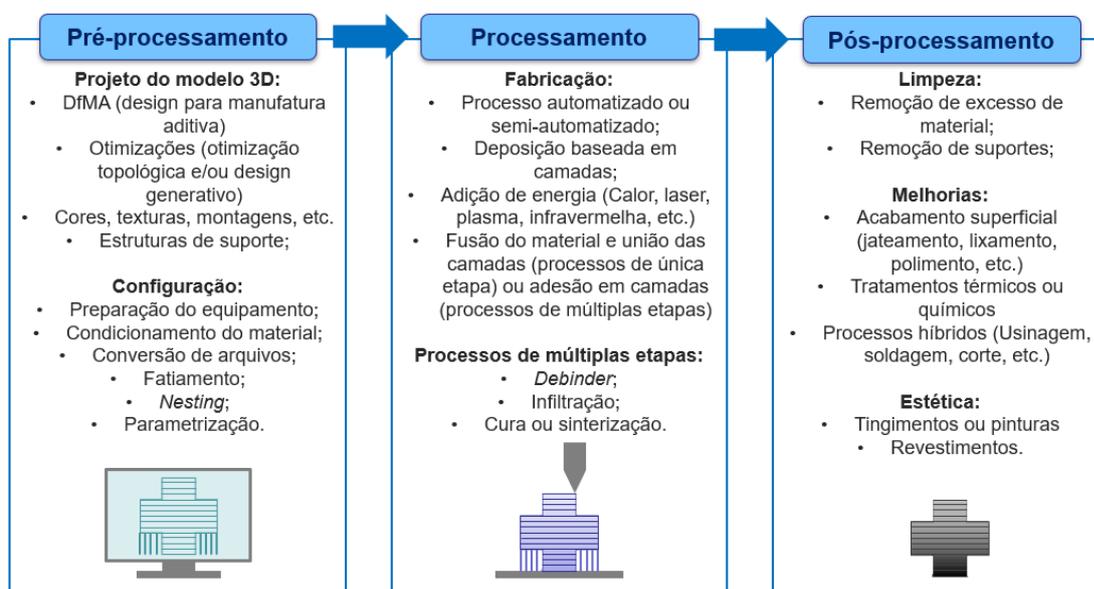


Figura 11. Procedimentos típicos das etapas de um processo de manufatura aditiva, baseado em (GIBSON *et al.*, 2021)

2.1.1 Manufatura aditiva e Indústria 4.0

A manufatura aditiva atua como uma tecnologia disruptiva, com um papel vital para gerar amplas contribuições no contexto da Indústria 4.0. A MA reduz o desperdício de material e melhora a gestão de matéria prima, reduzindo impactos no meio ambiente. Pode ser integrada com sistemas de design, melhorando os conceitos de DfM (*design for manufacturing*, ou design para manufatura) e DfA (*design for assemble*, ou design para montagem) possibilitando o conceito inovador de liberdade total de complexidade, pois design que antes eram impossíveis

de fazer por meio de outros processos são viáveis na MA. Além de que mudanças de design podem ser feitas instantaneamente sem impactos significativos na cadeia de produção.

O conceito inovador da MA afeta também a logística, trazendo o conceito de estoques digitais (*digital warehouses*), referente ao armazenado que é realizado em formato digital, por meio de modelos digitais, e os produtos físicos são apenas fabricados quando a demanda necessária. É uma abordagem flexível ao processo de desenvolvimento de produtos e muda todo o cenário de produção. Nesse processo, a fabricação é feita de forma automática, comandando por software e reduzindo o esforço humano. Assim, a MA age como um potencializador para possibilitar as fábricas inteligentes (*smart factories*) do futuro. O conceito de *digital warehouses* é baseado na abordagem de *digital twins* (DT), ou gêmeos digitais, para superar muitos problemas de manufatura aditiva, como melhorar a qualidade das peças e reduzir o tempo para qualificar produtos. Os gêmeos digitais são definidos como uma representação digital de um sistema de produção ou serviço ou apenas um produto único ativo caracterizado por certas propriedades ou condições. Através dessa abordagem, o mundo físico real pode ser descrito por um par em um mundo cibernético. Assim, as propriedades físicas dos componentes ou equipamentos podem ser refletidas em tempo real pelo modelo digital, que pode ser monitorado e visualizado com maior facilidade, sendo útil para entender, analisar e melhorar o produto, o sistema de serviço ou a produção. Assim, a abordagem do gêmeo digital pode impactar o processo de manufatura aditiva, otimizando os parâmetros do processo, detectando e monitorando as falhas do processo, reduzindo a carga computacional para modelagem multi-escala e lidando com os grandes volumes de dados a partir de monitoramento com sensores in situ (MEHRPOUYA *et al.*, 2019; ZHANG, *et al.*, 2020).

A importância da adoção da MA neste contexto é perceptível pela listagem das aplicações na Indústria 4.0, apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Impactos e aplicações da MA na Indústria 4.0 (MEHRPOUYA *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2020).

| Impactos da MA na Indústria 4.0 | Descrições |
|--|---|
| <p>Customização</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Personalização de produtos; • Reposição de componentes com menor tempo e custo; • Digitalização rápida e personalização com entradas de fabricação auxiliada por computador; • Foco em inovação em produtos com melhoria de eficiência e do ciclo-de-vida; • Alto desempenho em negócios de produção sob demanda. |
| <p>Design e desenvolvimento</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Permite melhorias em produtos; • Maior liberdade e flexibilidade de design; |

| | |
|---|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Redução do tempo de desenvolvimento de produtos. |
| Prototipagem | <ul style="list-style-type: none"> • Fabricação de protótipos mais rápida e mais fácil; • Permite levar produtos mais rapidamente aos mercados; • Permite a testagem de diferentes conceitos, possibilitando maior inovação; • Permite obtenção de diversas categorias de protótipos, de visuais até funcionais. |
| Inventário virtual (digital warehouses e digital twin) | <ul style="list-style-type: none"> • Redução de custos de produto relativos a estocagem; <ul style="list-style-type: none"> • Redução de inventários e estoques; • Otimização dos custos de produção e da cadeia de suprimentos. |
| Redução de desperdícios | <ul style="list-style-type: none"> • Menor geração de resíduos e desperdício de material do que em outros tipos de processos; • Certos processos e materiais de MA possuem fácil reciclagem; • Redução de custos no produto final pela redução de desperdícios. |
| Velocidade | <ul style="list-style-type: none"> • Redução do lead time; • Processos rápidos, com redução de etapas e de montagem; • Diferentes componentes com diferentes formas, podem ser fabricados de única vez, no mesmo lote, gerando reduções significativas de tempo de produção e de logística. |
| Redução de riscos | <ul style="list-style-type: none"> • Com menos operações de produção e de montagem, reduz as possibilidades de riscos de acidentes, ou de defeitos; • Novos produtos podem ser testados mais rapidamente antes de entrarem no mercado; • Redução do tempo de fabricação de implantes cirúrgicos, melhorando o planejamento de cirurgias e reduzindo riscos de atrasos; |
| Acuracidade | <ul style="list-style-type: none"> • Peças impressas de metal ou biomateriais possuem elevada precisão dimensional; • Muitos processos de MA a base de material particulado ou líquido possuem boa acuracidade dimensional; |
| Produtividade | <ul style="list-style-type: none"> • As tecnologias de MA possuem potencial de serem adotadas inúmeros setores industriais; • A produtividade é potencializada pela redução de desperdícios, gasto energético e mão de obra; <ul style="list-style-type: none"> • Melhor reprodutibilidade; • Facilidade de fabricação de componentes muito complexos. |
| Lucratividade | <ul style="list-style-type: none"> • Gera alto valor agregado com apelos de inovação, exclusividade e sustentabilidade; • Permite empresas atingirem boa margem de lucros; • Reduz tempo de desenvolvimento de novos produtos; • Acelera a resposta da empresa diante de mudanças no mercado; • Reduz gastos com resíduos, operações, energia e mão de obra; |

2.1.2 Maturidade tecnológica

A MA tem sido uma referência na última década como um marco importante na mudança global em direção à customização em massa, como uma tecnologia que irá causar grandes impactos nas cadeias de suprimentos, aplicando os mercados de produtos sob demanda, reduzindo significativamente os custos de logística e energia. Como uma das principais tecnologias habilitadoras e disruptivas na indústria 4.0, a MA tem potencial para transformar os modelos de negócios de diferentes indústrias, substituindo ou apoiando outros processos de manufatura e liderando a subsequente principal revolução industrial (NICOLÁS et al. 2018; MEHRPOUYA et al. 2019). A principal tendência em relação ao avanço da maturidade da MA é que ele se torne uma tecnologia mais barata e mais rápida, podendo ser aplicada à produção em massa, bem como ao desenvolvimento de novos materiais para a MA e à expansão de mercados (MEHRPOUYA et al. 2019). A Figura 12 apresenta gráficos que comparam a maturidade tecnológica com a penetração na indústria das tecnologias de MA, por processos de polímeros e processos de metais. Quanto aos processos com base em polímeros, as categorias de extrusão de material, fusão em leito de pó e fotopolimerização em cuba são as mais utilizadas e mais desenvolvidas. Já quanto a processos para metais o destaque fica para os processos de fusão em leito de pó a base de laser, deposição de energia direcionada com pós e jateamento de aglutinante.

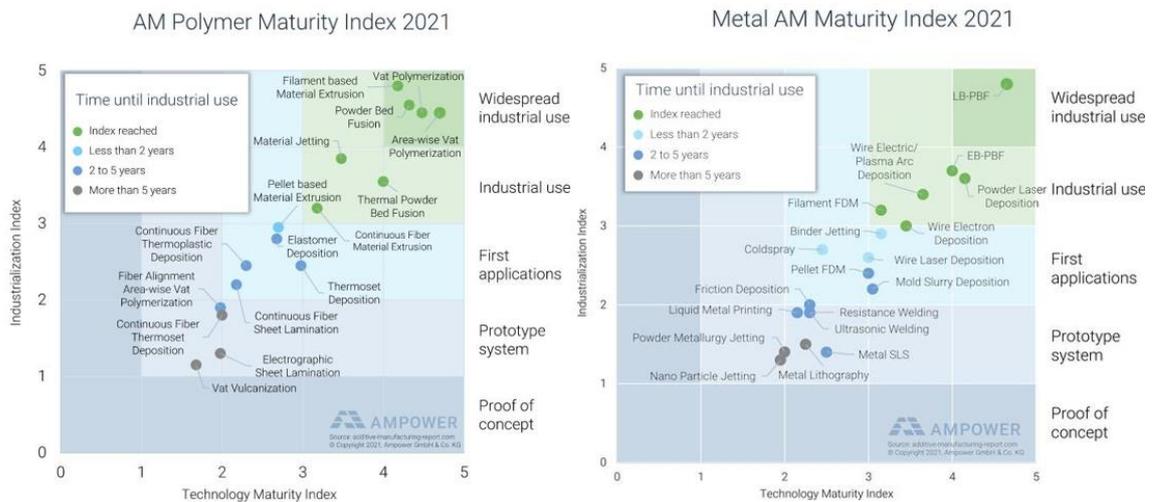


Figura 12. Maturidade tecnológica e industrial dos processos de MA para polímeros e para metais (AMPOWER, 2021).

Entre as categorias de processos de MA que demonstram maior maturidade, os processos de fusão em pó se destacam por sua melhor resolução de impressão, maior liberdade de complexidade e maior viabilidade de aplicação, podendo processar polímeros, metais, cerâmicas e compósitos. Especialmente no mercado de polímeros MA, esta categoria tem a

maior projeção de crescimento e deve ser o principal player neste setor (SMARTECH, 2018). Dentre as tecnologias de fusão em leito de pó de polímero, o MJF se destaca pelo melhor desempenho mecânico das peças impressas, menor incidência de defeitos, menor tempo de impressão, melhor qualidade de impressão, maior eficiência energética, menor custo de produção e maior taxa de crescimento de mercado entre as tecnologias de fusão de leito de pó com polímeros (LONDON, 2020, XU et al. 2020, LEE et al. 2020).

2.1.3 Tecnologias de manufatura aditiva

A manufatura aditiva diz respeito aos processos de fabricação por união de materiais, onde as formas dos produtos impressos são baseadas em modelos digitais, daí vem também o termo manufatura digital. Para todos os processos de MA os mecanismos de aquecimento e resfriamento são fatores essenciais para compreendê-los, considerando que estes processos são essencialmente térmicos. Muitas abordagens de MA, como a de jateamento de aglutinante, utilizam ligantes necessitando de uma taxa de calor relativamente mais baixa, enquanto outros processos utilizam taxas mais altas por meio de abordagens que aplicam lasers e outras fontes de calor mais intensas. Devido a estes fatores, os processos de manufatura aditiva são classificados prioritariamente pela fonte de energia e mecanismos de deposição de material e de energia (ASM INTERNATIONAL, 2020; TOFAIL *et al.*, 2018). A Tabela 3 apresenta os principais termos nacionais e internacionais usados para a MA e para a classificação das 7 tecnologias de MA, a serem abordadas a seguir (ISO ASTM 52900, 2015, ABNT NBR 52900, 2018, ASM, 2020). Enquanto a Figura 13 compara de forma geral estes processos em relação a taxa de energia, velocidade de fabricação e resolução das peças impressas.

Tabela 3. Terminologias das classificações de tecnologias de manufatura aditiva conforme as normas ISO ASTM 52900 de 2015 e ABNT NBR 52900 de 2018.

| Termo – Pt/br | Termo - Inglês | Definição |
|--------------------------------|--------------------------------|--|
| Manufatura aditiva (MA) | Additive manufacturing (AM) | Processo de união de materiais para obtenção de peças a partir de dados de modelos 3D, geralmente camada por camada, diferentemente das metodologias de manufatura subtrativa e formativa. |

| | | |
|---|--------------------------------|---|
| Jato de aglutinante ou jateamento de aglutinante | Binder jetting (BJ) | Processo de manufatura aditiva em que um agente de ligação é depositado seletivamente para unir materiais em pó. |
| Deposição por energia direcionada | Direct energy deposition (DED) | Processo de manufatura aditiva em que a energia térmica focada é usada para unir materiais por fusão, à medida que estão sendo depositados. |
| Extrusão de material | Material extrusion (ME) | Processo de manufatura aditiva em que o material é depositado seletivamente por meio de um bico extrusor ou orifício. |
| Jateamento de material | Material jetting (MJ) | Processo de manufatura aditiva no qual as gotas de material de fabricação são depositadas seletivamente. |
| Fusão em leito de pó | Powder bed fusion (PBF) | Processo de manufatura aditiva em que a energia térmica funde seletivamente regiões do leito de pó. |
| Laminação de folha | Sheet lamination (SL) | Processo de manufatura aditiva em que folhas de material são ligadas para formar uma peça. |
| Fotopolimerização em cuba | Vat photopolymerization (VPP) | Processo de manufatura aditiva no qual o fotopolímero líquido em uma cuba é curado seletivamente por polimerização ativada por luz. |

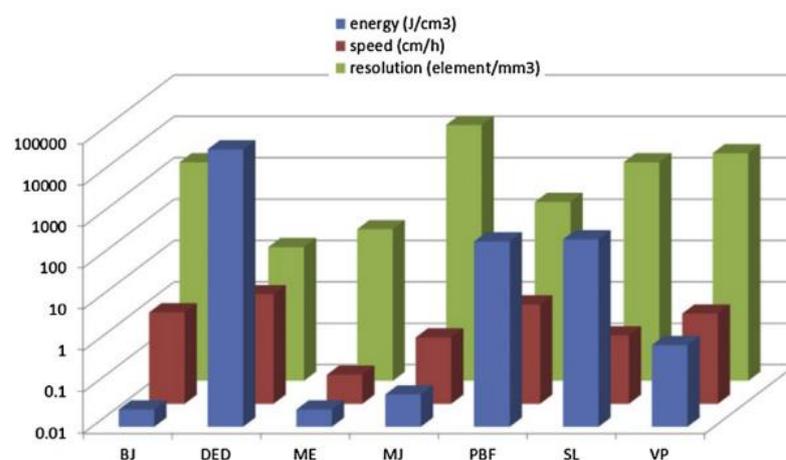


Figura 13. Comparação geral entre as categorias de tecnologia de manufatura aditiva em relação a energia utilizada nos processos, velocidade de fabricação e resolução das peças impressas (TOFAIL et al., 2018).

2.1.4 Fusão em leito de pó (*Powder bed fusion – PBF*)

A tecnologia de fusão em leito de pó (*powder bed fusion – PBF*) fabrica peças fundindo seletivamente regiões de camadas de pó depositadas em uma cuba de construção, chamada de leito de pó. Esta fusão se dá por meio da aplicação de energia, e após a fusão da camada uma nova camada de pó é depositada sobre toda a área do leito de pó por um recobridor, seguindo-se desta forma até que o produto da impressão esteja finalizado. Este tipo de tecnologia de MA permite uma liberdade substancial de design, considerando que o PBF apresenta ampla variação de processos e disponibilidade de materiais, abrangendo polímeros, metais, cerâmicas e compósitos (ASM INTERNATIONAL, 2020). A Figura 14 apresenta um esquema com as características típicas deste tipo de tecnologia de MA, considerando as diferentes formas de deposição de camadas (recobrimento) e tipo de energia aplicada.

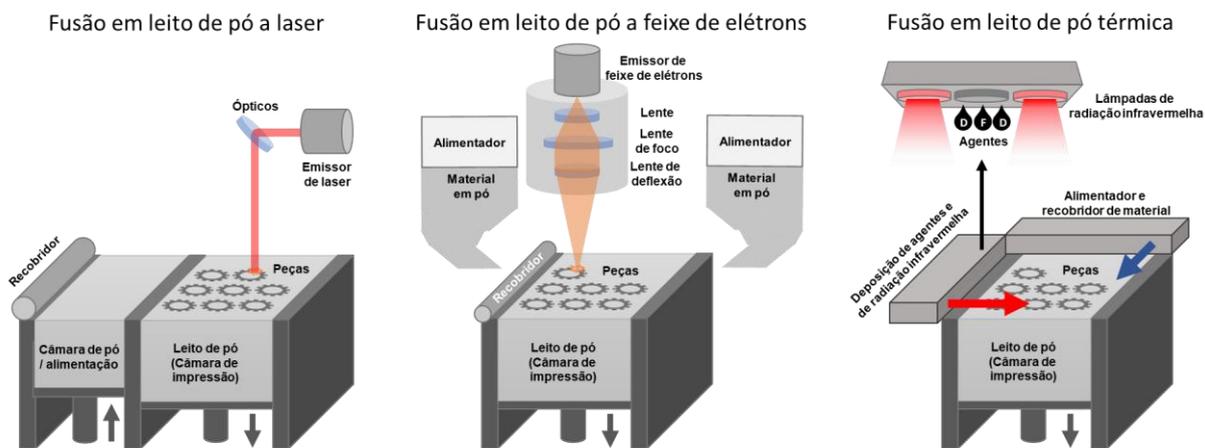


Figura 14. Esquema com as características típicas dos processos de fusão em leito de pó. Fonte Própria.

As fontes de energia aplicadas neste tipo de tecnologia são lasers, feixes de elétrons, energia eletromagnética indiscriminada e radiação infravermelha. Para processamento de polímeros utilizando lasers é geralmente utilizado potência de 100 W, com material de granada de ítrio e alumínio dopado com neodímio (Nd: YAG). Já para metais, aplica-se lasers de fibra, que fornecem acoplamento aprimorado e trabalham com uma potência de 200 a 500 W. No caso de feixes de elétrons, usa-se fontes de energia de 5 a 10 kW. Quanto a aplicação de radiação infravermelha utilizada pelos processos de Multi Jet Fusion (MJF) da HP e o High Speed Sintering (HSS). No MJF, deposita-se um agente de união nas camadas de pó por jato de tinta após o espalhamento de cada camada de pó, para então a radiação ser aplicada. Como efeito, o agente reage a radiação e funde as camadas de pó. Esta tecnologia é significativamente mais

rápida entre os processos de fusão em leito de pó por ser possível varrer toda a área da camada depositada com energia de uma única vez, enquanto para outras fontes de energia, como o laser, é preciso percorrer pontualmente as áreas que precisam ser fundidas. Em todas estas aplicações, o mecanismo de ligação entre material e camadas é a reação térmica, sendo que o laser e a radiação são mais adequados para processar polímeros, enquanto o feixe de elétrons é melhor para metais. Devido estas diferenças, é comum que a fusão em leito de pó seja categorizada de acordo com a fonte de energia do processo, como L-PBF (*laser powder bed fusion*), EB-PBF (*Electrom beam powder bed fusion*) e T-PBF (*thermal powder bed fusion*) (ABNT, 2019; ASM INTERNATIONAL, 2020).

Praticamente qualquer material particulado pode ser usado nos processos de fusão em leito de pó quando um ligante transiente ou permanente adequado é misturado com a matéria-prima primária. O pós-processamento pode ser usado no caso de peças de metal e cerâmica para converter ou queimar o ligante, aplicando procedimentos de sinterização e de infiltração, como no caso dos processos de jateamento de aglutinante comentados anteriormente. Quando as tensões residuais são bem controladas, como é o caso do laser em polímeros, o pó solto e não fundido sustenta a peça, eliminando a necessidade de estruturas de suporte, assim os processos de fusão em leito de pó para polímeros não requerem estruturas de suporte. Já com metais, o volume de pó depositado parcial não fornece rigidez suficiente para evitar a distorção do calor, ou sustentação suficiente para suportar o peso das peças, então as peças são fixadas a uma placa de construção usando estruturas de suporte, às vezes chamadas também de âncoras para este caso. Os processos mais bem estabelecidos para esta categoria de tecnologia de MA são o SLS e MJF, para polímeros, e DMLS (ou SLM e DMLM) e EBM, para metais. (ASM INTERNATIONAL, 2020).

Quanto aos polímeros aplicados em processos de fusão em leito de pó, normalmente são termoplásticos semicristalinos, incluindo poliamida 11 (PA11), PA12, PP, poliéteréter cetona e poliariletercetona. Em processos a base de lasers, o material é pré-aquecido a uma temperatura inferior próxima ao ponto de fusão. Enquanto o material é fundido pelo laser, a temperatura do leito de pó deve permanecer acima da temperatura de cristalização para minimizar tensões residuais e distorções. Portanto, para este caso é desejável que o polímero possua uma grande faixa entre as temperaturas de fusão e de cristalização para se adequar a esta tecnologia. Nos processos de fusão em leito de pó, é requerido um tempo de resfriamento dos componentes impressos equivalente ou próximo ao tempo de impressão, antes da remoção das peças. Se as peças forem removidas rapidamente, haverá riscos de distorções e oxidações ocorrerem. O tamanho médio de partícula necessário para a fusão de leito de pó de polímeros varia na ordem

de 50 a até 80 μm (ASM INTERNATIONAL, 2020). Quanto a materiais metálicos, geralmente utiliza-se metais soldáveis e fundíveis, o que inclui ligas de alumínio, ligas de cobalto-cromo, ligas de níquel, ouro, prata, aço inoxidável, aço ferramenta e ligas de titânio. Fontes de energia típicas para o processamento por fusão em leito de pó destes metais são lasers e feixes de elétrons. O tamanho da partícula de pó de metal utilizado nesta tecnologia varia na faixa de 20 a 40 μm para processos a base de laser e 45 a 100 μm para processos a base de feixe de elétrons (ASM INTERNATIONAL, 2020). A Figura 15 apresenta alguns exemplos de peças fabricadas por processos de fusão em leito de pó com diferentes materiais.

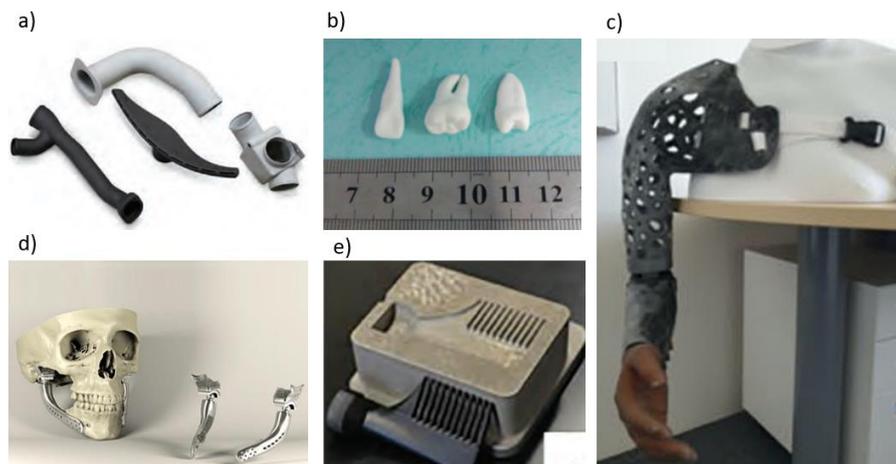


Figura 15. Exemplos de peças fabricadas por processos de fusão em leito de pó com diferentes materiais. a) Componentes de helicópteros fabricados por SLS; b) Próteses dentais de cerâmica fabricadas por fusão em leito de pó. c) prótese de PA12 fabricada por MJF; d) Reconstrução de ossos de mandíbula de aço inox fabricadas por DMLS; e) Molde com canais conformais de metal fabricado por fusão em leito de pó (ASM INTERNATIONAL, 2020; AWAD et al., 2021; SINGH et al., 2019).

Selective laser sintering (SLS) é uma das tecnologias mais antigas de MA, surgindo em 1930. Ao longo dos anos, essa tecnologia avançou em termos de desempenho de processo, materiais e aplicabilidade. Neste processo a fonte de energia é por lasers, que funde seletivamente as camadas de pós depositados no leito de pó. O produto final, coberto de pó solto, é então limpo com escovas ou ar pressurizado. Os principais materiais usados neste processo são as poliamidas (Nylons), alumida (uma mistura de pó de alumínio cinza e poliamida) e materiais semelhantes à elastômeros/borrachas (3D EXPERIENCE - MAKERS, 2018).

Multi Jet Fusion (MJF) é um processo de fusão em leito de pó desenvolvido pela empresa HP. O MJF difere dos métodos de fusão em leito de pó por utilizar uma matriz de jato de tinta que é usada para aplicar agentes de fusão e detalhamento, que são então fundidos pela ação de radiação infravermelha emitida em toda a camada por varredura de lâmpadas especiais, ou seja, nenhum tipo de laser está envolvido neste processo. Os agentes de detalhamento têm o objetivo de serem depositados em torno dos contornos da peça impressa para melhorar a

resolução da peça, melhorando a precisão dimensional. Este processo está apto para fabricar componentes com poliamidas (Nylons), polipropileno e elastômeros (TPU e TPA), além de ser possível produzir peças multicoloridas utilizando agentes corantes são aplicados juntamente com os agentes de fusão e de detalhamento (3D EXPERIENCE - MAKERS, 2018).

Direct Metal Laser Sintering (DMLS), também chamado de Selective Laser Melting (SLM) ou Direct Metal Laser Melting (DMLM), usa o mesmo princípio do SLS, mas é usado exclusivamente para fabricar componentes feitos de metal. Neste processo o equipamento pode ser aplicado com um ou mais lasers, o que muda a velocidade de fabricação de acordo com as necessidades de escalabilidade. Este tipo de processo de fusão em leito de pó requer estruturas de suporte adicionais para compensar a alta tensão residual e para limitar a ocorrência de distorção. Para estes processos pode-se utilizar ligas de titânio, de cobre, de alumínio, etc. e aços, como inox, ferramenta e *maranging*(aços de alta resistência, este termo vem da junção das palavras em inglês *martensite* e *age hardening*). As aplicações para estes processos incluem componentes médicos, componentes de veículos e aeronaves, ferramental, peças sobressalentes e protótipos.

Electron Beam Melting (EBM) é um processo de fusão em leito de pó para metais o qual funde as camadas do leito de pó por meio feixes de elétrons de alta energia. Por este fator, este tipo processo de MA produz menos tensão residual, resultando em uma menor incidência de distorções nos produtos finais. O EBM usa menos energia e pode produzir camadas mais rapidamente do que DMLS ou SLS. Este método é mais útil em indústrias de alto valor, como aeroespacial e defesa, esportes motorizados e próteses médicas (3D EXPERIENCE - MAKERS, 2018).

2.1.5 Materiais na manufatura aditiva

Com o avanço das tecnologias de manufatura aditiva uma ampla gama de materiais em diferentes categorias passou a ser compatível com estes processos e novos materiais e aplicações estão sendo desenvolvidos à medida que a MA amadurece. Atualmente é possível imprimir componentes 3D funcionais de polímeros (termoplásticos, termofixos ou elastômeros) metais (soldáveis e fundíveis) cerâmicas (refratários ou vidros), compósitos, e biomateriais. Existem ainda tecnologias em desenvolvimento que trabalham com impressão de alimentos ou de cimento. Estas matérias-primas podem ser utilizadas na forma de sólidos (partículas, filamentos ou laminados) e de líquidos, havendo também o uso de agentes ligantes e aditivos particulados ou líquidos de acordo com as especificidades de cada processo de MA. A Tabela 4 explana de forma geral a atual compatibilidade de materiais e forma de material para as

tecnologias de MA (BHUVANESH, KUMAR e SATHIYA, 2021; BOURELL et al., 2017; SINGH, RAMAKRISHNA e SINGH, 2017; TOFAIL et al., 2018). Já a Figura 16, Figura 17 e Figura 18 apresentam esquemas demonstrando os processos que trabalham com os principais materiais aplicados na MA.

Tabela 4. Disponibilidade geral de materiais para manufatura aditiva, por tipo de tecnologia e forma de matéria-prima (ASM INTERNATIONAL, 2020; SINGH, RAMAKRISHNA e SINGH, 2017; TOFAIL et al., 2018).

| Tecnologias | Polímeros | Metais | Cerâmicas | Compósitos | Biomateriais |
|----------------------------------|-----------|--------|-----------|------------|--------------|
| Fotopolimerização em cuba | ■ | * | * | ■ | ■ |
| Extrusão de material | ■ ■ | * | * | ■ ■ | ■ |
| Jateamento de material | ■ ■ | * | ■ * | ■ | ■ |
| Jateamento de aglutinante | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Fusão em leito de pó | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Deposição de energia direcionada | | ■ ■ | | | |
| Laminação de folhas | ■ | ■ | ■ | ■ | |

* Partículas de metal ou cerâmica podem ser dispersas dentro de pastas, resinas ou filamentos para compor compósitos ou para processos de abordagem indireta, onde a matriz, geralmente polimérica, é solúvel ou é derretida por sinterização para que a peça final seja composta apenas de material metálico ou cerâmico.

Legenda: ■ Particulado ■ Filamento ■ Laminado ■ Líquido

ADDITIVE MANUFACTURING FOR POLYMER

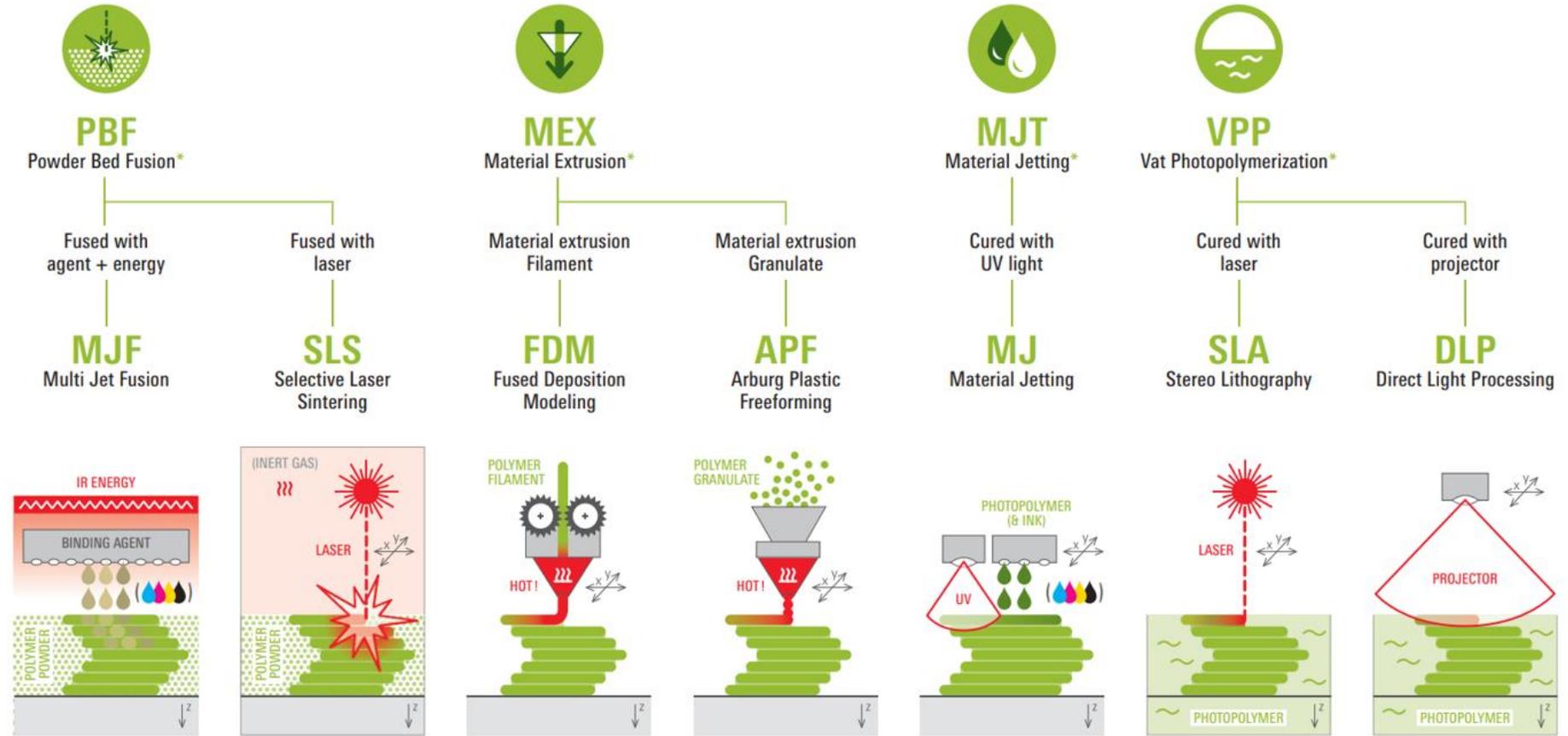


Figura 16. Processos de MA para impressão de peças de polímero (FORMNEXT, 2021).

ADDITIVE MANUFACTURING FOR METAL

DIRECT METHODS

INDIRECT METHODS

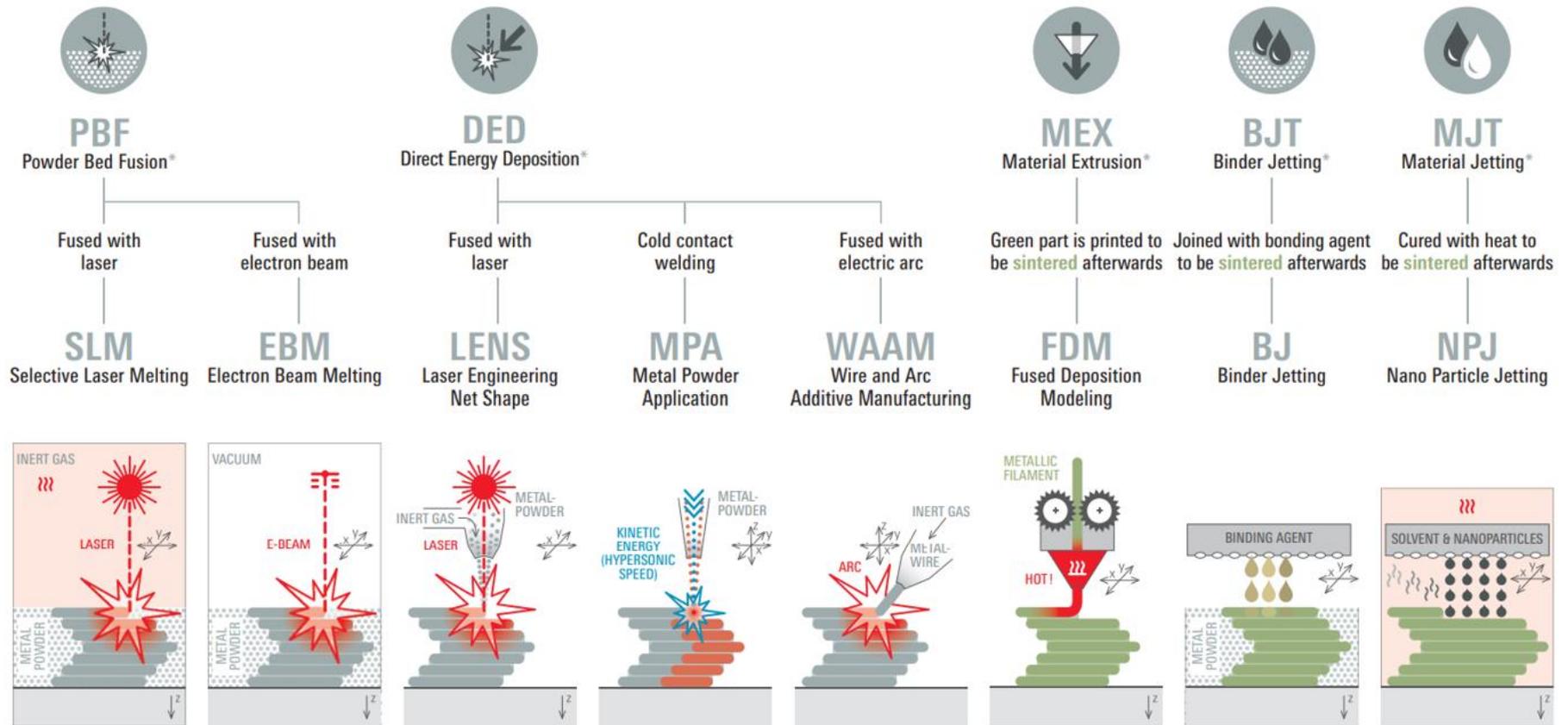


Figura 17. Processos de MA para impressão de peças de metais (FORMNEXT, 2021).

ADDITIVE MANUFACTURING FOR OTHER MATERIALS

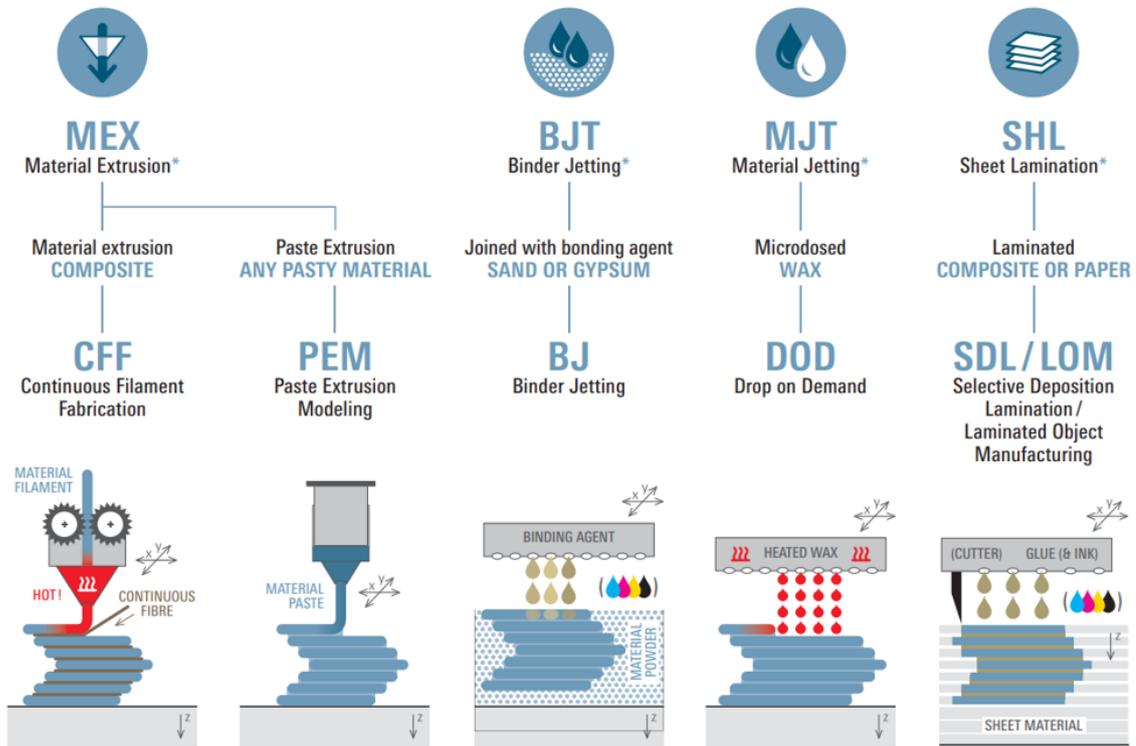


Figura 18. Processos de MA para materiais diversos (FORMNEXT, 2021).

Na manufatura aditiva, a camada de material é depositada ou direcionada melhor enquanto este está em um estado fluídico. Desta forma, materiais como polímeros e produtos à base de polímeros, como compósitos de matriz polimérica, híbridos e FGMs (*functionally graded materials* ou materiais classificados funcionalmente), geralmente possuem boa processabilidade pelos processos de MA, pois exigem temperaturas de processamento relativamente baixas. De certa forma é fácil realizar procedimentos de cura e de colagem com polímeros. Devido a estes fatores os polímeros são os materiais mais presentes nos processos de MA. Quanto à ligação envolvendo metais e cerâmicas, não é tão fácil de conseguir devido às suas altas temperaturas de fusão. Assim, a utilização da sinterização em estado sólido e fusão por meio de fontes de energia que envolve a fusão superficial de metais ou partículas de cerâmica, seguida pelo crescimento do grão, é frequentemente a rota preferida para obter uma estrutura sólida consolidada ou forma para estes materiais mais duros. Para compósitos, o ponto de referência para conhecer a processabilidade se dá a partir da matriz, que em muitos casos é polimérica. Os compósitos usados na MA podem ser líquidos preenchidos por partículas, filamentos preenchidos com partículas ou compósitos estruturais fabricados à medida que as camadas são depositadas. Em todos estes casos, o material deve apresentar propriedades de

serviço aceitáveis para funcionar com sucesso na aplicação desejada. Para as aplicações de serviço mais rigorosas, aplica-se pós-processamento para melhorar características estruturais e superficiais dos materiais, como aliviar tensões, reduzir a porosidade, reduzir a rugosidade e atender à tolerâncias geométricas (BHUVANESH KUMAR e SATHIYA, 2021; BOURELL *et al.*, 2017; SINGH, RAMAKRISHNA e SINGH, 2017; TOFAIL *et al.*, 2018). A Figura 19, Figura 20, Figura 21 e Figura 22 apresentam a classificação dos mecanismos de ligação, formas de material e fonte de energia para as tecnologias de MA, conforme as normas ISO, ASTM e ABNT.

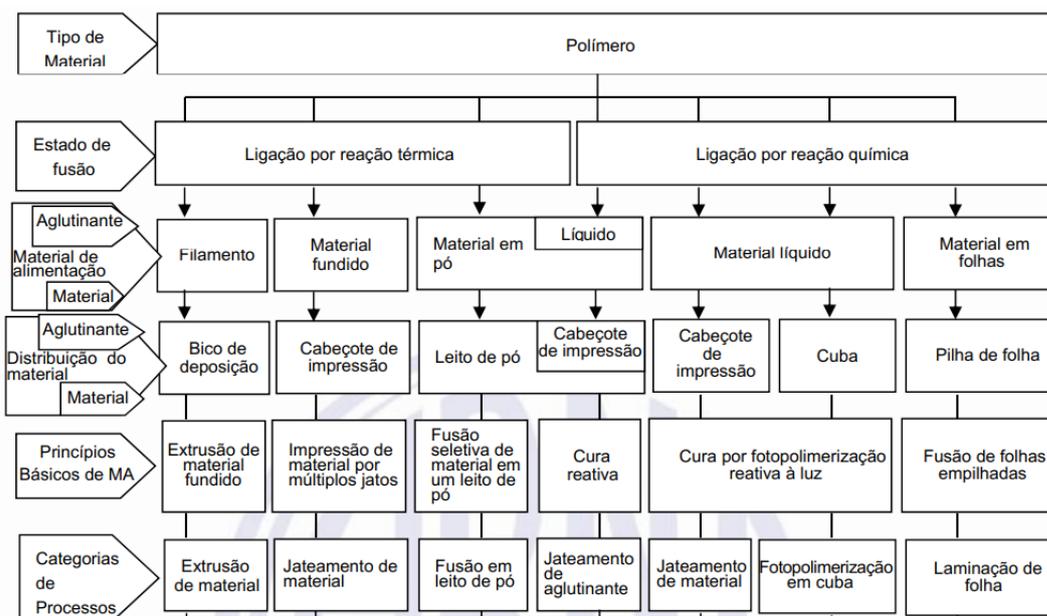


Figura 19. Visão geral dos princípios de processos diretos de MA para materiais poliméricos (ABNT, 2018).

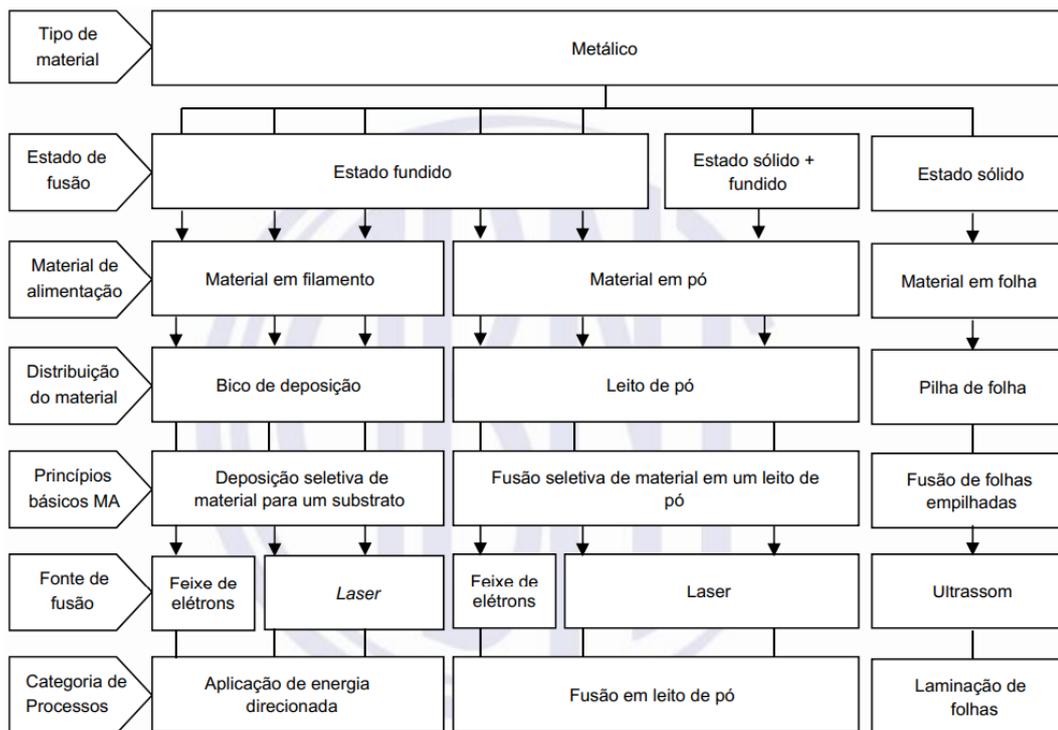


Figura 20. Visão geral dos princípios de processos diretos de MA para materiais metálicos (ABNT, 2018).

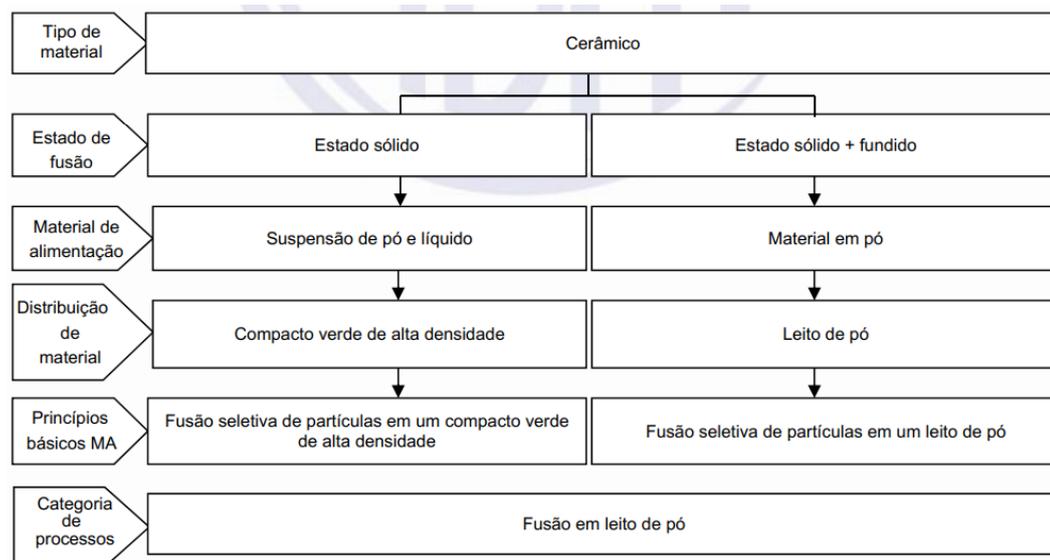


Figura 21. Visão geral dos princípios de processos diretos de MA para materiais cerâmicos (ABNT, 2018).

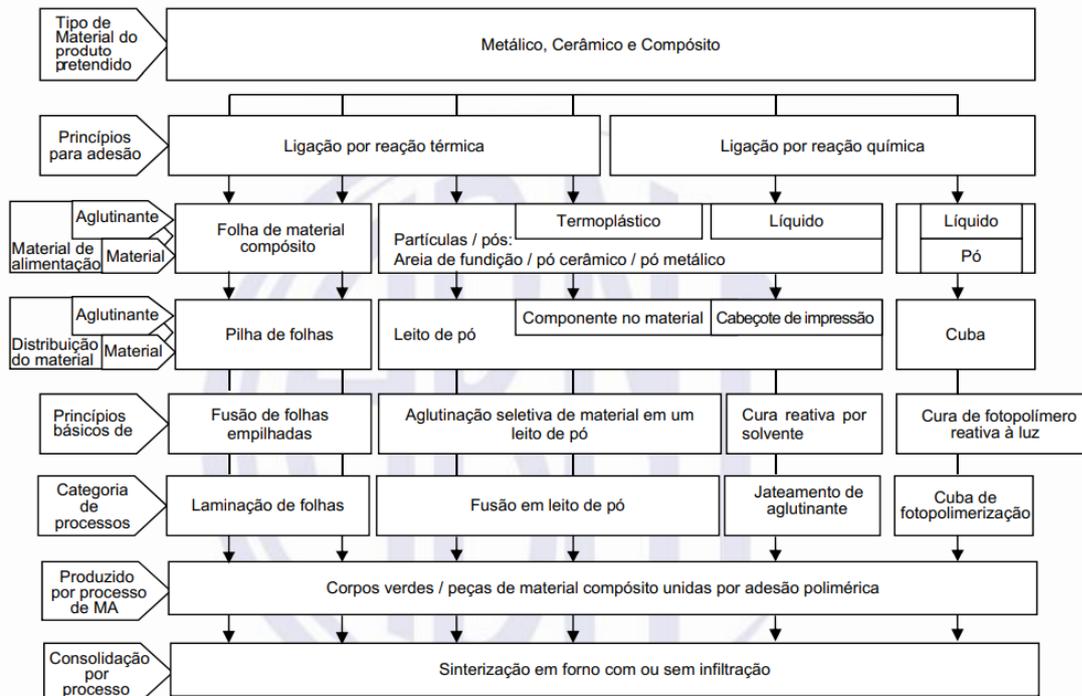


Figura 22. Visão geral dos princípios de processos indiretos de MA para materiais diversos (ABNT, 2018).

2.1.6 Manufatura aditiva de polímeros

Diferentes tipos de técnicas de MA são usados para processar diferentes tipos de polímeros, como termoplásticos, termofixos, misturas de polímeros, hidrogéis, compostos biológicos, elastômeros e compostos de polímeros. Os materiais poliméricos são os mais presentes no mercado de MA e os que mais geram receita, sendo em sua maioria os fotopolímeros, usados principalmente na fotopolimerização em cuba, e a segunda técnica mais usada é a fusão em leito de pó, que usa na maioria dos casos, poliestirenos, elastômeros termoplásticos e poliamidas. (BHUVANESH KUMAR e SATHIYA, 2021; BOURELL *et al.*, 2017),

Os termoplásticos são mais utilizados nos processos de extrusão de material e de fusão em leito de pó. Ambos envolvem adesão de camada por intermédio de energia térmica, mas exploram outros mecanismos de ligação. Para extrusão de material, termoplásticos amorfos têm desempenho mais adequado, devido às suas características de fusão, o que inclui os populares ABS e PLA, que fundem em uma ampla faixa de temperatura até a temperatura de transição vítrea, formando um material de alta viscosidade. Já os polímeros semicristalinos, são normalmente mais aplicados para processos de fusão em leito de pó, que demandam que o material tenha uma ampla faixa entre as temperaturas de fusão e de transição vítrea para possuir boa processabilidade. As formas de materiais usadas na MA de polímeros são geralmente como

líquidos, pós poliméricos, filamento de polímero e filmes de polímero. PA11 ou 12 e poliuretano termoplástico (TPU) são usados na forma de pó. Uma grande variedade de termoplásticos são usados em formas de pó e filamento, enquanto os fotopolímeros são usados na forma líquida (BHUVANESH KUMAR e SATHIYA, 2021; BOURELL *et al.*, 2017). A Figura 23 e a Figura 24 apresentam a disponibilidade de diversos polímeros nos processos de MA onde esta categoria de material é mais presente, em processos de fusão de leito de pó e de extrusão de material, respectivamente.

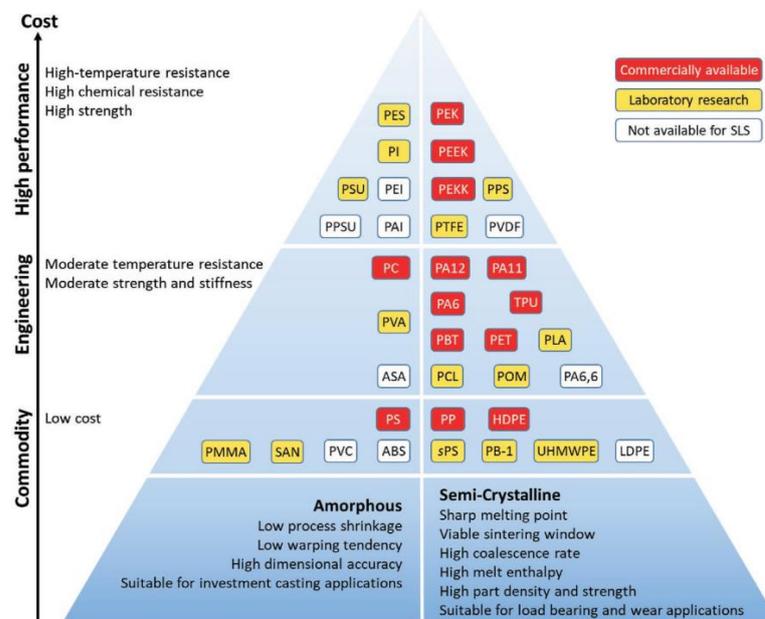


Figura 23. Disponibilidade de polímeros para os processos de fusão em leito de pó (TAN, ZHU e ZHOU, 2020).

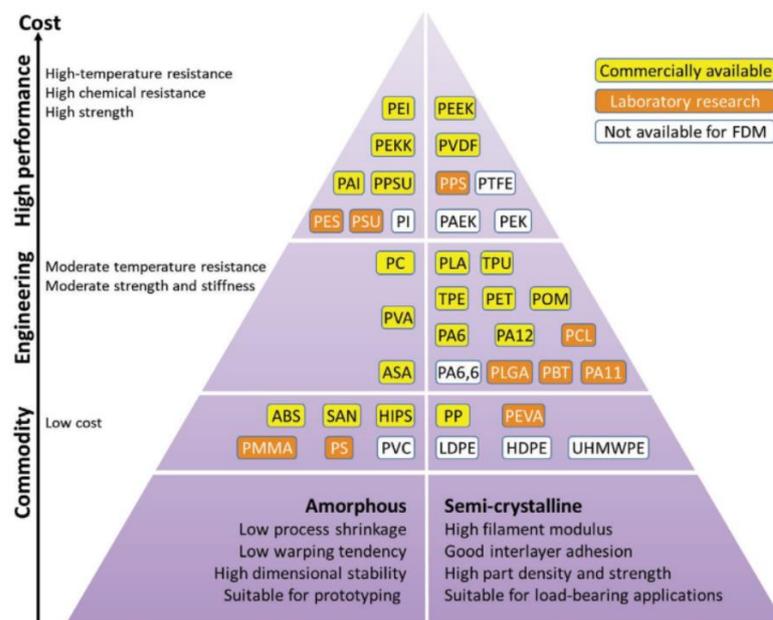


Figura 24. Disponibilidade de polímeros para os processos de extrusão de material (TAN, ZHU e ZHOU, 2020).

Quanto a termofixos, os mais utilizados na MA são os materiais fotopolímeros compostos de monômeros, oligômeros, fotoiniciadores e uma variedade de outros aditivos, incluindo inibidores, corantes, agentes antiespumantes, antioxidantes, agentes de endurecimento, etc. que ajudam a ajustar os comportamentos e propriedades do fotopolímero. Estes são majoritariamente aplicados nos processos de fotopolimerização em cuba, misturados com fotoiniciadores UV e monômeros de acrilato ou de viniléter. Contudo, estas resinas de acrilato e viniléter apresentaram retração considerável, e inibição de polimerização pela presença do oxigênio. Para superar estes fatores, os epóxis foram introduzidos no início de 1990 e trouxeram vantagens significativas para o processo de fotopolimerização em cuba, mas complicaram a formulação de resinas. Os epóxis são fotopolímeros polimerizados cationicamente. Os monômeros epóxis têm anéis que, quando reagidos, se abrem para fornecer locais para outras ligações químicas. Desta, as resinas epóxi encolhem menos do que as de base de acrilatos e têm muito menos tendência gerar deformações. Atualmente a maioria das resinas disponíveis para MA têm quantidades significativas de epóxis (BHUVANESH KUMAR e SATHIYA, 2021; BOURELL *et al.*, 2017).

Quanto aos elastômeros, na MA são aplicados termoplásticos elastômeros em diferentes categorias de processos, principalmente na fotopolimerização em cuba e na fusão em leito de pó. Estes materiais possuem propriedades físicas semelhantes às de borrachas, como a maciez, flexibilidade e resiliência. Os elastômeros termoplásticos são classificados em seis tipos, sendo estes os copolímeros multibloco, ionômeros, combinações de elastômeros de polímero rígido, elastômeros termoplásticos estirênicos, copolímeros enxertados e polímeros com morfologias núcleo-casca. Os elastômeros termoplásticos estirênicos são baseados em moléculas simples, como o copolímero em bloco A-B-A, onde “A” se refere a poliestireno e “B” se refere ao elastômero. Os copolímeros multibloco são elastômeros com estruturas na forma de $(A-B)_n$ onde “A” são termoplásticos cristalinos duros e “B” é um elastômero amorfo macio. Na maioria desses tipos de TPEs, os segmentos “A” são poliésteres termoplásticos (TPE), poliuretanos termoplásticos (TPU) ou poliamidas termoplásticas (TPA) e os segmentos “B” são poliéteres ou poliésteres. Em alguns casos são aplicadas combinações de elastômero de polímero rígido dispersos em polímeros termoplásticos ou em outros elastômeros. Os polímeros termoplásticos trabalhados em MA são amplamente utilizados em aplicações na eletrônica e na medicina, além de componentes funcionais em outras indústrias (ALGHAMDI *et al.*, 2021).

A precisão dimensional e o tempo de fabricação das peças impressas podem variar com base no material e nos processos em que são aplicados. No geral, os processos de fusão em leito

de pó são aqueles com melhor tempo de fabricação, enquanto os processos de jateamento de aglutinante e de fotopolimerização em cuba possuem melhores precisões dimensionais e acabamento. Além dos requisitos dimensionais, alguns problemas restringem as aplicações de materiais poliméricos impressos em 3D. O principal deles é a anisotropia mecânica associada a manufatura em camadas e a diferença de desempenho das peças impressas de acordo com diferentes orientações de impressão. Outros parâmetros importantes para processamento de polímeros por MA são a potência de entrada para lasers, velocidade de varredura, espaçamento, espessura da camada, ângulo de varredura, ambiente da cuba, direção de impressão, que estão presentes ou não dependendo da técnica empregada. Muitos estudos acerca dos processos de MA de polímeros foram e estão sendo executados para compreender e aprimorar estes parâmetros (BHUVANESH, KUMAR e SATHIYA, 2021).

As aplicações das peças de polímero fabricadas por MA vão desde pequenos dispositivos microfluídicos a grandes tanques de armazenamento, tubos, aplicações biomédicas, automotivas, industriais, dentre outras. Os materiais poliméricos são leves e fortes, possibilitando seu uso ainda para suporte de carga. A adaptabilidade dos polímeros nas tecnologias de MA tornou possível a produção de muitos produtos complexos com baixo custo para muitas aplicações aeroespaciais, automobilística, médica, arquitetônica, brinquedos e muito mais. Em muitos casos, inclusive, as peças impressas por MA são aptas a substituir as contrapartes fabricadas convencionalmente, em termos de desempenho mecânico. Os crescentes requisitos de desempenho impulsionam o avanço dos materiais poliméricos para MA. Por outro lado, as propriedades termomecânicas ainda precisam de melhorias para suas aplicações (BHUVANESH, KUMAR e SATHIYA, 2021; BOURELL *et al.*, 2017). A Figura 25 agrupa uma série de exemplos de aplicações para estes materiais na MA.

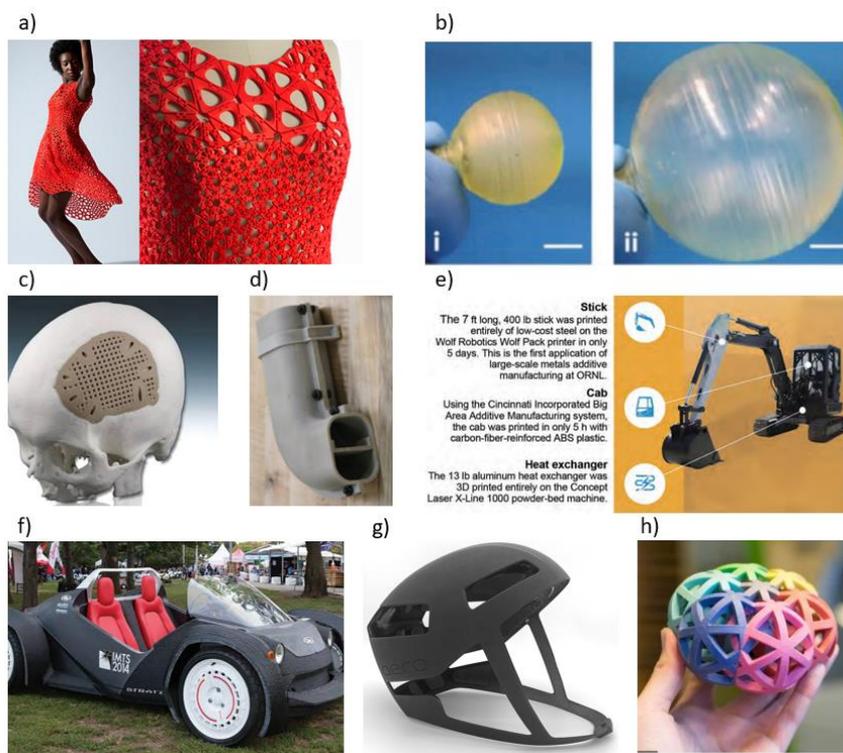


Figura 25. Exemplos de peças de polímeros fabricadas por processos de MA a) Vestimenta impressa por fusão em leito de pó de termoplástico; b) Balão de elastômero impresso em fotopolimerização em cuba com capacidade de aumentar 3x seu tamanho; c) Órtese de PEEK impressa por SLS; d) Duto de termoplástico impresso em fusão em leito de pó; e) Escavadora com componentes inteiramente impressos em ABS por processo de extrusão de material; f) primeiro carro inteiramente impresso em 3D por extrusão de material de polímeros; g) Capacete ortopédico impresso por MJF; h) Peça de polímero multicolorida impressa por jateamento de aglutinante (ASM INTERNATIONAL, 2020; LIGON et al., 2017; TAN, ZHU e ZHOU, 2020).

2.1.7 Softwares de gestão de impressão na manufatura aditiva

No mercado de MA existe uma variedade de softwares com especialização em gerenciamento de processos e manipulação de modelos, além de serem capazes de realizar simulações básicas dos processos considerando fatores como análise de defeitos, otimização de empacotamento e ajustes de arquivo 3D, como exemplo. Estes softwares preparam os modelos 3D e os adequam aos processos de MA, analisando erros de modelagem, simulação de procedimentos de impressão, geração, otimização e simulação de estruturas de suportes, geração, otimização e simulação de estruturas de preenchimento dos modelos, edição de arquivos e análise dos percursos de impressão.

A base dos modelos digitais utilizados na MA são arquivos que preservam não o volume completo do objeto 3D, mas sim os dados do contorno, ou superfície do objeto. A extensão de arquivo mais famosa para este tipo de modelagem é o STL. O termo de extensão de arquivos STL é derivado da palavra *STereoLithography* e é um formato criado por Charles Hull para o primeiro processo comercial de MA, a Estereolitografia (fotopolimerização em cuba),

desenvolvido pela empresa 3D Systems no final dos anos 1980. Outros associam o termo STL a *Stereolithography Tessellation Language* ou *Standard Tessellation Language*. Os arquivos STL são gerados a partir de dados de CAD em 3D, o qual a saída é uma representação aproximada do perímetro da superfície do modelo 3D formado por uma malha de triângulos. Esse processo é conhecido pelo nome de tesselação ou triangulação, gerando malhas compatíveis com as usadas em simulações. Atualmente extensões de arquivos melhores já foram desenvolvidas para utilização nos equipamentos de MA, como o 3MF, que possibilita arquivamento de informações como cores e texturas, além de melhorar o desempenho do processo por ser uma extensão de rápido processamento. Na tesselação, a qualidade da malha de triângulos afeta no tempo de processamento dos arquivos e na qualidade das peças impressas em 3D. Quanto menor os triângulos gerados, maior será a malha e mais precisa será a superfície da peça, contudo pode atrasar o processamento dos arquivos, e vice-versa. A Figura 26 demonstra a diferença entre uma malha com alta tolerância e outra com baixa tolerância para um mesmo modelo (GIBSON *et al.*, 2021).

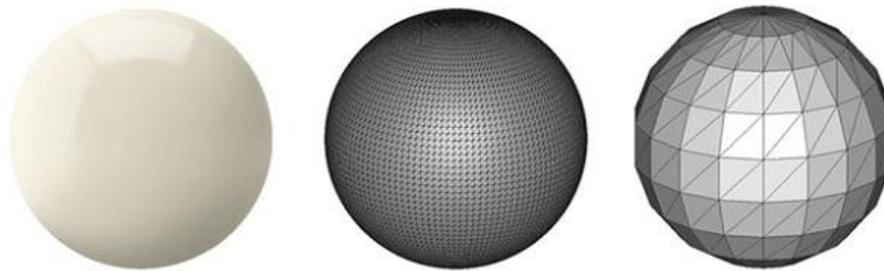


Figura 26. Exemplos de tesselação com diferentes tolerâncias. No centro, uma malha mais refinada e mais precisa, e a direita, uma malha mais grossa, menos precisa (I.MATERIALISE, 2021).

A partir dos modelos tesselados, os softwares executam diversas análises e otimização com foco na preparação e melhoria dos modelos para os processos de MA. Estes procedimentos envolvem o *Slicing* ou fatiamento (separação do modelo em camadas), geração de estruturas de suporte, identificação de erros nos modelos ou nos triângulos, geração de preenchimentos (estruturas internas que permitem preservação das dimensões e resistências das peças, com economia de material, visto que a região interna do volume não precisa ser totalmente preenchida) e otimização da cuba, ou volume, de impressão para impressões com diversas peças ao mesmo tempo. Quanto a otimização de cuba, ou empacotamento, chamada também pelo termo *Nesting*, são procedimentos aplicados para adequar as peças que são impressas dentro do volume hábil do equipamento, promovendo melhoria de empacotamento de peças (aumento da densidade do volume de impressão), prevenção de acúmulos térmicos ou carência térmica, prevenção de distorções e defeitos, análise de sobreposição de peças (peças que chocam uma

com as outras ou que se prendem umas nas outras impossibilitando separação) e avaliando o tempo e energia necessários para o processamento deste conjunto de peças. Estes procedimentos são realizados por uma série de simulações que analisa diferentes composições de posicionamentos das peças até que os posicionamentos com melhores desempenhos sejam identificados. Tais ferramentas são importantes não apenas para garantir um processo sem problemas, como melhorar o consumo de material, tempo e energia dispendidos durante a impressão (GIBSON *et al.*, 2021). A Figura 27 apresenta alguns exemplos de otimização e simulações que podem ser executadas através destas análises.

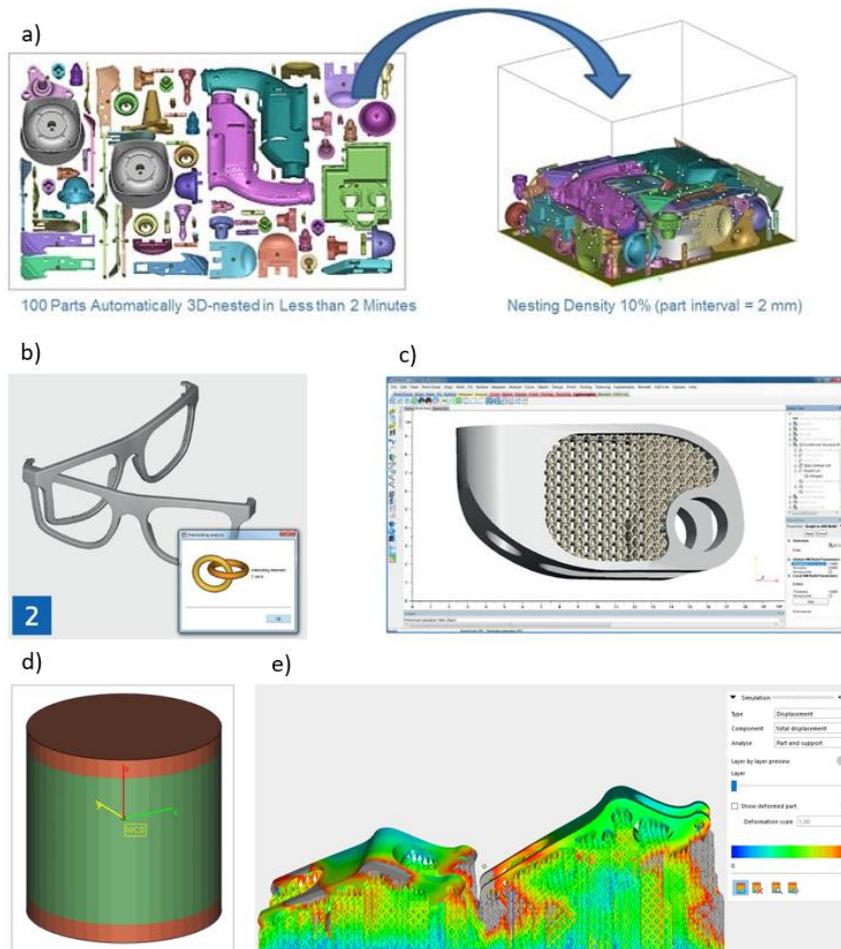


Figura 27. Otimizações e simulações para preparação de peças e de impressão. a) otimização da cuba de impressão para redução da altura de impressão e melhoria da densidade de empacotamento. B) análise de interlocking (peças presas umas nas outras); c) Geração de estruturas de preenchimento em configuração lattice; d) Análise de risco de distorções, região vermelha está sujeita a má distribuição de calor; e) Geração de estruturas de suporte e análise de possibilidade de distorção na peça e nos suportes (MATERIALISE, 2020).

Os principais softwares comerciais com funções de otimização, gestão de modelos e gestão de processos são listados na Tabela 5. É importante comentar ainda que cada desenvolvedora de equipamentos de MA, também desenvolve seus próprios softwares de gestão que são capazes de executar muitas destas funções.

Tabela 5. Principais softwares compatíveis com MA com funções de otimização e gestão de arquivos e de processos (Gibson et al., 2021; Sotomayor, Caiazzo e Alfieri, 2021)

| Softwares de otimização e gestão | Preparação de arquivos (tesselação, fatiamento, análise de problemas, coloração, texturização, etc.) | Geração de estruturas (suporte e preenchimento) | Otimização de cuba de impressão (Empacotamento e análises correlatas) | Simulações básicas (deformação, acúmulo térmico, análise de riscos, etc.) |
|--|--|---|---|---|
| 3D Model to print | X | | | |
| Slicer | X | | | |
| Meshmixer Autodesk | X | | | |
| Netfabb Autodesk | X | X | X | X |
| CADspan Pro CADspan | X | | | |
| Magic + Simulation module Materialise | X | X | X | X |
| 3-matic Materialize | X | | | |
| e-Stage Materialise | | X | | |
| MeshFlix SourceForge | X | | | |
| Cura software Ultimaker | X | X | | |
| SpaceClaim + Additive Prep Ansys | X | X | X | X |

2.2 Multi Jet Fusion (MJF)

O processo de Multi Jet Fusion, de sigla MJF, é uma tecnologia de impressão 3D desenvolvida pela HP, categorizada como um processo de manufatura aditiva de Fusão em leito de pó termal, que é aplicável primariamente para materiais poliméricos. A tecnologia de MJF oferece vantagens na velocidade de construção e controle sobre as propriedades da peça e do

material que estão além das capacidades de outros processos de impressão 3D. Ao depositar agentes funcionais, o material particulado na área de trabalho pode ser fundido, detalhado e transformado ponto a ponto. Este processo é considerado como termal por ser diferente de outros processos de fusão em leito de pó, utilizando como fonte de energia a radiação infravermelha, que reage com agentes para fundir as áreas das camadas de impressão. Uma descrição em etapas do processo de MJF é apresentada na Figura 28, explicando a função dos agentes utilizados nesta tecnologia (HP, 2018).

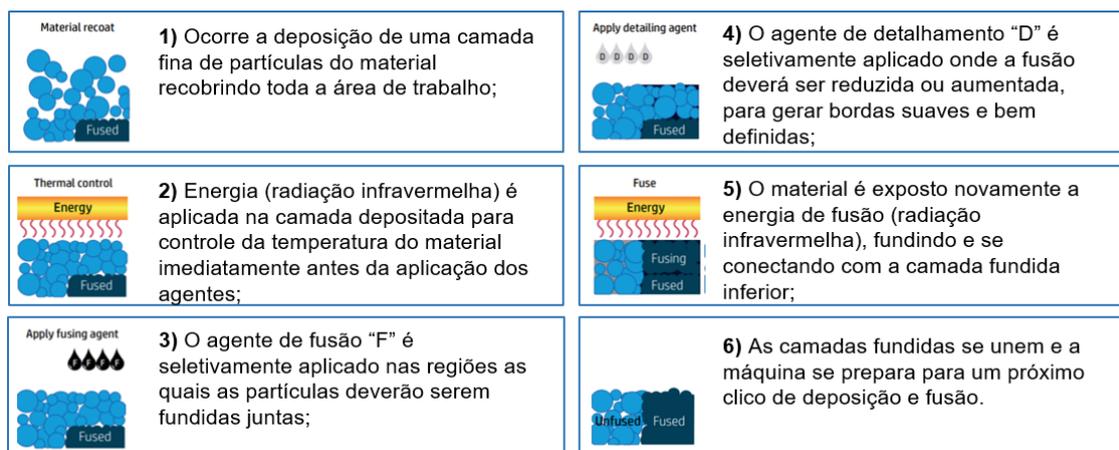


Figura 28. Etapas do processo de Multi Jet Fusion, baseado em material disponibilizado pela HP (HP, 2018).

Uma inovação importante na tecnologia Multi Jet Fusion é a estratégia de deposição de material e energia de alta velocidade que cria peças camada por camada, como é mostrado esquematicamente na Figura 29. Os carros duplos fazem a varredura na área de impressão em direções perpendiculares: um carro reveste a área de trabalho com material novo e o outro imprime agentes funcionais (Agentes de detalhamento e de fusão) e funde as áreas impressas depositando energia infravermelha. Isso separa os processos de recobrimento e impressão/fusão para que cada processo possa ser otimizado separadamente para desempenho, confiabilidade e produtividade (HP, 2018).

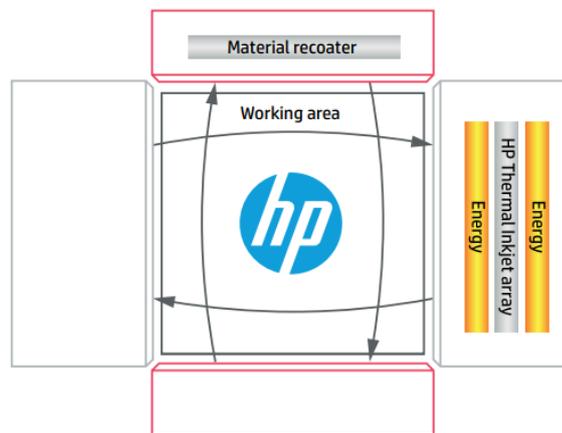


Figura 29. Esquema da impressão por Multi Jet Fusion, com direções de deposição de material e de energia perpendiculares (HP, 2018).

Em uma impressora HP Jet Fusion 3D, uma peça, ou conjunto de peças, é construída camada por camada sobre uma área de trabalho dentro de uma unidade de construção HP Jet Fusion 3D. Após a conclusão do trabalho, a unidade de construção é colocada em uma estação de processamento HP Jet Fusion para resfriamento, desempacotamento das peças e recuperação e atualização do material de construção. A estação de processamento pode ser inserida na impressora para configurar uma produção contínua. A profundidade da unidade de construção e da área de trabalho determinam as dimensões da maior parte que pode ser produzida. A tecnologia HP Multi Jet Fusion usa a tecnologia de jato de tinta térmica HP escalonável aplicadas seletivamente na área de impressão em diferentes larguras, empilhando cabeçotes de impressão ao longo da largura da digitalização (HP, 2018).

A tecnologia do MJF trabalha com base no controle de voxels, que são análogos aos pixels do 2D, mas para o 3D, servido como um elemento básico gráfico de volume. Na impressão 2D, os pixels são organizados em uma superfície em uma grade regular, enquanto na impressão 3D, os voxels também são impressos em uma grade 2D regular e um voxel tem profundidade. Os voxels formam uma camada fina que é a imagem da seção transversal de uma peça, e muitas dessas camadas são empilhadas para formar um objeto 3D. Em uma impressora 2D monocromática, um pixel é impresso ou não, e em impressoras 3D convencionais um voxel é fundido ou não. O Multi Jet Fusion é capaz de aprimorar a impressão 3D adicionando cores como na impressão a jato de tinta 2D, pois esta tecnologia é a primeira capaz de controlar a cor de cada voxel por combinações de cores CMYK, produzindo peças multicoloridas (HP, 2018). A Figura 30 demonstra uma comparação de um pixel impresso em uma folha de papel e voxel impressos por MJF.

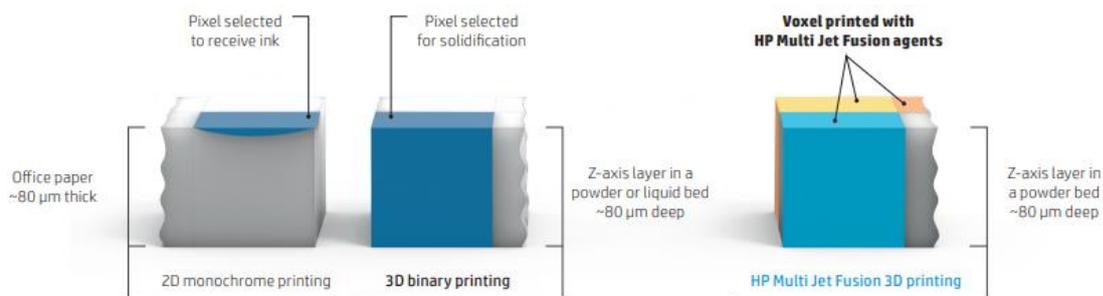


Figura 30. Representações de pixels em impressões 2D e voxels em impressões 3D (HP, 2018).

2.2.1 Equipamentos de impressão por MJF

A tecnologia de Multi Jet Fusion da HP possui três séries de impressoras e equipamentos associados para atender diferentes necessidades de materiais, produção e aplicação. As séries 4000 e 5000 contemplam impressoras de maior volume de impressão focadas em fabricação industrial em série de componentes básicos até aplicações avançadas utilizando materiais *comodity* e polímeros de engenharia, enquanto a série 500 contempla a impressora de MJF capaz de fabricar peças totalmente coloridas em cores diferentes, utilizando agentes corantes nos padrões CMYK para alterar as tonalidades do PA12 *Color Based* compatível com esta tecnologia, depositado juntamente com os agentes de fusão e de detalhamento.

A série 5000 agrega a impressora 3D HP Jet Fusion 5200 e seus equipamentos auxiliares. Esta máquina é versão amplificada e melhorada do modelo 4200, com mais funções e tecnologia mais avançada, com melhorias na produção (repetibilidade, escala de produção e custos). Este equipamento possui uma estação de processamento também mais avançada, além de unidades de trabalho e equipamento próprio de pós processamento (HP, 2020a). As unidades de trabalho são carrinhos onde são mantidas as cubas, que são as áreas de impressão do equipamento. A utilização destas unidades de trabalho permite melhorias na logística, na capacidade de produção e no controle da qualidade das peças, pois ao término de uma impressão, basta trocar as unidades de trabalho e dar continuidade ao processo, possibilitando agilidade na produção. As unidades podem ser separadas por processos de resfriamento natural ou forçado e podem ser limpas individualmente na estação de trabalho. Ainda, é possível condicionar e misturar material separadamente na estação de processamento, o que é uma vantagem logística significativa pois a troca de materiais na impressora é um processo trabalhoso e lento, que precisa ser executado com cuidado para mitigar contaminações entre materiais diferentes. Este equipamento é compatível com os termoplásticos PA11, PA12, PA12 GB (com esferas de vidro) e PP e o elastômero TPU. A Figura 31 apresenta a impressora 3D

HP Jet Fusion 5200 e a Estação de processamento 5200, exemplo de uma unidade de trabalho e do equipamento de pós-processamento próprio. A Tabela 6 apresenta as principais características de performance desta impressora.



Figura 31. Equipamentos da série 5000, com a impressora 3D HP Jet Fusion 5200 ao centro (HP, 2021).

Tabela 6. Principais características da impressora HP MJF 5200 (HP, 2020a).

| Principais características da Impressora HP Multi Jet Fusion 5200 | |
|--|---|
| Aplicações ideais | Prototipagem industrial e aplicações avançadas. Ambiente de produção de médio volume, produzindo de 220 a até mais de 550 peças por semana |
| Materiais compatíveis | HP 3D HR PA 11 HP 3D HR PA 12 HP 3D HR PA 12 GB HP 3D HR PP disponibilizado pela BASF BASF Ultrasint® TPU01 |
| Coloração das peças | Acinzentadas |
| Volume efetivo de impressão (c x l x a) | 380 x 284 x 380 mm |
| Tempo de impressão médio | 11,5 h (Configuração <i>Balanced</i>) 9,5 h (Configuração <i>Fast</i>) |
| Velocidade de impressão | Até 5058 cm ³ /h |
| Espessura da camada de impressão | 0,08mm ou 80µm |
| Resolução do trabalho | 1200dpi |
| Resolução da impressão | 1200dpi |

As impressoras de MJF possuem um sistema integrado de lâmpadas que são responsáveis pelas principais funções no processamento do material nesta tecnologia de manufatura aditiva. Há um sistema composto por um conjunto de lâmpadas térmica superiores

e lâmpadas de fusão, como o exemplo na Figura 32 que demonstra estes elementos em uma impressora 3D HP Jet Fusion 4200. As lâmpadas térmicas superiores possuem a função de controlar a temperatura do ambiente do volume de impressão, regulando-a para que a cuba de impressão apresente a temperatura adequada para o material processado, pois se os valores forem baixos demais ou altos demais as peças impressas estarão comprometidas e apresentam defeitos oriundos de resfriamento irregular e concentrações de calor. Já as lâmpadas de fusão, são as responsáveis por depositar a radiação infravermelha que afeta os agentes e possibilita a reação necessária para fundir a camada de pó, construindo a peça a partir do modelo 3D. As impressoras de MJF possuem ainda uma câmera térmica interna localizada adjacente as lâmpadas térmicas superiores (Moura, 2021). Esta câmera tem a função de monitorar o processamento, identificando variações localizadas de temperatura para que o equipamento ajuste automaticamente a temperatura da cuba. Este ajuste se dá pela regulação da temperatura pelas lâmpadas térmicas superiores, pelo ajuste na deposição de radiação infravermelha, pelas lâmpadas de fusão e pelo ajuste na deposição de agentes pelos cabeçotes da impressora de MJF, que possuem como subfunção regular a absorção de energia pelo material processado. Ainda, este sistema de deposição de energia alternado com o de deposição de material resulta em uma entrada de energia quase plana e com tempos constantes independente da geometria, que é entre 7 e 11s (Riedelbauch, Rietzel e Witt, 2019). A Figura 33 demonstra uma visão típica de uma cuba de MJF monitorada durante a impressão de peças.



Figura 32. Lâmpadas térmicas superiores e lâmpadas de fusão em uma impressora 3D HP Jet Fusion 4200 (MOURA, 2021).



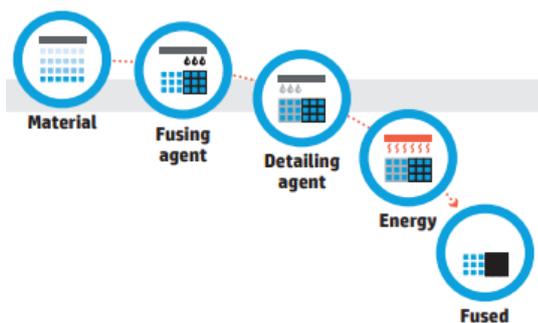
Figura 33. Visão da câmera térmica de monitoramento das impressoras MJF da HP (MOURA, 2021).

2.2.2 Fluxo de trabalho no processo MJF

O fluxo de trabalho típico para as impressoras MJF é apresentado na Tabela 7.

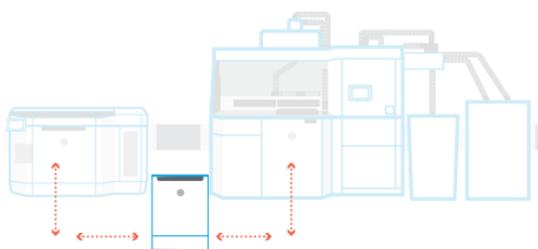
Tabela 7. Principais etapas do fluxo de trabalho das impressoras Multi Jet Fusion (HP, 2020).

| Etapas do fluxo de trabalho do MJF | |
|---|---|
| | <p>1) Preparação dos modelos 3D e envio ao equipamento:</p> <p>O fluxo se inicia com a preparação do design de acordo com especificações de DfAM (<i>Design for additive manufacturing</i> ou Design para manufatura aditiva) e checagem de erros ou defeitos pelo Software próprio, HP Build manager, ou softwares de terceiros, como o Materialize Magics.</p> <p>Em seguida os arquivos, contendo uma ou mais peças na cuba de impressão, é enviada ao equipamento para preparação do processo.</p> |
| | <p>2) Condicionamento do material e mixagem:</p> <p>Material virgem e reutilizado são aclimatados e mixados no equipamento de empacotamento. A mistura recomendada é na razão de 80% novo e 20% reutilizado. A mistura é colocada automaticamente na unidade de trabalho, a qual já contém a quantidade necessário de material condicionado de acordo com as especificações do arquivo de impressão. A unidade de trabalho deve ser inserida na impressora após a finalização do condicionamento.</p> |



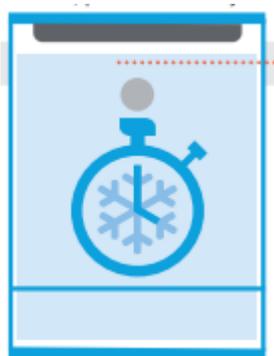
3) Seleção de parâmetros e impressão das peças:

As peças são fabricadas de acordo com os parâmetros pré-determinados do equipamento que podem ser “Balanced / Functional”, “Mechanical” ou “Aesthetic”, que variam a velocidade de impressão e o acabamento das peças de acordo com cada especificação e cada material. A impressão ocorre de acordo com o processo explicado anteriormente.



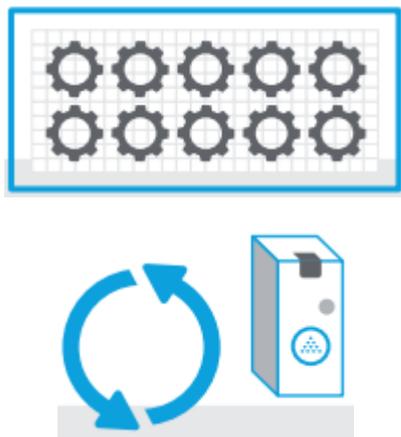
4) Troca de unidade de trabalho:

As unidades de trabalho permitem que o fluxo do processo seja mais otimizado que em outras tecnologias. As unidades de trabalho podem ser trocadas para diferentes produtos ou materiais. Após a finalização da impressão as peças em cada unidade de trabalho precisam passar por um resfriamento.



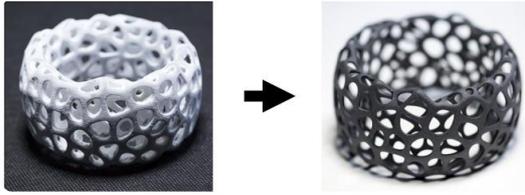
5) Resfriamento:

Após a impressão as peças contidas na unidade de trabalho precisam passar por um período de resfriamento que depende do volume de impressão e do material utilizado. Esta etapa é fundamental para garantir bom acabamento e propriedades adequadas aos produtos fabricados por MJF. Somente após o término deste período é possível seguir para o desempacotamento.



5) Desempacotamento:

Esta etapa consiste na retirada do pó remanescente e das peças da unidade de impressão, que é realizada no equipamento de desempacotamento apropriado. O pó remanescente é succionado para ser armazenado como material reutilizado. As peças são limpas e separadas para pós processamento. As peças são retiradas com material adjacente aderido à sua superfície e precisam ser limpas por jateamento.



6) Pós-processamento:

As peças são finalizadas por procedimentos de limpeza (Jateamento de ar, água ou abrasivos) e de acabamento (Lixamento, tamboreamento ou vibroacabamento, polimento químico ou *vapor smoothing*, tingimento, pintura, revestimentos, metalização ou galvanização, colagem, montagem, etc.)

2.2.3 Agentes funcionais

No processo de Multi Jet Fusion, cada camada de uma peça é definida por uma área que é fundida (ou transformada) cercada por pó não fundido. Os materiais de impressão HP 3D de alta reutilização são projetados para minimizar o desperdício de pó e podem ser reutilizados posteriormente. Para alta resistência e qualidade de superfície, é importante que a nova camada se ligue a qualquer material previamente fundido abaixo dela e as bordas sejam lisas e bem definidas. Isso é realizado com vários agentes aplicados pela matriz de cabeçotes de impressão (HP, 2018).

No processo de MJF os agentes são depositados por cabeçotes similares aos utilizados em tecnologias de impressão 2D, o agente de fusão é aplicado diretamente nas regiões que formam a projeção das áreas transversais do modelo 3D em cada camada, enquanto o agente de detalhamento é aplicado nas regiões periféricas, ou contorno, das áreas onde o agente de fusão foi aplicado. Quando a energia infravermelha é aplicada, o agente de fusão reage fundindo a camada e a unindo com as camadas inferiores, mas a região com o agente de detalhamento permanece constante. Esse mecanismo possibilita uma melhor resolução nas bordas da área afetada, gerando peças com bom detalhamento das superfícies, que preserva os detalhes do modelo da peça fabricada por MJF. Um esquema detalhando a deposição destes agentes é apresentado na Figura 34.

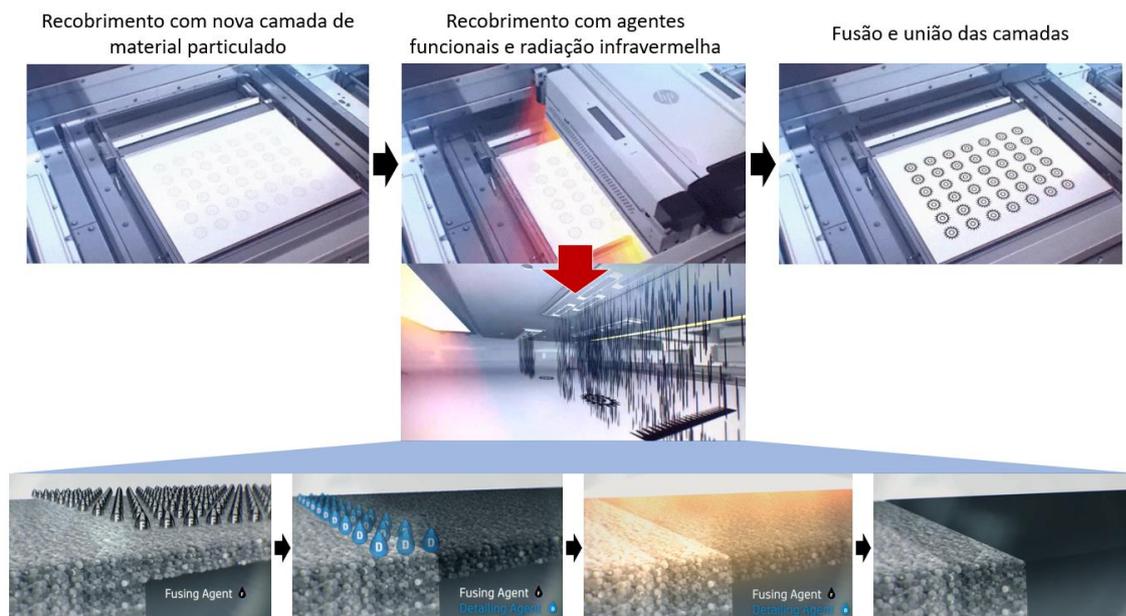


Figura 34. Esquema da deposição de agentes funcionais durante o processo de MJF. baseado em HP (2017).

Desta forma, agente de fusão tem como função definir as áreas da camada que serão fundidas para dar forma as peças, e o agente de fusão tem a função de restringir estas regiões, para que somente a área contemplada com o agente de fusão reaja a energia infravermelha. A composição de ambos os agentes foi estudada por Scherer, Kottenstedde e Matysik (2020), aplicando técnicas de caracterização de cromatografia líquida de alto desempenho (*high-performance liquid chromatography* ou HPLC) combinada com o método de ionização por eletropulverização positiva quadru-pólo (*Positive electrospray ionization-quadrupole-time-of-flight* ou HPLC-ESI-QTOF). Em seu estudo, o padrão isotópico característico ajudou a identificar 2-pirrolidona e trietilenoglicol como solventes orgânicos em ambos os agentes. Uma razão para incluir 2-pirrolidona nas fórmulas dos agentes pode ser o alto ponto de ebulição de 251°C, resultando em uma baixa tendência para liberação de gás, já o trietilenoglicol é um aditivo solúvel em água e incolor com baixa volatilidade e um ponto de ebulição muito alto (288°C, este sendo uma substância aplicada em tintas de impressão, compostos de limpeza e fluidos de transferência de calor). Segundo os levantamentos do estudo, o agente de detalhamento continha 3,7% de 2-pirrolidona e 11,1% de trietilenoglicol, quantificado por cromatografia gasosa de detecção de ionização de chama (GC-FID) e o agente de fusão continha 18,7% de 2-pirrolidona e 8,4% de trietilenoglicol (SCHERER, KOTTENSTEDDE e MATYSIK, 2020).

Além dos solventes orgânicos, os agentes de fusão e detalhamento incluíam uma certa quantidade de água. O conteúdo de água do agente foi identificado por Scherer, Kottenstedde e Matysik (2020) através de titulação Karl Fisher e foi determinado como 83% no agente de

detalhamento e 65% no agente de fusão. O alto teor de água do agente de detalhamento tem um efeito de resfriamento local baseado na energia de evaporação que é removida no processo. Conseqüentemente, durante o processo de impressão, os contornos tornam-se mais nítidos e a qualidade da superfície é aumentada. Além disso, o agente de detalhamento pode ser aplicado na mesma área que o agente de fusão para possibilitar um melhor controle térmico. O teor de água do agente de fusão encontrado foi menor, pois seu objetivo é possibilitar uma melhor absorção de radiação infravermelha, resultando em polímero coalescente. Além disso, a natureza aquosa do agente de fusão permite a penetração parcial na camada do material em pó. A água também atua diminuindo a temperatura da superfície aquecida e no contorno da área de impressão, devido a energia de evaporação retirada no processo (RIEDELBAUCH, RIETZEL e WITT, 2019). Foi identificada ainda a presença de negro de fumo nos agentes, componente que dá uma coloração escura característica nas peças fabricadas por MJF. Para uma distribuição homogênea do negro de fumo no líquido, são necessários surfactantes e co-solventes orgânicos. Esses ingredientes fornecem um comportamento umectante desejável para o processo de MJF (SCHERER, KOTTENSTEDDE e MATYSIK, 2020). Além disso a presença do negro de fumo é associada a maior tendência de absorção de luz, o que otimiza a deposição de energia infravermelha na impressão por MJF (RIEDELBAUCH, RIETZEL e WITT, 2019).

Foi identificada ainda por Scherer, Kottenstedde e Matysik (2020) a presença de 2-metil-1,2-tiazol-3-ona (2-metil 4-isotiazolin-3-ona) e 1,2-benzotiazol-3-ona (3-benzisotiazolinona), ambos extraídos dos traços dos agentes. Esses tipos de biocidas são UV-ativos com base em sua estrutura molecular, incluindo um sistema conjugado de elétrons π . A atividade de UV de 2-metil 4-isotiazolin-3-ona foi confirmada pelo sinal de UV correspondente a um comprimento de onda de 280 nm e a de 3-benzisotiazolinona em um comprimento de onda de 250 nm. O agente de fusão revelou possuir menor teor de 2-metil-4-isotiazolin-3-ona e 3-benzisotiazolinona. Esses biocidas são adicionados aos agentes para prevenir contaminações e crescimento bacteriano durante o armazenamento e o período de uso. Assim, o conteúdo de água dos agentes está provavelmente em correlação direta com a concentração de biocida (SCHERER, KOTTENSTEDDE e MATYSIK, 2020). Além destes, o estudo identificou a presença de compostos com 2 e 3 unidades epóxi em concentrações menores, que segundo os autores podem ter a função de ajustar a viscosidade e homogeneidade dos agentes, e garantir soldabilidade ao pó dos polímeros.

2.2.4 Materiais aplicados no processo MJF

A tecnologia de MJF da HP permite a manufatura de peças de diferentes termoplásticos e de elastômeros. Os termoplásticos compatíveis com este processo de manufatura aditiva são o PA11 (Poliamida), PA12, PA12 reforçado com esferas de vidro, e PP (Polipropileno). Quanto aos elastômeros, é possível utilizar o TPU (Termoplástico Poliuretano elastômero) e TPA (Termoplástico Poliamida elastômero). A Figura 35 demonstra exemplos de peças fabricadas por MJF para cada material. Já Figura 36 apresenta um guia de seleção para os materiais de MJF disponibilizado pela HP, que agrega uma comparação geral das principais características destes materiais.

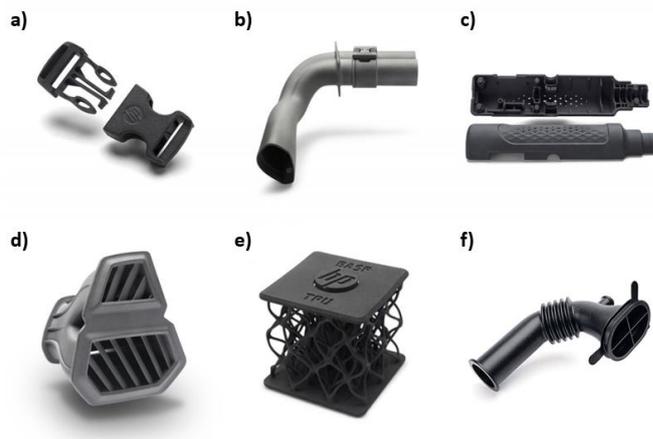


Figura 35. Exemplos de peças fabricadas pela tecnologia de manufatura aditiva Multi Jet Fusion (MJF) da HP, baseado em (HP, 2019).

| | HP 3D Printing Materials for HP Jet Fusion 5200 Series 3D Printing Solutions | | | | | HP 3D Printing Materials for HP Jet Fusion 4200 Series 3D Printing Solutions | | | | | HP 3D Printing Materials for HP Jet Fusion 500/300 Series 3D Printers |
|------------------------------------|--|----------------|-------------------|--|--|--|----------------|-------------------|---|--|---|
| | HP 3D HR PA 11 | HP 3D HR PA 12 | HP 3D HR PA 12 GB | HP 3D HR PP enabled by BASF ² | BASF Ultrasint [®] TPU01 ² | HP 3D HR PA 11 | HP 3D HR PA 12 | HP 3D HR PA 12 GB | HP 3D HR TPA enabled by Evonik ³ | ESTANE [®] 3D TPU M95A ³ | HP 3D HR CB PA 12 |
| Stiffness | ● | ● | ★ | ■ | ▲ | ● | ● | ★ | ▲ | ▲ | ● |
| Impact resistance | ● | ■ | ▲ | ■ | ★ | ● | ■ | ▲ | ★ | ★ | ■ |
| Elongation | ● | ■ | ▲ | ■ | ★ | ● | ■ | ▲ | ★ | ★ | ■ |
| Dimensional capability | ● | ★ | ● | ■ | ■ | ● | ★ | ● | ■ | ■ | ■ |
| Level of detail | ★ | ● | ● | ■ | ■ | ★ | ● | ● | ● | ■ | ● |
| Flat part | ■ | ● | ★ | ▲ | ■ | ■ | ● | ★ | ■ | ■ | ● |
| Temperature resistance | ▲ | ■ | ● | ■ | ▲ | ▲ | ■ | ● | ■ | ● | ■ |
| Chemical resistance ^{4,5} | ● | ● | In testing | ★ | ■ | ● | ● | In testing | ▲ | In testing | ● |
| Low moisture absorption | ▲ | ▲ | ▲ | ★ | ■ | ▲ | ▲ | ▲ | ■ | ■ | ▲ |
| Lightweight | ● | ● | ■ | ★ | ▲ | ● | ● | ■ | ● ⁶ | ▲ | ● |

★ Best ● Good ■ Fair ▲ Not recommended

Figura 36. Guia de seleção de materiais de impressão 3D para MJF (HP, 2020).

2.2.5 Polipropileno

O PP, ou Polipropileno, desenvolvido para o MJF possui como pontos fortes a boa resistência química, soldabilidade e baixa absorção, além de ser biocompatível, o tornando ideal para diversas aplicações funcionais. O PP é um commodity, sendo um dos plásticos mais disponíveis no mercado, e inclusive o de custo mais acessível para a tecnologia de manufatura aditiva por MJF. Apresenta ainda boa performance de impressão e fácil processamento. Estas características tornam o PP do MJF um material versátil ideal para aplicação automotivas, industriais, de bens de consumo, médicas, tubulações, etc (HP, 2020). A Tabela 8 apresenta as principais propriedades do PP para MJF, desenvolvido pela HP. O polipropileno é um polímero termoplástico semi-cristalino produzido por polimerização de crescimento em cadeia catalítica. Por causa de suas propriedades mecânicas, sua disponibilidade e a variabilidade de suas estruturas químicas, os polipropilenos (homo e copolímeros de propeno) são muito interessantes do ponto de vista industrial e podem ser usados para uma ampla gama de aplicações (KOLTZENBURG, MASKOS e NUYKEN, 2017).

Tabela 8. Propriedades gerais do PP para MJF, disponibilizado pela Basf (HP, 2020).

| Propriedade | Média (plano XY) | Média (direção Z) | Método de teste |
|--|------------------|-------------------|-----------------|
| Ponto de fusão do pó (°C) | | 138 | ASTM D3418 |
| Tamanho de partículas (µm) | | 62 | ASTM D4351 |
| Densidade aparente do pó (g/cm ³) | | 0,34 | ASTM D1895 |
| Resistência a tração (MPa) | 29 | 29 | ASTM D638 |
| Modulo elástico (MPa) | 1600 | 1600 | ASTM D638 |
| Temperatura de deflexão térmica [@0,45MPa, 66psi] (°C) | 100 | 100 | ASTM D648 |
| Temperatura de deflexão térmica [@1,82MPa, 264psi] (°C) | 60 | 60 | ASTM D648 |
| Deformação até escoamento (%) | 9,5 | 9,5 | ASTM D638 |
| Deformação até ruptura (%) | 20 | 14 | ASTM D638 |
| Resistência ao Impacto (KJ/m ²) | 3,5 | 3,0 | ASTM D256 |
| Densidade (g/cm ³) | | 0,87 | ASTM D792 |

Sendo um dos mais recentes materiais desenvolvidos para MJF, o PP ainda foi pouco investigado em trabalhos científicos e técnicos. O único estudo publicado até o momento é o de Safka et al. (2021) que buscou fazer uma avaliação completa das características morfológicas e térmicas do pó de PP para MJF diante de diferentes misturas de material (virgem, misturado e reutilizado), e as propriedades mecânicas de peças impressas diante da variação de orientação de impressão (direção e rotação das amostras dentro da cuba de impressão). A Figura 37 apresenta a distribuição de tamanho de partícula do pó 100% virgem, misturado (virgem + reutilizado) e 100% reutilizado, demonstrando valores com proporções parecidas. Já a Figura 38 apresenta imagens coletadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para estas misturas de pó de PP, demonstrando morfologia irregular semelhante a outros pós de polímeros para MJF (ŠAFKA *et al.*, 2021).

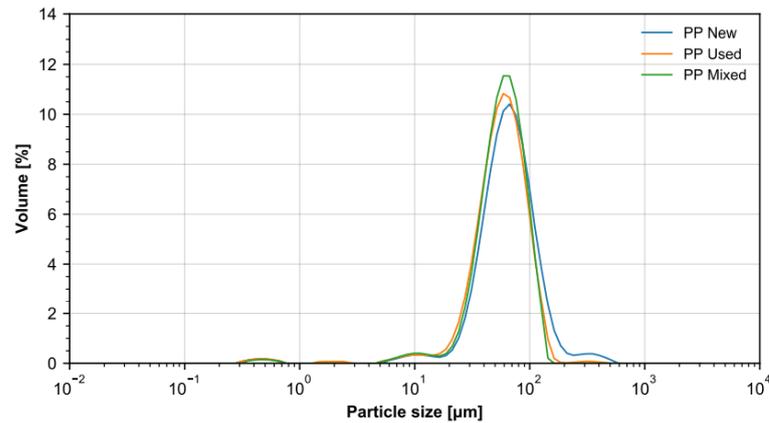


Figura 37. Os histogramas da distribuição de tamanho de pó de PP novo, usado e misturado (ŠAFKA et al., 2021).

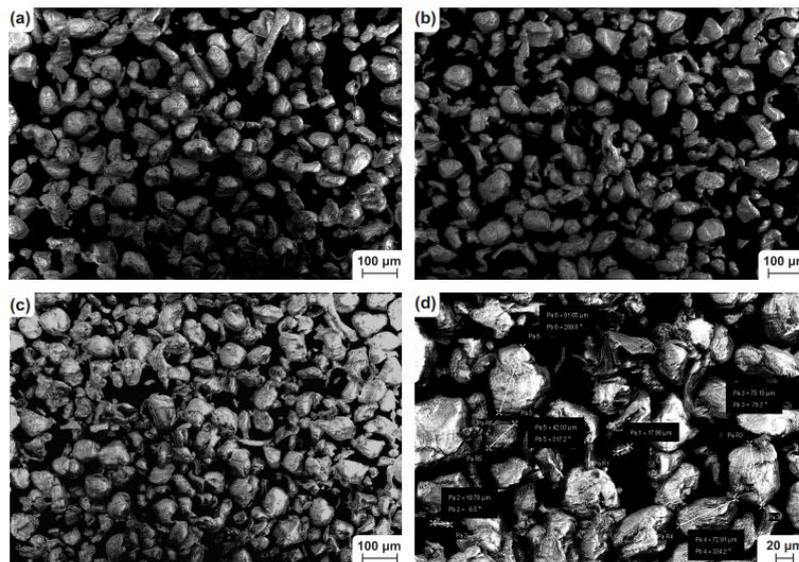


Figura 38. Imagens da morfologia do pó de PP para MJF obtidas por MEV, (a) novo; (b) usado; (c) e (d) misturado (ŠAFKA et al., 2021).

Para avaliar as características térmicas do pó de PP, utilizaram as técnicas de TGA e DSC com um ciclo de aquecimento e outro de resfriamento. A Figura 39 apresenta os gráficos resultantes do DSC. O pico de cristalização é identificado em 110°C e o ponto de fusão do pó de PP é de cerca de 138°C. A maior variação nos resultados foi encontrada para o ponto de fusão (ŠAFKA *et al.*, 2021). Para os autores, a estabilidade térmica e a morfologia do pó de PP de diferentes proporções de mistura (novo, usado e misturado) são muito semelhantes e, portanto, o processo MJF não influencia significativamente as propriedades estruturais e térmicas do pó de PP. Isso implica que o pó de PP pode ser usado repetidamente em certas proporções de mistura (usamos a proporção de 80/20% recomendada pelo fabricante) (ŠAFKA *et al.*, 2021).

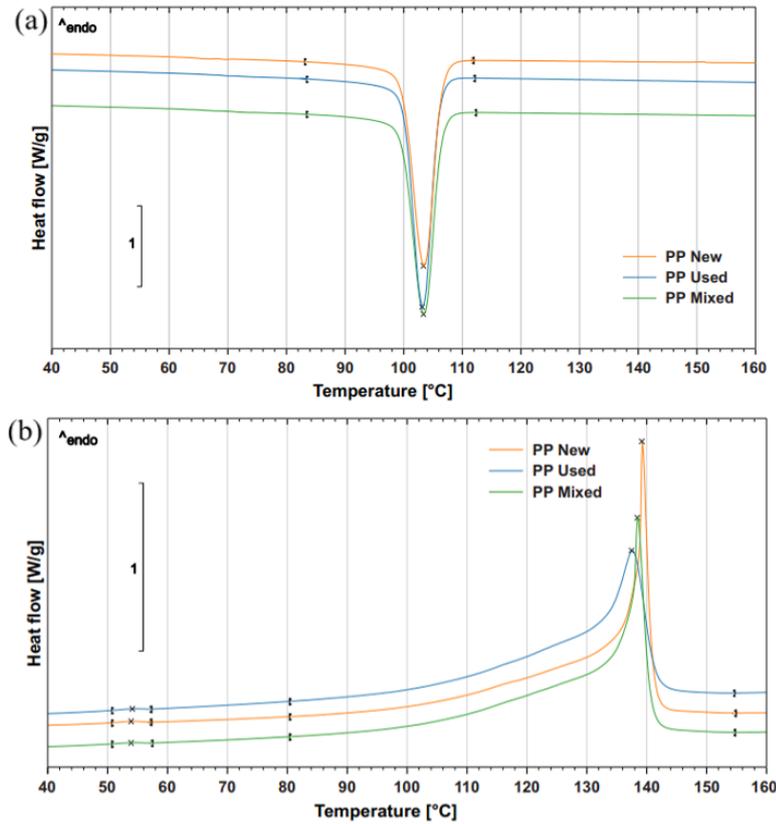


Figura 39. (a) Ponto de cristalinidade de pós de PP (novos, usados, mistos); e (b) Ponto de fusão de pós de PP (novos, usados, mistos) (ŠAFKA et al., 2021).

Para identificar a variação nas propriedades mecânicas resultantes das orientações de impressão Safka et al. (2021) aplicaram a configuração de direções e rotações demonstradas na Figura 40, onde repetiram cada direção para três rotações (0° , 45° e 90°) como mostrado na mesma imagem. Embora a imagem exemplifique as orientações com amostras de tração, as mesmas configurações de orientação foram testadas para amostras de ensaio de dobramento e de impacto (modelo *Charpy*).

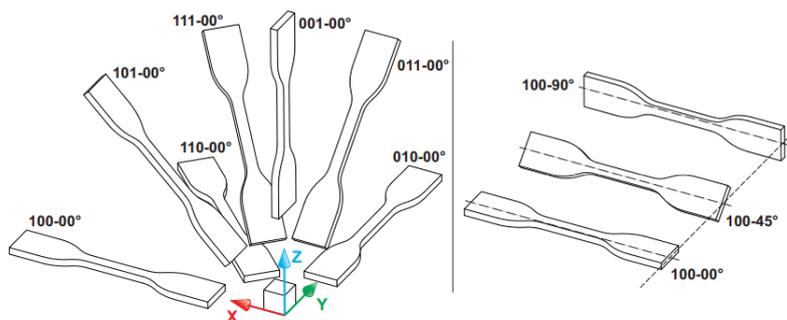


Figura 40. Posições das amostras utilizadas no estudo de Safka et al. (2021) demonstrando as diferentes direções e rotações analisadas (ŠAFKA et al., 2021).

Quanto aos resultados dos testes de impacto, a tenacidade foi significativamente menor para a orientação em 001 (vertical), seguida por 111 (diagonal). A orientação de 110 (horizontal) mostrou diferenças significativas entre suas configurações de rotação (0° , 45° e

90°). O aumento da variação na tenacidade ocorreu em todas as configurações de orientação, exceto no caso de 110 (horizontal) e 111 (diagonal) (ŠAFKA *et al.*, 2021). Estes resultados são mostrados na Figura 41.

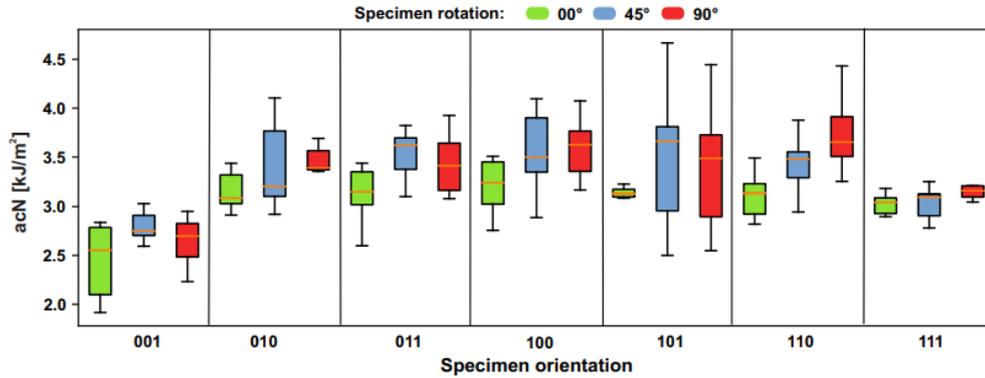


Figura 41. Resistência ao impacto para as diferentes configurações de orientação testadas com amostras de PP impressas por MJF (ŠAFKA *et al.*, 2021).

Quanto aos testes de tração, mostrados na Figura 42, as amostras de PP impresso por MJF obtiveram módulo elástico na orientação 001–00° (vertical) diferente significativamente da maioria das outras orientações. Outra diferença significativa foi observada para o par 011–45° e 011–90° (diagonal). As variações aumentaram no caso da orientação 111 (diagonal), mas também nas outras configurações (001, 010, 110). A resistência mecânica foi significativamente diferente para as configurações 001–00° e 001–90°. Uma diferença significativa quanto a rotação foi encontrada para as orientações 010 e 100. As altas variações foram também encontradas para a configuração 001–45° (ŠAFKA *et al.*, 2021). Diversas variações similares foram identificadas para a deformação no teste de tração e para a tensão máxima sob dobramento e modulo de flexão, conforme mostrado na Figura 43 e na Figura 44.

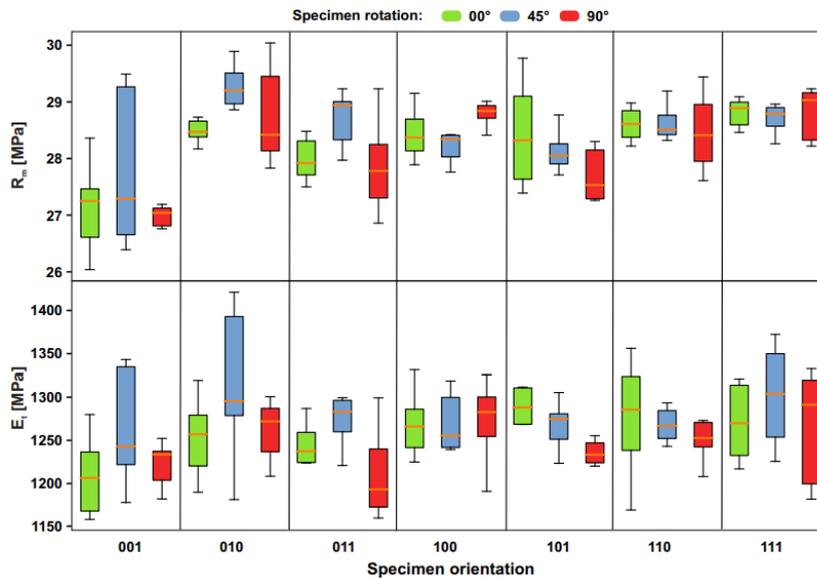


Figura 42. Tensão máxima a tração e módulo elástico para as diferentes configurações de orientação testadas com amostras de PP impressas por MJF (ŠAFKA *et al.*, 2021).

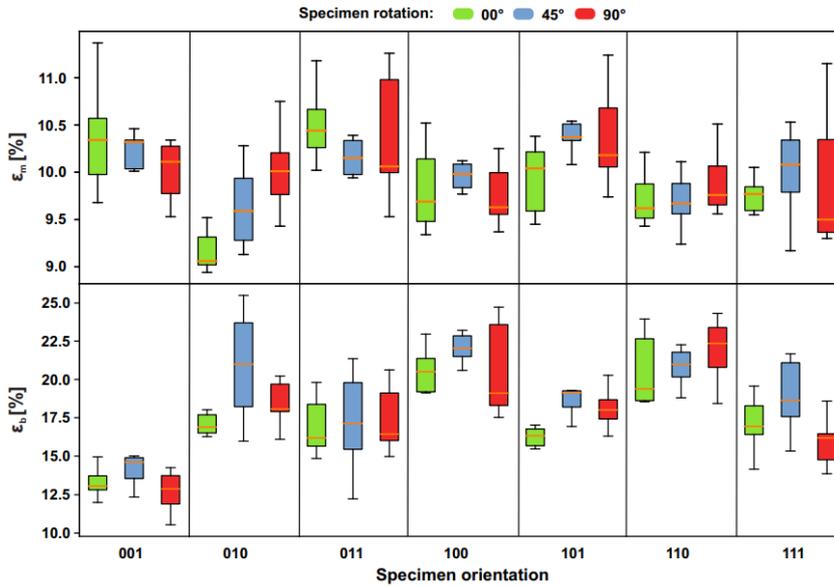


Figura 43. Deformação até tensão máxima e Deformação até ruptura para as diferentes configurações de orientação testadas com amostras de PP impressas por MJF (ŠAFKA et al., 2021).

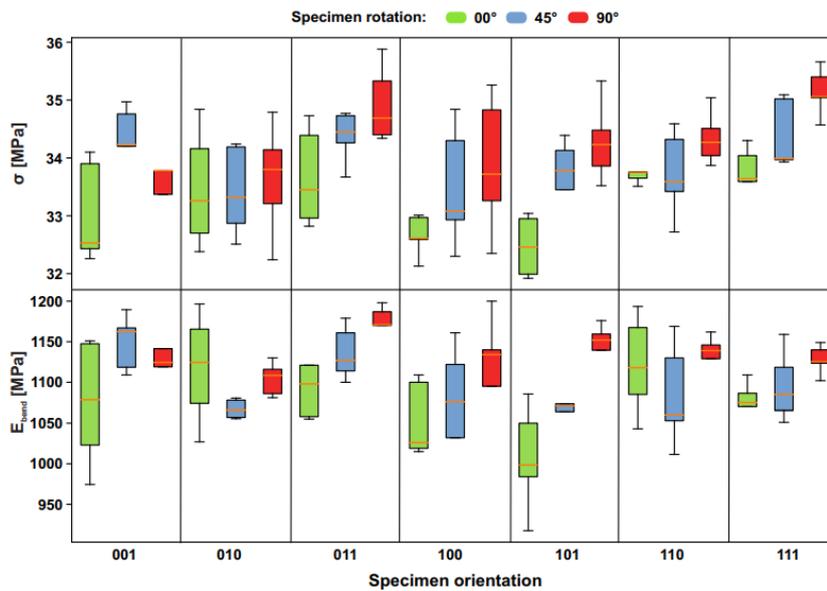


Figura 44. Tensão máxima a flexão e modulo de flexão para as diferentes configurações de orientação testadas com amostras de PP impressas por MJF (ŠAFKA et al., 2021).

Embora tenha identificado a ocorrência de variações o estudo de Šafka *et al.* (2021) não consegue indicar de forma clara e consisa quais orientações são as melhores para melhoria das propriedades. Contudo, tentam argumentar o que pode ter afetado as variações observadas. Este comportamento, de propriedades significativamente dispersas, é associado pelos autores a três fatores. O primeiro fator seria a influência da área de superfície em uma determinada camada, pois quando uma amostra possui área transversal de impressão muito pequena, esta área

superaquece excessivamente o material de impressão e, portanto, as propriedades mecânicas resultantes podem ser degradadas até certo ponto (ŠAFKA *et al.*, 2021).

O segundo fator seria o posicionamento das amostras no volume da cuba de impressão, como próximo a paredes e cantos ou próxima a base inferior ou a superfície da cuba, que podem apresentar taxas de resfriamento não homogêneas gerando uma flutuação adicional nas propriedades mecânicas (ŠAFKA *et al.*, 2021). Nos processos de MA por PBF, como é o caso do MJF, peças que estão no centro do espaço de impressão resfriam gradualmente de forma linear, enquanto as partes que estão nos cantos ou na parte inferior ou superior do espaço de impressão esfriam mais rápido devido à grande dissipação de calor pela proximidade com a extremidade da cuba. Os autores supõem ainda que, na parte superior da cuba de impressão, no espaço livre com ar termicamente controlado, pode haver uma grande queda de temperatura entre a temperatura das peças e a temperatura ambiente (ŠAFKA *et al.*, 2021).

O terceiro fator apontado por este estudo seria a anisotropia induzida pelo processo de deposição e impressão por camadas. Esperasse que o carregamento das amostras transversalmente à orientação da camada de impressão possa levar a propriedades mecânicas mais baixas, visto que este é um efeito bem conhecido na MA em geral (ŠAFKA *et al.*, 2021). Os autores concluíram que o módulo elástico, a resistência a tração, a tenacidade e a deformação por tração são sistematicamente baixas para a orientação 001, o que indica que estas amostras são mais dúcteis com uma resistência de carga menor. Os autores argumentam que esta variação após o material superar a tensão máxima, então a tensão de tração que atua sobre as camadas é excessiva devido à área da camada ser a menor para a orientação 001, ocasionando no surgimento rápido de rachaduras (ŠAFKA *et al.*, 2021). Da mesma forma, a orientação 010 forneceu a área mais alta da camada impressa, desta forma, a elasticidade e a resistência final foram significativamente melhoradas para a orientação 010 em comparação com a orientação 001. Contudo, as peças na orientação 010 eram mais frágeis, mas com uma alta tensão de tração, indicando que a resistência intercamada à propagação de trincas era muito melhor (dado também pelo fato de que a espessura da camada era menor e, portanto, mais camadas eram capazes de suportar melhor a carga aplicada) (ŠAFKA *et al.*, 2021).

Outro resultado, relativo ao processo de MJF em si, levantado neste estudo foi que é necessário maximizar a densidade do empacotamento (de forma ideal na faixa de 6–11%), pois segundo os autores, em impressões com valores de densidade de empacotamento abaixo de 6%, o custo-benefício do MJF diminui muito, por haver grande desperdício de material.

2.2.6 Parâmetros do processo MJF

O desempenho do processo e das peças impressas por Multi Jet Fusion estão sujeitos aos efeitos dos parâmetros de processo, bem como toda tecnologia de manufatura. O MJF possui basicamente duas categorias de parâmetros, aqueles que não são controláveis e os que são controláveis. Os não controláveis são aqueles que são pré-estabelecidos nas configurações de processamento dos equipamentos de MJF e são alterados restritamente e automaticamente pelos softwares e algoritmos dos equipamentos de forma a melhorar o desempenho da impressão em tempo real e de acordo com os dados do material utilizado e do posicionamento das peças. São estes a espessura de camada, deposição de material em pó, deposição de radiação infravermelha, deposição de agentes de fusão, detalhamento e corantes, velocidade de varredura de energia e temperatura da cuba.

Já os parâmetros controláveis são aqueles que os operadores do equipamento têm liberdade modificar de acordo com as necessidades. São estes a orientação espacial das peças no volume de impressão, a altura das peças no volume de impressão, a proximidade entre peças, a proximidade entre as peças e as superfícies do volume de impressão, a taxa de mistura de material (novo/virgem e reutilizado), o resfriamento, preenchimento do modelo 3D, a triangulação ou a resolução do arquivo do modelo 3D.

Além destes parâmetros há outros fatores externos que podem afetar o processo de MJF, que são a temperatura ambiente, o fluxo de ar e a umidade relativa ambiente. Para estes fatores externos, a HP, fabricante dos equipamentos de tecnologia de MJF recomenda que as instalações dos equipamentos possuam ventilação controlada, que os equipamentos possuam seus espaços adjacentes livres para circulação de ar, que a temperatura da instalação seja controlada entre 20°C e 30°C e que possua uma umidade relativa de 40% a 60%.

2.2.7 Orientação espacial das peças

Em todos os processos de MA, a orientação espacial de construção das peças impressas é um dos principais focos de preocupação, por ter efeito direto nas características, na qualidade e nas propriedades das peças. Esse fenômeno é observado em várias tecnologias de MA de polímeros e é principalmente relacionado às microestruturas transmitidas pelas técnicas de MA (LEE, PANDELIDI e KAJTAZ, 2020). A seleção da melhor orientação de construção é um fator muito importante, pois afeta o tempo de impressão e a qualidade do produto fabricado, encolhimento, distorções, fluxo de material, custo do processo, distribuição de calor, desempenho mecânico, dentre outros fatores (MATOS, ROCHA e PEREIRA, 2020).

As peças fabricadas por MA apresentam anisotropia, característica inata de grande maioria dos materiais disponíveis para estas tecnologias. Por definição, a anisotropia é a característica de um material variar suas propriedades físicas com a variação de orientação. Quando um material apresenta comportamento oposto a este, diz-se que este é isotrópico. Na MA, este fenômeno ocorre não necessariamente pelas características do material em si, mas devido a fabricação camada por camada em uma direção preferencial. Isso afeta na seção transversal das áreas das camadas que estão sendo unidas e no efeito da energia que une as camadas, que pode gerar diferentes graus de adesão entre camadas. Isso impõe limitações importantes na resistência da peça fabricada, pois os mecanismos de deformação e a forma como as tensões atuam nestas peças dependem, por tanto, da forma como estas camadas foram construídas e da adesão entre as camadas. Conseqüentemente, é importante avaliar a direção de construção ideal que pode maximizar as propriedades mecânicas de componentes impressos por MA, levando em consideração o estado de tensão esperado (ANGELO, STEFANO e GUARDIANI, 2020).

As normas padronizam a conotação desta orientação de impressão quanto a posição em relação aos eixos de um volume (X, Y e Z) (ABNT, 2019). Para isso, utilizam-se nomenclaturas de orientações baseadas nestes eixos de coordenadas cartesianas. Por exemplo, para peças direcionadas na vertical pode-se dizer que está orientada em “Z” e para peças direcionadas na horizontal pode-se dizer que está orientada em “XY”. O mesmo serve para a conotação de ângulos e rotações, sendo o aconselhável considerar a regra da mão direita aplicada em cada sentido (X, Y ou Z) para definir se a rotação é positiva ou negativa (ABNT, 2019). Para definir a conotação correta é preciso nomear com base na orientação ortogonal, que tem como base a simetria do objeto para saber qual direção o objeto está de fato orientado. Como referência, a Figura 45 apresenta alguns exemplos que consideram estes pontos e a conotação adequada para cada orientação. Como mostrado nestes exemplos, primeiro coloca-se o eixo que é paralelo ao maior comprimento do objeto, segundo o eixo que é paralelo ao segundo maior comprimento e, por fim, o eixo paralelo ao menor comprimento (ABNT, 2019).

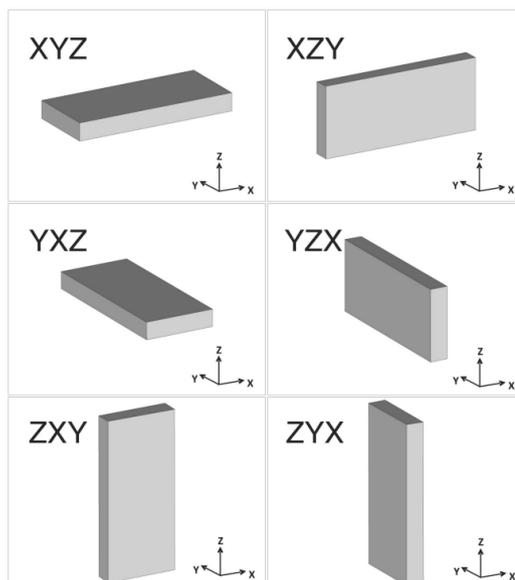


Figura 45. Exemplos de notação de orientações que leva em consideração a orientação ortogonal e a simetria dos objetos (ABNT, 2019).

Esta notação de orientação ortogonal pode ser abreviada quando a simetria permitir. No caso de uma amostra de tração, demonstrada na Figura 46, que possui simetria bilateral, a notação da orientação pode ser descrita listando os eixos paralelos às dimensões maiores e a segunda maior. Já com uma amostra redonda, com simetria rotativa, pode ser descrita somente listando o eixo ao qual a maior dimensão está paralela (ABNT, 2019).

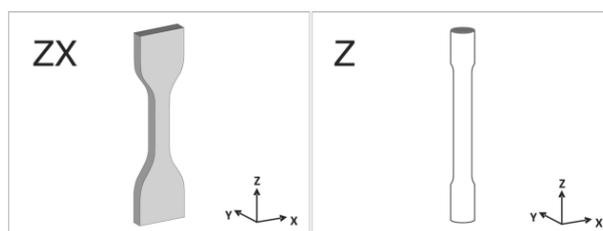


Figura 46. Exemplos em que a simetria permite abreviatura de notação de orientação ortogonal de peças fabricadas por MA.

No MJF este parâmetro crucial também desperta atenção quanto se trata de conhecer e melhorar o desempenho da impressão de peças. Alguns estudos já foram executados visando analisar as influências da orientação das peças nas propriedades, porosidade e acabamento superficial de materiais para MJF como Lee et al. (2020), O'Connor et al. (2018), Sagbas (2020) e Mehdipour et al. (2021). A Figura 47 apresenta as orientações avaliadas nestes trabalhos. As principais preocupações dos estudos a cerca deste tópico é como é apresentada a anisotropia no MJF, comparando majoritariamente amostras em posição vertical, horizontal e diagonal.

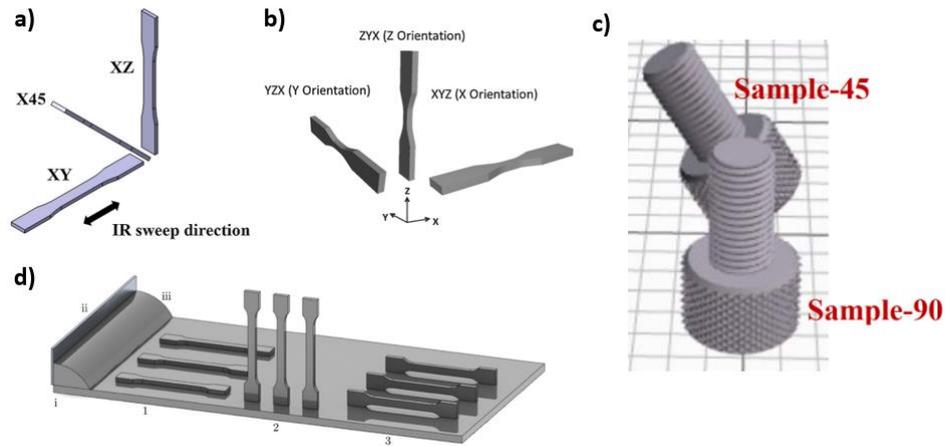


Figura 47. Orientações avaliadas por a) LEE et al. (2020); b) O'CONNOR et al. (2018); c) SAGBAS (2020) e d) MEHDIPOUR et al. (2021).

No estudo de Lee et al. (2020) foi identificado por meio de varreduras de micro-CT que amostras de PA11 orientadas a 45° apresentam menor porosidade, enquanto para a orientação em horizontal (XY) foi identificado taxas maiores de porosidade (médias de 0,69% para XY, 0,06% para X45 e 0,30% para XZ). A Figura 48 demonstra exemplos de varreduras obtidas para estas análises. Lee et al. (2020) apontaram que peças fabricadas por MJF apresentaram poros concentrados na região central, comportamento notado também em outros estudos como o de Guo et al. (2021) por meio das mesmas técnicas de análises, que atribuiu isso a aplicação dos agentes de detalhamento nas bordas das peças, que melhora a fusão e sinterização nas regiões periféricas reduzindo a ocorrência de poros nestas partes. Ainda foi observado que as regiões do topo das peças é onde há mais porosidade (LEE, PANDELIDI e KAJTAZ, 2020).

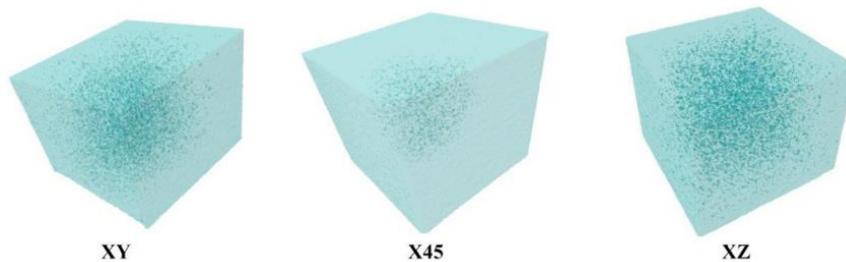


Figura 48. Imagens de micro CT para varredura de porosidade em amostras com diferentes orientações de impressão (LEE et al. 2020).

Os autores associaram a maior taxa de porosidade em XY devido a dificuldades de empacotamento intra-camada do pó no plano horizontal, relacionadas ao espalhamento do pó na camada depositada (LEE, PANDELIDI e KAJTAZ, 2020). Como em processos de PBF, como o MJF em si, a deposição de pó é realizada por rolos ou por carruagens, no plano horizontal, e o contato entre partículas adjacentes não é garantido devido à falta de qualquer força externa de empacotamento, ao contrário do plano vertical onde a gravidade atua como

uma força externa de empacotamento. A partícula de pó, sujeita a gravidade, se ajusta para uma posição mais estável, suportada por outras partículas inferiores. Isso aumenta a compactação do pó no plano vertical, mais do que ocorre no horizontal, como é mostrado na Figura 49. O impacto desse efeito é maior na orientação XY pois esta apresenta maior área de seção transversal horizontal projetada (LEE, PANDELIDI e KAJTAZ, 2020). Já a menor taxa de porosidade em peças orientadas na vertical, é atribuída a maior exposições das seções das camadas a radiação infravermelha, que melhora a fusão e sinterização destas camadas, fenômeno que é também observado em outros processos de MA a base de energia infravermelha ou UV (LEE, PANDELIDI e KAJTAZ, 2020).

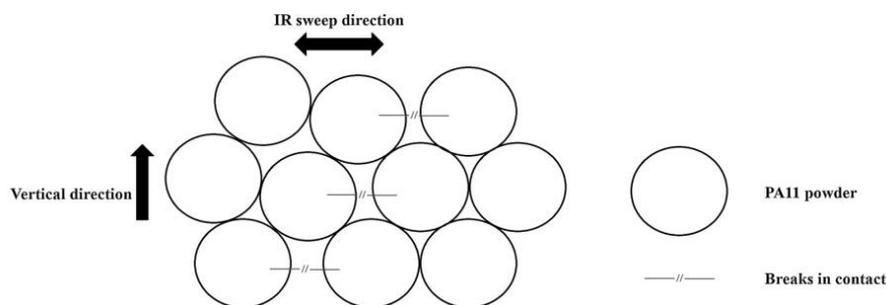


Figura 49. Ilustração que descreve a dificuldade de empacotamento do pó no plano horizontal (LEE, PANDELIDI e KAJTAZ, 2020).

Quanto ao desempenho mecânico, a Figura 50 apresenta gráficos de tensão por deformação para análises de tração realizadas por LEE et al. (2020) e O'CONNOR et al. (2018) para amostras impressas por MJF de PA11 e PA12, respectivamente. Foi identificado que amostras orientadas na diagonal (45°) apresentam melhores propriedades mecânicas no geral, além de apresentarem resultados mais consistentes, com menor variação (LEE, PANDELIDI e KAJTAZ, 2020). Já as amostras que são impressas na horizontal apresentam propriedades inferiores no geral, o que foi observado em ambos os estudos, bem como em outros, como o de Sagbas (2021). A anisotropia observada nas peças fabricadas por MJF foi correlacionada por Lee et al. (2020) a distribuição de porosidade identificada pelo método varredura de micro-CT. Pois as peças com menor porosidade (orientadas a 45°) foram as que obtiveram melhor desempenho mecânico, enquanto as peças com maiores taxas de porosidade (orientadas na horizontal) apresentaram pior desempenho mecânico. Esta relação de efeito é observada também em outros processos de MA, como o HSS (*High speed sintering*) que é tecnologicamente similar ao MJF (LEE, PANDELIDI e KAJTAZ, 2020). Orientar as amostras em 45° evitou simultaneamente as influências negativas do empacotamento de pó intra-camada

pobre no plano horizontal e a orientação da interface entre camadas contra a direção da carga, como ocorre nas amostras orientadas da vertical (LEE, PANDELIDI e KAJTAZ, 2020).

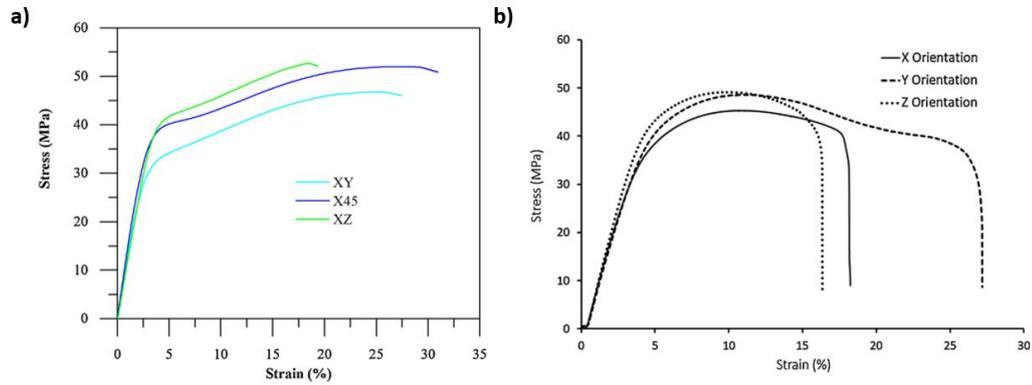


Figura 50. Gráficos de tensão por deformação para a) Amostras de tração de PA11 e b) Amostras de tração de PA12 impressas por MJF (O'CONNOR, DICKSON e DOWLING, 2018; LEE, PANDELIDI e KAJTAZ, 2020).

Já Sagbas (2020), ao analisar os mecanismos de falha de amostras de tração impressas por MJF, concluiu que em comparação com amostras moldados por injeção, a falha do PA12 impresso em 3D ocorre em tensões mais baixas, sem alcançar valores de deformação típicos de PA12 injetado, que vão de 200% a 300%. Comparando amostras de SLS com MJF, no caso de amostras de SLS tracionadas, a superfície de fratura contém defeitos esféricos microscópicos (inclusões e poros oriundos do processo de fusão a laser), enquanto a superfície de fratura das amostras tracionadas de MJF é mais uniforme, o que provavelmente é causado pela ação dos agentes de fusão (SAĞBAŞ, 2020). A Figura 51 apresenta a comparação entre estas superfícies.

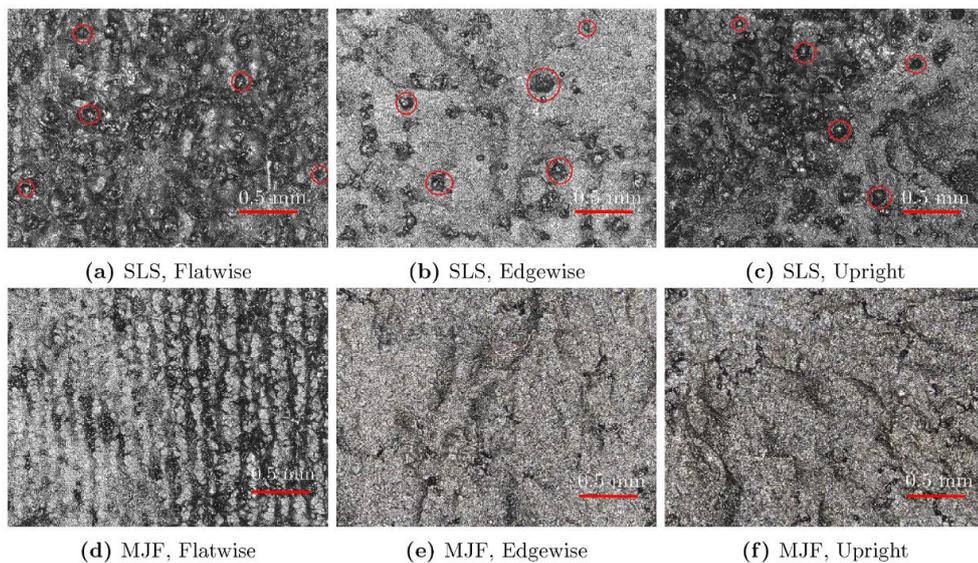


Figura 51. Superfícies de fratura de amostras tracionadas de SLS e MJF, para amostras em XYZ(a e d); ZXY(b e e) e YXZ(c e f) (SAĞBAŞ, 2020).

Em relação aos efeitos das orientações em testes de compressão, Lee et al. (2020) analisaram amostras de PA11 sob as orientações de XY, X45 e XZ. Seu estudo concluiu que os testes de compressão foram interrompidos devido a falhas de flambagem dos corpos de prova, em vez da falha do material, portanto, o teste pode não refletir verdadeiramente os limites compressivos reais, obtendo apenas valores da deformação antes desta falha, que corresponderam em aproximadamente 20% de deformação para as três orientações avaliadas, embora as amostras de XZ tenham apresentado valores um pouco menores, e a X45 um pouco maiores. Em geral, as propriedades mecânicas compressivas do PA11 impresso por MJF não parecem ser tão sensíveis à orientação quanto as de tração (LEE, PANDELIDI e KAJTAZ, 2020b).

A orientação das peças no MJF é responsável também por influenciar o acabamento superficial e a precisão dimensional. Sagbas (2021) realizou um estudo com um modelo 3D de parafusos impressos em PA12 por MJF nas orientações de 90° (vertical) e 45° (diagonal), as quais foram medidas por escaneadores metrológicos de alta magnificação para comparar como estas orientações afetaram a superfície e as dimensões das peças. A Tabela 9 apresenta os resultados para Ra e Sa (que representam os valores de rugosidade média aritmética) e para Rz e Sz (que representam a altura máxima dos desvios do perfil, como a distância vertical absoluta entre a altura máxima do pico do perfil e a profundidade máxima do vale do perfil ao longo do comprimento de amostragem para Rz e área definida para Sz), obtidos pela análise de diferentes regiões dos parafusos impressos. Os resultados para Ra, Rz e Sz tiveram diferença constatada por significância estatística, enquanto para Sa não se obteve significância.

Tabela 9. Resultados para parâmetros de rugosidade de peças de PA11 impressas em MJF com diferentes orientações de impressão (SAGBAS, 2020).

| Parâmetro de rugosidade | Amostra em 45° | | Amostra em 90° | |
|-------------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|
| | Média (µm) | Desvio padrão (µm) | Média (µm) | Desvio padrão (µm) |
| Ra | 10,714 | 0,633 | 6,508 | 0,356 |
| Rz | 54,000 | 10,500 | 38,400 | 8,850 |
| Sa | 20,039 | 0,333 | 19,620 | 1,180 |
| Sz | 276,500 | 20,800 | 211,500 | 14,000 |

Através desta análise pode-se concluir que a orientação perpendicular (90°) fornece melhor qualidade de superfície para os dentes do parafuso. Para obter melhor qualidade de superfície, a parte impressa deve ser colocada de cabeça para baixo na câmara embutida. Além

disso, para evitar efeito de escada, definido como a formação de degraus geométricos entre as camadas sucessivas que prejudicam a qualidade da superfície, a peça deve ser posicionada mais de 20° em relação ao plano horizontal (SAĞBAŞ, 2020).

Quanto a precisão dimensional, o estudo de Sagbas (2021) analisou as dimensões dos dentes destes parafusos por equipamentos ópticos de precisão. Foi identificado que as dimensões das amostras das duas orientações testadas (45° e 90°) foram validadas como diferentes por significância estatística. O topo dos parafusos obteve variações na faixa de 0,090 mm e de 0,063 mm nas geometrias da parte inferior. O desvio na superfície superior da amostra a 90° foi associado ao efeito de capilaridade, que ocorre quando o pó de polímero alimentado em uma área atua como um fluido e tende a se elevar ao longo de suas bordas. Assim, as bordas laterais da peça seriam altas e o centro da superfície superior seria baixo. Por esta razão, o desvio da superfície superior da amostra vertical foi registrado como mais alto do que o da amostra em diagonal (SAĞBAŞ, 2020). Comparações entre o modelo e entre as peças em diferentes orientações podem ser vistos na Figura 52. Os ângulos dos dentes dos parafusos foram avaliados pelo mesmo método, também identificando diferença por significância estatística, sendo que a peça em diagonal obteve maior diferença para o modelo base, sendo esperado um ângulo de 60°, e obtendo-se ângulos de 55,69° para a amostra em diagonal e de 57,88° para a amostra em vertical (SAĞBAŞ, 2020).

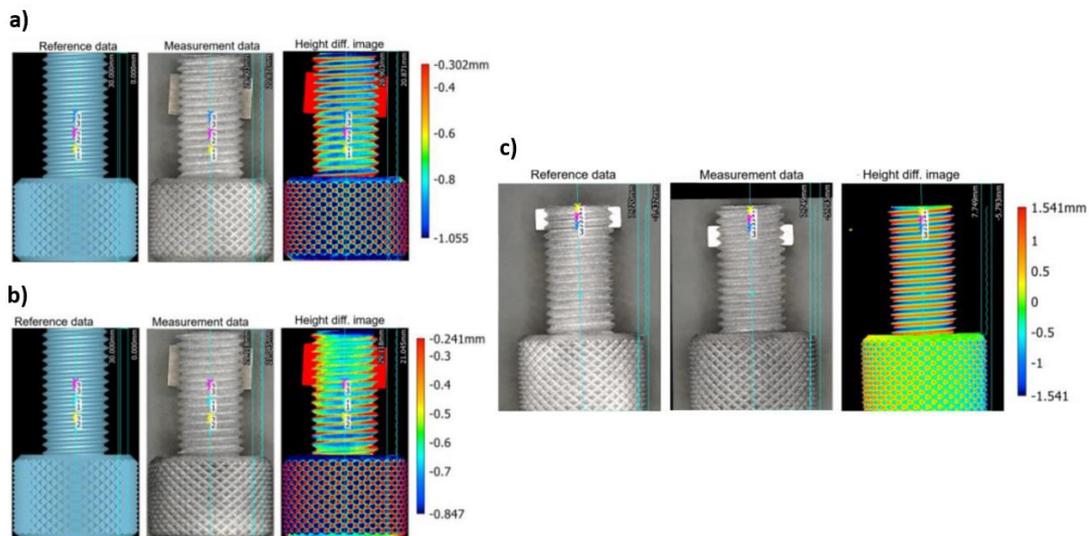


Figura 52. Comparação de dados de medição das amostras, com graus de variações: a) Entre o modelo e a amostra a 90°; b) Entre o modelo e a amostra a 45° e c) Entre as amostras a 90° e 45° (SAĞBAŞ, 2020) adaptado.

Além de orientar as peças variando ângulos ao longo do eixo Z, orientá-las em diferentes ângulos ao longo do plano XY também podem gerar influências nas características finais das peças impressas por MJF. Mele et al. (2020) variaram amostras de PA12 nos ângulos 0°, 45° e 90° em relação no eixo Z, ao longo do plano XY. Em seu estudo, identificaram diferenças sutis em propriedades mecânicas, com melhoria notada na orientação a 90°, associada a melhor fusão das peças, notada pela melhoria da densidade e consequente redução de porosidade, nesta mesma orientação, como pode ser visto na Figura 53 (MELE *et al.*, 2020).

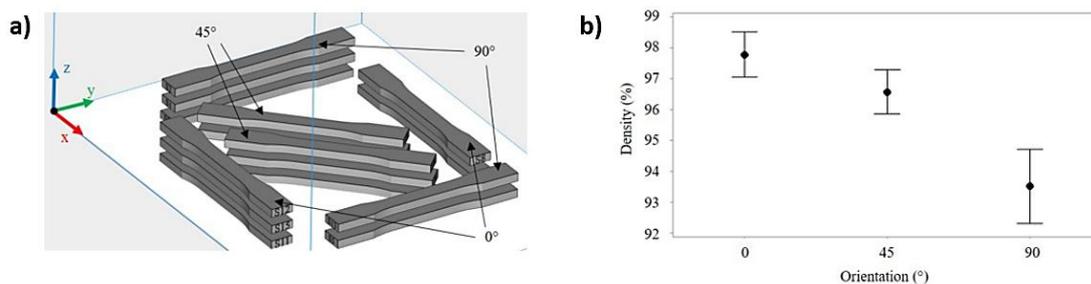


Figura 53. A) Orientações utilizadas no trabalho de Mele et al. (2020) e b) Diferenças identificadas nas densidades das amostras de PA12 para cada orientação testada (MELE *et al.*, 2020).

Os autores associam essa diferença de densidade a diferença nas áreas fundidas, como é esquematicamente representado na Figura 54. No esquema, na posição 1, a intensidade de energia infravermelha depositada pelas lâmpadas funde uma área significativamente menor do que na posição 2, considerando a operação de passagem das lâmpadas de fusão em apenas uma direção no processo de MJF. Isso pode levar a uma fusão incompleta do material na região de fusão, resultando em porosidades nas peças com menores áreas expostas a radiação em cada passagem de deposição de energia (MELE *et al.*, 2020).

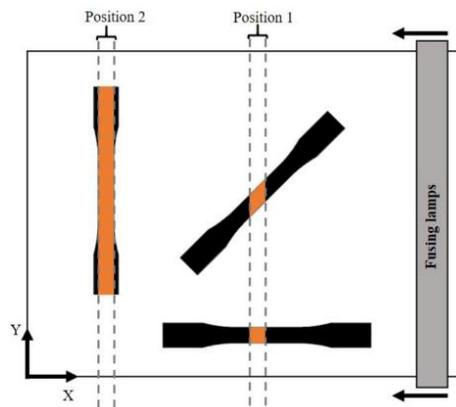


Figura 54. Esquematização das áreas de absorção (em laranja) correspondendo a diferentes posições em relação as passagens das lâmpadas de fusão no processo de MJF (MELE *et al.*, 2020).

2.2.8 Posicionamento das peças na cuba de impressão

Quando se trata de parâmetros no processo de MJF, um aspecto crucial para o desempenho das impressões é a organização das peças dentro da cuba de impressão, pois a forma como são posicionadas pode afetar o tempo do processo, a precisão dimensional das peças, suas propriedades e a ocorrência de defeitos. Este posicionamento pode afetar as peças pois impacta principalmente na distribuição de temperatura dentro do volume de impressão, fator que é crucial para determinar se as peças foram fundidas apropriadamente para adquirir as características esperadas de precisão dimensional e de propriedades. Os Parâmetros que fazem parte do posicionamento são a distância de proximidade entre peças, distância das peças para as extremidades da cuba de impressão, altura das peças na cuba de impressão e a distribuição de peças, mensurada pela distribuição de área transversal na cuba e pela densidade de empacotamento da cuba (HP, 2019). A Figura 55 demonstra em exemplo de cuba de impressão com posicionamentos de peças considerados errado e correto, para os parâmetros do MJF.

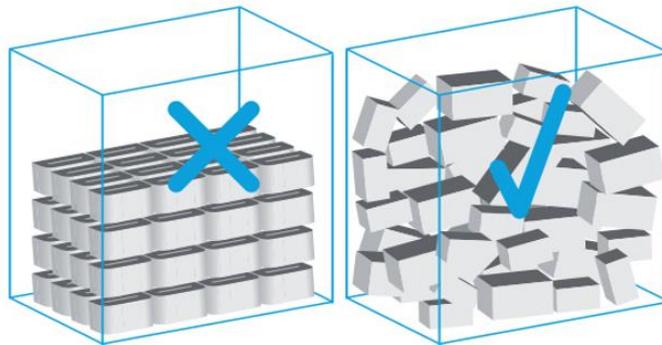


Figura 55. Exemplo de disposição de cubas de impressão no MJF. A esquerda uma cuba com acúmulo de peças muito juntas e pobremente posicionadas, podendo gerar concentração de calor e defeitos. A direita, Peças com bom espaçamento e rotações apropriadas para preservar a precisão dimensional (HP, 2019).

O distanciamento entre peças diz respeito à proximidade entre elas. Determinar um distanciamento adequado é importante para prevenir que as peças afetem termicamente umas às outras, criando pontos de concentração de calor no volume de impressão, o que resultaria na ocorrência de defeitos de origem térmica, como o sangramento térmico, excesso de fusão e distorção das peças. Partindo do mesmo princípio, é preciso se atentar ao distanciamento das peças para as extremidades da cuba de impressão, pois peças muito isoladas nas extremidades podem sofrer taxas de resfriamento maiores e apresentar defeitos de má fusão e distorções (HP, 2019). No MJF, as peças posicionadas no centro do volume de impressão, possuem

resfriamento mais uniforme e linear, enquanto as peças expostas às extremidades da cuba apresentam resfriamento menos homogêneo que na região central, gerando diferenças na cristalinidade das peças. Este fator pode prejudicar as propriedades mecânicas, térmicas e morfológica dos produtos finais (ŠAFKA *et al.*, 2021) Desta forma, peças construídas perto da borda do leito de pó esfriam mais rápido do que as peças impressas na região do meio. O aumento do tempo em alta temperatura no meio da cuba de construção pode não afetar a resistência da peça, mas é benéfico para certas propriedades mecânicas, particularmente a ductilidade (ASM INTERNATIONAL, 2020). Quanto a estes parâmetros a recomendação para o MJF é de um distanciamento mínimo de 5 mm entre peças de características gerais e 15 mm caso sejam peças muito densas. Já quanto a distância para as extremidades, o recomendado é 10 mm a 20 mm. Recomenda-se ainda que se evite colocar peças densas perto das paredes da câmara de construção, pois afetam principalmente a última camada impressa, sendo o ideal girar a peça para que as camadas superiores tenham seção transversal reduzida, evitando ao máximo as áreas planas. Para isso, pode-se distribuir as peças da forma mais homogênea possível no plano XY para facilitar a absorção de energia em toda a área de impressão (HP, 2019). A Figura 56 demonstra alguns exemplos para estes casos, enquanto a Figura 57 apresenta uma análise de influência da proximidade às extremidades da cuba na resistência mecânica e no alongamento até ruptura, para peças fabricadas em um processo de fusão em leito de pó.

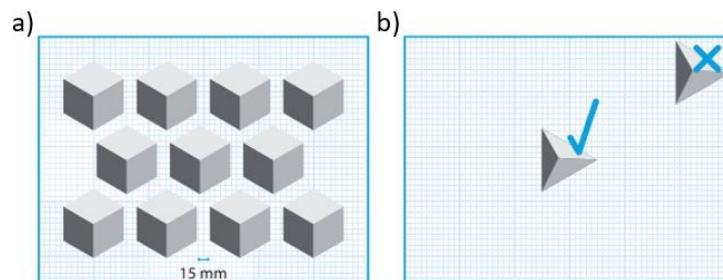


Figura 56. Exemplo de disposição correta de a) distanciamento entre peças densas e, b) posicionamento em relação às extremidades da cuba de impressão (HP, 2019).

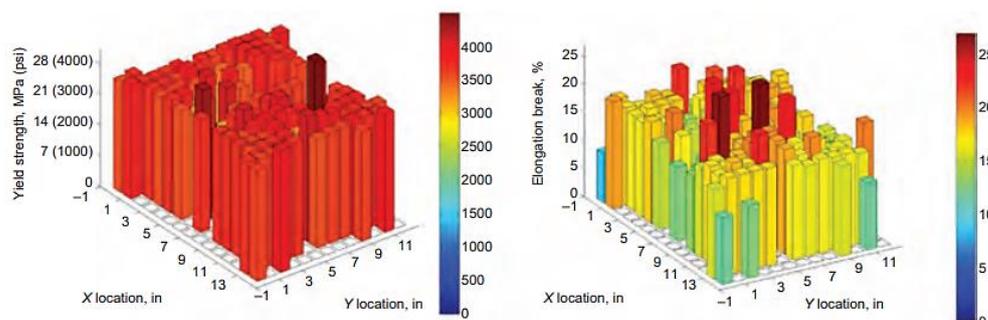


Figura 57. Gráficos de (a) resistência a tração e (b) alongamento até ruptura (ductilidade) para amostras impressas por fusão em leito de pó orientadas em Z. O posicionamento das barras representa a localização no leito de pó, tendo como referência a distância até as extremidades da cuba de impressão (ASM INTERNATIONAL, 2020).

Além de considerar as distâncias, nos processos de PBF é importante considerar o espalhamento das peças dentro do volume de impressão. Como já abordado, as peças influenciam termicamente umas às outras na cuba, então o intuito deste espalhamento é homogeneizar da melhor forma a distribuição de calor na impressão. Essa distribuição de peças é mensurada por dois parâmetros no processo de MJF, que são a densidade de empacotamento e a distribuição de área transversal. Densidade de empacotamento se refere ao volume ocupado dentro da altura de impressão por peças, medido em porcentagem. Por exemplo, se 20 cubos de 10 mm são posicionados com espaçamento superior e inferior de 5 mm, têm-se uma cuba com 20 mm de altura de impressão, com determinado volume de preenchimento. Neste caso, a densidade de empacotamento corresponde ao volume preenchido pelos 20 cubos dentro do volume total, representado por uma porcentagem. Para o processo MJF, o ideal é manter uma densidade de empacotamento de 8% a 10%, para garantir a otimização das propriedades mecânicas e da qualidade das peças. Este valor parece baixo, mas usar uma densidade de empacotamento baixa melhora o gerenciamento de calor entre as peças, o que aumenta os resultados positivos por meio da homogeneidade (HP, 2019).

Já a distribuição de área transversal diz respeito as áreas ocupadas por peças em cada camada da cuba de impressão, medidas em cm^2 . Para este parâmetro busca-se homogeneizar da melhor forma esta distribuição, para não haver concentração de material fundido e conseqüentemente concentrações de calor durante o processamento, que como já visto, pode prejudicar a qualidade e o desempenho das peças. A Figura 58 apresenta exemplos de otimização da disposição das peças para melhorar esta distribuição de áreas transversais.

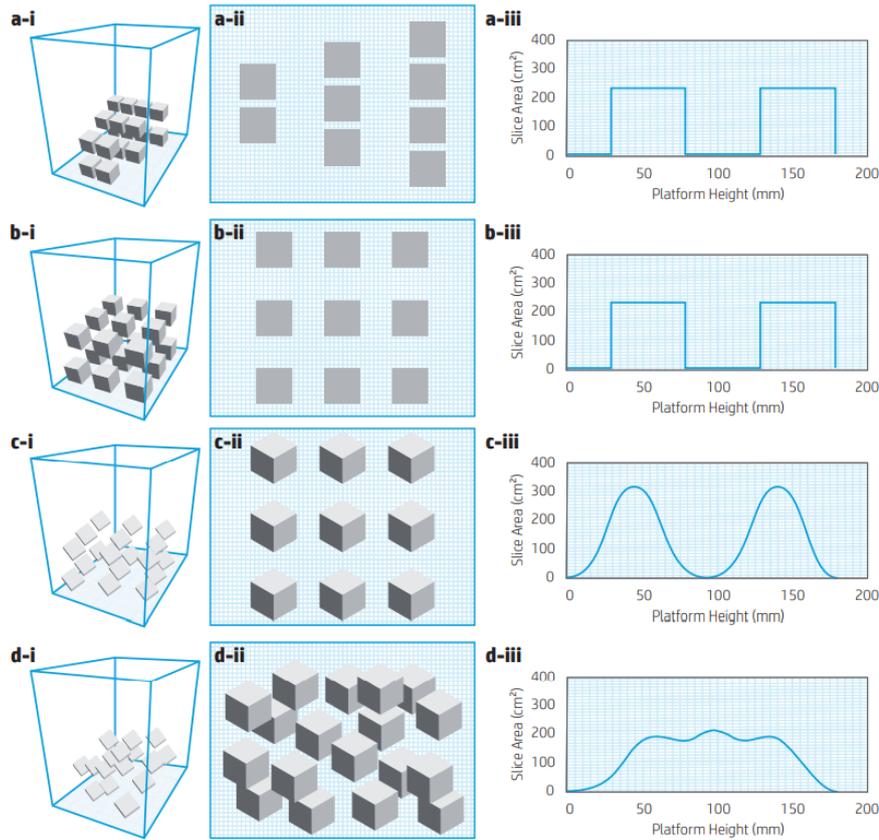


Figura 58. A distribuição da área impressa por camada (coluna da direita) é usada como um indicador de homogeneidade na direção Z para evitar grandes diferenças na absorção de energia das peças. a) Um exemplo de configuração de trabalho não recomendada exibindo não homogeneidade nas três dimensões; b) Um trabalho que é homogêneo no plano XY, mas com uma lacuna distinta e potencialmente problemática ao longo do eixo Z; c) A lacuna ao longo do eixo Z é mais suave após girar os cubos, a fim de evitar a exposição de grandes áreas às últimas camadas a serem impressas; d) Usando otimização de empacotamento automática, a distribuição da área impressa é suavizada ainda mais, minimizando os efeitos térmicos adversos (HP, 2019).

2.2.9 Taxa de mistura do material

Em processos de MA por PBF, apenas cerca de 5 a 20% do pó introduzido no processo é usado para a produção de componentes, resultando em um amonte de pó residual. Para evitar que esse material seja descartado como resíduo, nos processos de PBF os materiais em pó virgem e os já processados são misturados para a alimentação de material, para principalmente manter a sustentabilidade do processo (ambiental e econômica). No caso de processos de tecnologia de SLS, um valor mínimo de 50% de material virgem é necessário para manter o desempenho do processo estável e as propriedades das peças consistentes. No caso da tecnologia de MJF, a recomendação do fabricante é usar uma razão de 20% de pó virgem e 80% de pó usado, que é uma taxa de reutilização de material significativamente maior do que outros processos de PBF. Assim, em altas densidades de empacotamento (relação volume do

componente / volume do pó), apenas o pó usado para a produção da peça é substituído (RIEDELBAUCH, RIETZEL e WITT, 2019).

Estes valores dependem especialmente da estabilidade térmica dos processos. Como o MJF permite uma deposição mais uniforme de energia nas camadas, não há tanto efeito de degradação térmica nos polímeros em pó, quando comparado a outros processos de fusão em leito de pó, onde os materiais estão expostos a muitos ciclos térmicos pontuais (ASM INTERNATIONAL, 2020). O pré-aquecimento do pó antes de depositar na área de impressão e do ambiente da área de impressão são necessários para garantir que a camada previamente fundida não seja cristalizada quando a próxima camada de pó for fornecida ao leito de pó e minimizar estes efeitos de degradação térmica (ASM INTERNATIONAL, 2020). No MJF isto é controlado pela ação da câmara de monitoramento térmico e das lâmpadas térmicas e de fusão, já abordadas em tópicos anteriores.

Esta degradação térmica que ocorre, pois durante os processos PBF, temperaturas muito próximas à temperatura de fusão do material são aplicadas. Isso leva a processos de envelhecimento térmico e termo-oxidativo. Estes fatores têm uma influência significativa nas propriedades do material que são relevantes ao processo, como a capacidade de fluxo de fusão e nas propriedades dos componentes impressos. Da mesma forma, podem ocorrer processos de degradação física, química e hidrolítica, especialmente por causa do ambiente de trabalho (RIEDELBAUCH, RIETZEL e WITT, 2019).

Buscando compreender como essa degradação térmica afeta os materiais para MJF, e como diferentes taxas de mistura afetam o desempenho das peças fabricadas por MJF, Riedelbauch, Rietzel e Witt et al. (2019) realizaram um estudo robusto variando estes dois fatores isoladamente para trazer esclarecimentos como de fato essa influência é percebida em amostras de PA12. A Figura 59 apresenta uma comparação de propriedades mecânicas de amostras de pós de diferentes ciclos de processamento, onde “0” significa o uso de pó virgem e os números crescentes representam o número de ciclos de processamento que o pó experimentou, ou seja, em “0” foram testadas amostras com 100% de pó virgem, em “1” foram testadas amostras com 100% de pó reutilizado uma vez, em “2” 100% de pó reutilizado duas vezes, assim por diante. Os resultados apresentaram pouca influência da degradação causada pelos ciclos de reutilização. Durante este estudo, embora tenham sido identificados efeitos de envelhecimento por análise térmica de DSC, esses efeitos não parecem afetar as propriedades mecânicas dentro dos ciclos de processamento do MJF em consideração. O oposto é observado em processos de SLS, onde a reutilização piora o desempenho mecânico das peças (RIEDELBAUCH, RIETZEL e WITT, 2019). É provável que os agentes utilizados no MJF

tenham uma influência positiva na fluidez do fundido e, conseqüentemente, na aderência da camada e na porosidade da peça, que se sobrepõem aos efeitos do envelhecimento do material (RIEDELBAUCH, RIETZEL e WITT, 2019). Outro fator seria o peso adicional da camada com o aumento da altura Z, que é intensificado pela presença dos agentes, gerando peças mais densas e menos porosas (RIEDELBAUCH, RIETZEL e WITT, 2019).

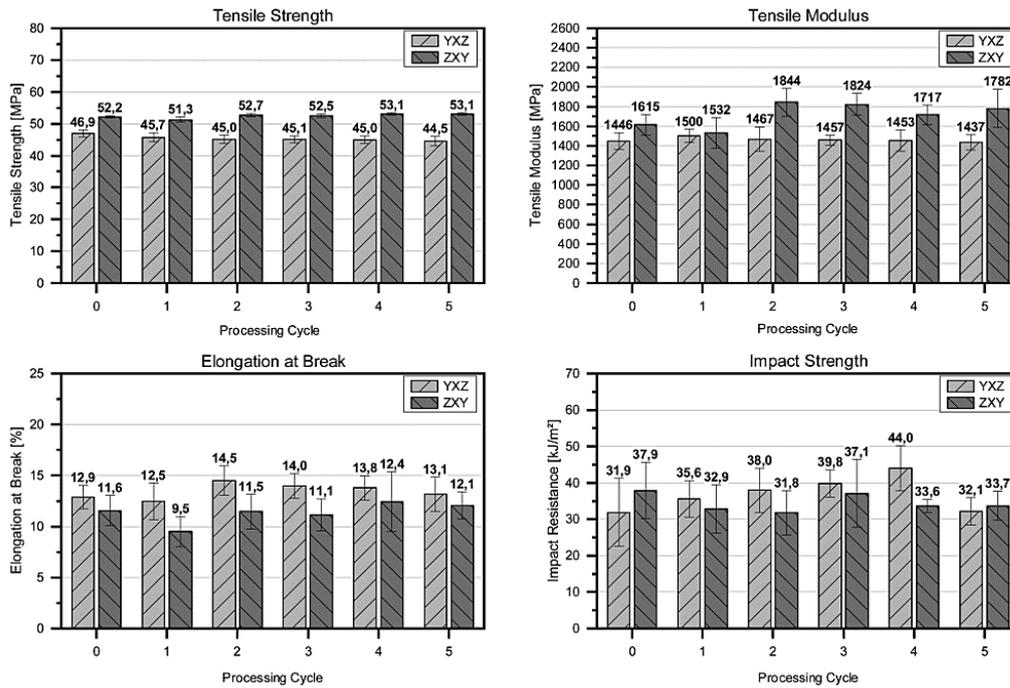


Figura 59. Propriedades mecânicas de amostras de PA12 impressas com pós com diferentes ciclos de reprocessamento (Riedelbauch, Rietzel e Witt, 2019).

Observações parecidas foram feitas ao se variar as taxas de mistura de pó, como mostrado nos gráficos de propriedades mecânicas da Figura 60. Também neste caso, a quantidade de pó usado não parece ter uma influência significativa no comportamento mecânico das peças (RIEDELBAUCH, RIETZEL e WITT, 2019).

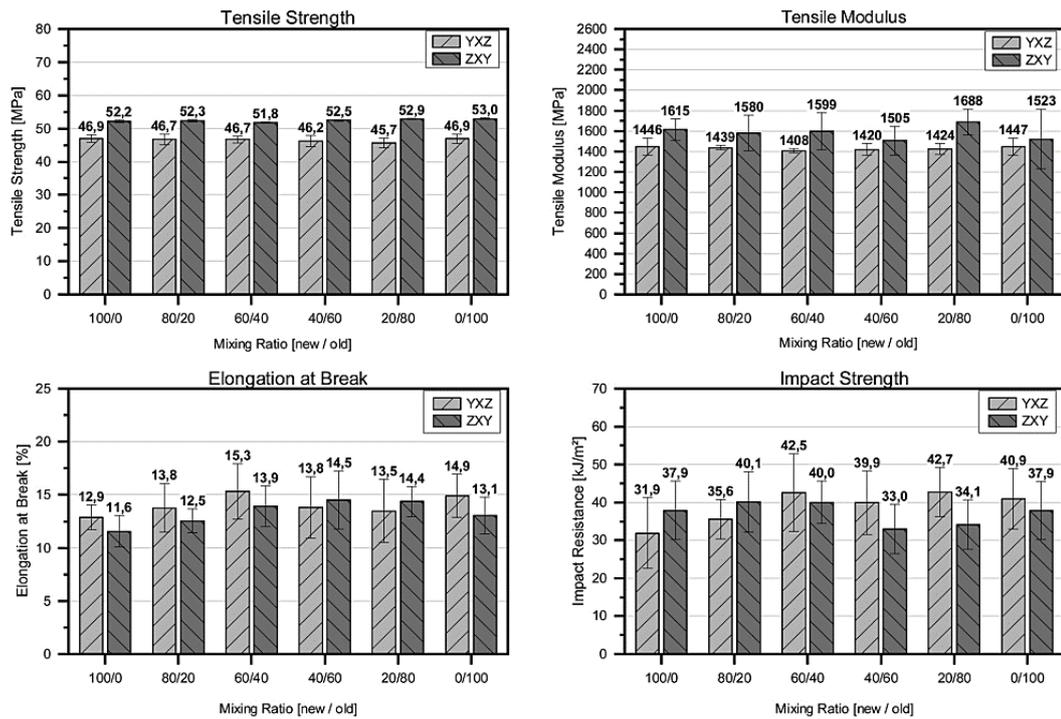


Figura 60. Propriedades mecânicas de amostras de PA12 impressas com diferentes taxas de mistura de pós (RIEDELBAUCH, RIETZEL e WITT, 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com base nos objetivos propostos, este trabalho possui uma metodologia dividida em duas linhas de estudo que se correlacionam e buscam direcionar para conclusões similares. As análises foram separadas entre produto e processo. Produto se refere a análise tecnológica com foco no desempenho das peças de polipropileno impressas em MJF, enquanto processo se refere a análise gerencial com foco no desempenho do processo em si. A Figura 61 apresenta de forma esquemática o fluxograma da metodologia aplicada neste trabalho conforme esta divisão. Para cada análise foi desenvolvido um planejamento experimental próprio, contudo utilizando como variáveis de estudo a mesma referência, a orientação espacial de impressão, traduzida quantitativamente em ângulos, sendo o ângulo em relação ao plano horizontal (plano XY) e ângulo em relação ao plano vertical (plano XZ). Para as duas análises foi utilizada a mesma ordem de etapas, sendo uma etapa inicial de levantamentos de informações sobre o processo MJF, suas variáveis e requisitos através da revisão bibliográfica, seguido pelo desenvolvimento do planejamento experimental, a realização de testes para obtenção de variáveis de resposta, obtenção de amostras, realização de testes, a análise dos resultados de cada planejamento experimental, as indicações de otimização e por fim a conclusão do estudo. Maiores detalhes sobre o objetivo, resultados esperados e recursos destas etapas são apresentados na Tabela 10.

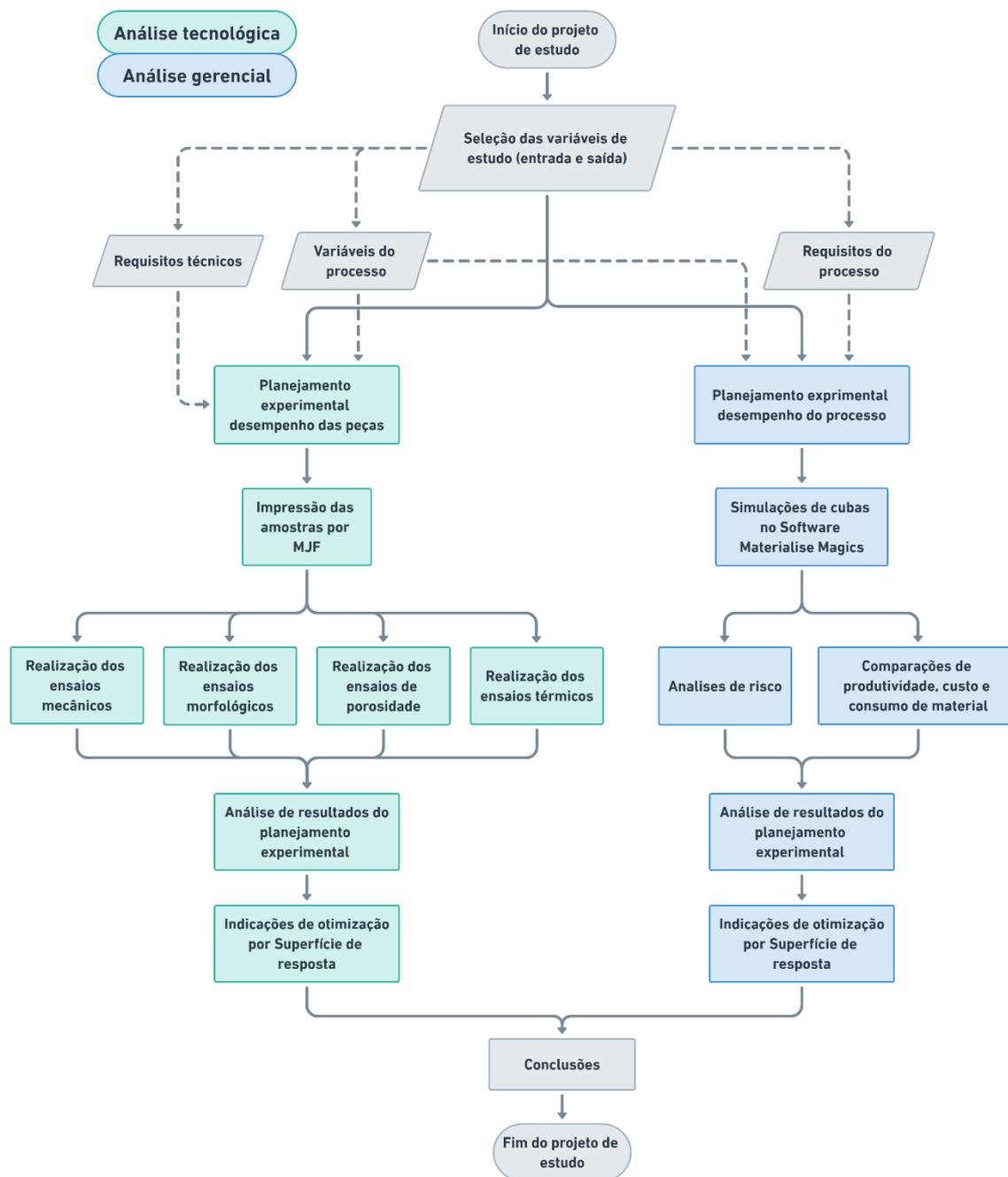


Figura 61. Fluxograma geral da metodologia empregada no trabalho.

Tabela 10. Detalhamentos das etapas do trabalho

| Análises | Detalhamento | Seleção das variáveis de estudos | Planejamento experimental | Obtenção de amostras | Realização de testes | Análise dos resultados do planejamento experimental | Indicações de otimização |
|---|----------------------|---|--|--|---|--|---|
| | Objetivos | Identificar ângulos de orientação espacial e propriedades que podem ser influenciadas | Definir modelo experimental de superfície de resposta | Modelagem e Impressão de amostras de polipropileno em uma impressora Multi Jet Fusion | Analisar a influência das orientações de impressão nas respostas mecânicas, morfológicas e térmica do polipropileno impresso em MJF | Aplicar análises do modelo estatístico com os dados obtidos | Analisar quais são as otimizações indicadas através do modelo de planejamento experimental aplicado |
| Análise do produto (tecnológica) | Resultados esperados | Definição dos ângulos de orientação e testes a serem executados | Modelo viável para execução de testes, capaz de gerar indicações de otimização | Amostras impressas em polipropileno | Resultados quantitativos dos testes mecânicos, morfológicos e térmico. | Identificar se há ou não significância estatística para a influência da orientação de impressão nas variáveis de resposta e os gráficos de superfície para estas influências | Gráficos de superfície e otimizações para o parâmetro orientação de impressão para as variáveis de resposta com significância estatística |
| | Recursos necessários | Revisão bibliográfica | Variáveis selecionadas e Software de análise estatística MiniTab | Software CAD solidworks, Linha de processamento da Impressora HP Multi Jet Fusion modelo 5210, Polipropileno particulado para impressão em MJF, agentes de fusão e | Infraestrutura laboratorial para execução de ensaios de tração, impacto, DSC, porosidade e microscopia ótica. | Software de análise estatística MiniTab Resultados dos testes aplicados. | Software de análise estatística MiniTab |

| | | | | | | | |
|--|----------------------|--|--|--|---|--|---|
| | | | | detalhamento HP MJF e software de gestão de impressão Materialise Magics | | | |
| Análise do processo (gerencial) | Objetivos | Identificar ângulos de orientação espacial e fatores que podem ser influenciadas | Definir modelo experimental de superfície de resposta | Simulações de cubas de impressão em MJF utilizando modelo de produto real | Analisar a influência das orientações de impressão nas características de produtividade, custo e consumo de material do processo MJF. | Aplicar análises do modelo estatístico com os dados obtidos | Analisar quais são as otimizações indicadas através do modelo de planejamento experimental aplicado |
| | Resultados esperados | Definição dos ângulos de orientação e testes a serem executados | Modelo viável para execução de testes, capaz de gerar indicações de otimização | Obtenção de cubas otimizadas simuladas aplicando diferentes orientações com produto real | Simulações de cubas de impressão em MJF com modelo de produto real. Dados das cubas simulações e análises executadas pelos softwares de gestão. | Identificar se há ou não significância estatística para a influência da orientação de impressão nas variáveis de resposta e os gráficos de superfície para estas influências | Gráficos de superfície e otimizações para o parâmetro orientação de impressão para as variáveis de resposta com significância estatística |
| | Recursos necessários | Revisão bibliográfica | Variáveis selecionadas e Software de análise estatística MiniTab | Software CAD Solidworks, Software de gestão de impressão Materialise Magics, Software para gestão de impressão HP Build manager e modelo 3D de produto para impressão em MJF real. | Software de gestão de impressão Materialise Magics, Software para gestão de impressão HP Build manager. | Software de análise estatística MiniTab Resultados dos testes aplicados. | Software de análise estatística MiniTab |

3.1 Avaliação do desempenho das peças de polipropileno

3.1.1 Planejamento experimental

A metodologia consiste em variar os parâmetros de orientação espacial das peças impressas pela tecnologia de MJF, produzindo amostras para avaliar as influências destes parâmetros mecânicos no material Polipropileno. Para isto foi utilizado a metodologia de análise estatística de Planejamento experimental, ou *Design of Experiments* (DOE). O planejamento experimental é um procedimento necessário para que dados coletados e analisados possuam o embasamento estatístico, gerando conclusões validadas e objetivas. É possível assim avaliar um fenômeno, correlacionando causa e efeito entre distintas entradas ou parâmetros de processo e a qualidade final do processo/produto. Ao se utilizar de um planejamento experimental centrado em princípios estatísticos, o projeto consegue extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil, fazendo uma quantidade de experimentos otimizada para atender as demandas de disponibilidade de material e de prazo do projeto. Montgomery (2017) explica que a utilização dos métodos de planejamento estatístico experimental possui uma significativa importância nas atividades de desenvolvimento na engenharia, utilizando como forma de se avaliar alternativas para materiais, comparações de configurações de produtos, formulações de novos produtos e seleção de parâmetros. A utilização de planejamento experimental para definir quais experimentos serão executados possibilita um melhor rendimento dos processos, menor variabilidade, conformidade mais próxima aos requisitos nominais, tempo de desenvolvimento reduzido e custos gerais reduzidos. Nesta etapa são definidas, entre outras coisas, a quantidade de experimentos que serão executadas e a sua configuração em termos de parâmetros de entrada e de saída (MONTGOMERY, 2017).

A realização do planejamento seguiu uma série de etapas, que estão resumidas no diagrama na Figura 62. Esta sequência de tarefas permitiu não somente a definição de todos os ensaios que serão realizados e suas configurações, mas também a programação e compatibilização dessas atividades no projeto em termos de recursos humanos, recursos físicos e tempo.

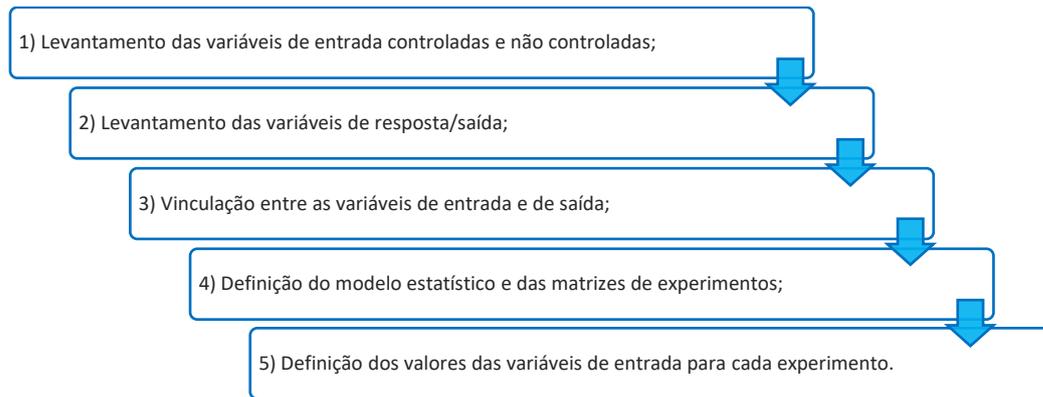


Figura 62. Etapas do Planejamento Experimental.

Neste trabalho, as variáveis de entrada, são a orientação das peças impressas 3D, que se categoriza como um dos principais parâmetros nos processos de manufatura aditiva. As variáveis de entrada são a posição das peças dentro da área de impressão, classificadas como Orientação, sendo estas a Orientação (em ângulos) em relação ao plano horizontal (plano XY) e a Orientação (em ângulos) em relação ao plano vertical (plano XZ). As análises estatísticas empregadas são testes de normalidade, que visam analisar a variância e as diferenças entre as médias dos resultados, e a metodologia de DOE de Superfície de Resposta para permitir otimizar as repostas com base nos parâmetros de processo selecionados. A metodologia de superfícies de resposta (ou RSM, de *Response Surface Methodology*) é uma técnica de otimização baseada em planejamentos fatoriais. Para esta metodologia de DOE, foi definido um grau de certeza de 95% e $\alpha = 1,41421$. Variando as duas variáveis de acordo com a metodologia de RSM, definiu-se cinco valores para cada Orientação, contemplando os ângulos de 0°, 13°, 45°, 77° e 90°, obtendo-se assim os 9 experimentos pré-determinados pela metodologia de RSM, como mostrados na Figura 63. Para esta definição de experimentos utilizou-se o software Minitab 19, que automatiza a geração do modelo estatístico e dos experimentos, com base nas variáveis de entrada e no modelo de DOE selecionado. Cada ponto no gráfico representa uma combinação entre as duas variáveis de entrada (Orientações em relação aos planos horizontal e vertical), bem como representa cada experimento, ou grupos de amostras. A Figura 64 apresenta visualizações de cada orientação de impressão avaliada e um esquema demonstrando quais os ângulos selecionados como variáveis de entrada para o modelo de planejamento experimental. Para controle, cada experimento, ou conjunto de amostras, foi nomeado como 13/13, 13/77, 77/13, 77/77, 0/45, 45/0, 45/45, 45/90 e 90/45 representando as respectivas orientações em ângulos conforme demonstrado nas figuras. Todos os resultados estatísticos foram executados e obtidos através da inserção dos dados dos experimentos reais

no Software de análise estatística Minitab 19, obtendo de forma automatizada resultados como Testes de normalidade (Tukey) e Análise do modelo de DOE (ANOVA, ou análise de variância, Gráficos de efeitos e resíduos, Gráficos de contorno e de superfície de resposta, e Otimização por superfície de resposta).

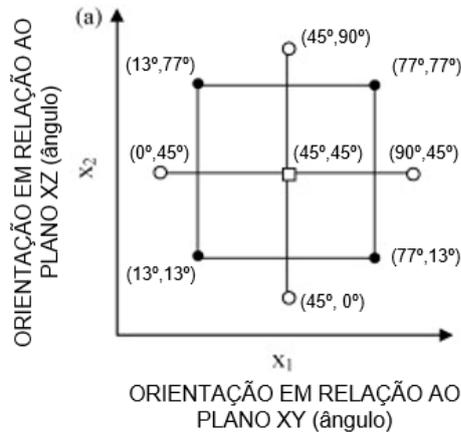


Figura 63. Matriz do planejamento experimental pelo método de Superfície de Resposta, apresentando os 9 experimentos, ou conjuntos de amostras, variando os ângulos em cada orientação.

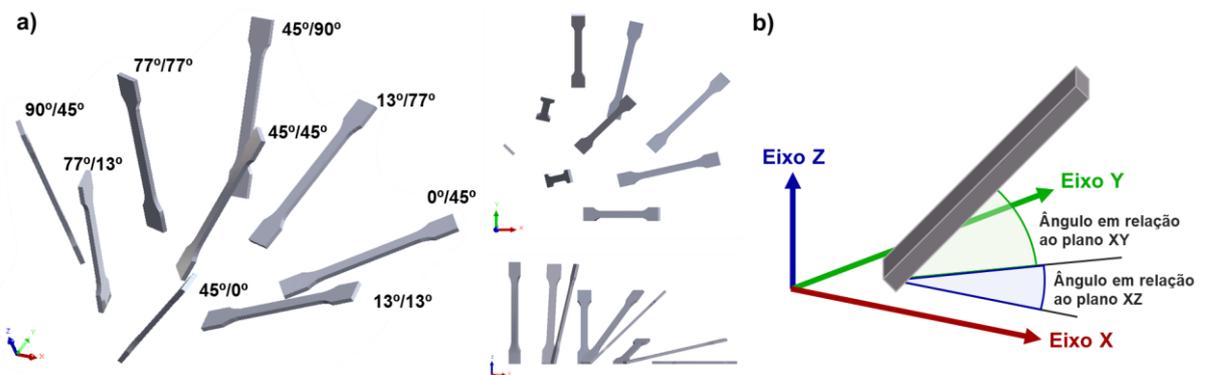


Figura 64. A) Representação modelada das amostras nas respectivas orientações definidas pelo método de Superfície de Resposta. Apresenta orientações com vistas isométrica, superior e lateral; b) Representação dos ângulos selecionados como variável quantitativa de entrada no modelo experimental. As amostras foram modeladas e imagens obtidas através do Software SolidWorks.

Para cada orientação foram fabricados 2 modelos de amostras diferentes, os quais estão representados na Figura 65. Foram impressas amostras de tração, conforme a norma ISO 527 e amostras de impacto, conforme a norma ISO180, de forma que as partes não danificadas pudessem ser utilizadas para outras análises experimentais, como forma de otimizar a produção de amostras e reduzir o gasto com material e fabricação, sem que as análises sejam comprometidas. Para cada experimento, ou conjunto de amostras. Foram fabricadas 5 réplicas para as amostras de impacto e 7 réplicas para as amostras de tração, ou seja, cada teste de tração

terá 7 réplicas pelas quais se obtém a média e desvio padrão, assim como para os outros ensaios térmicos e mecânicos aplicados no estudo, sendo 5 réplicas o mínimo recomendado para estas análises no campo da ciência de materiais. Todos os ensaios mecânicos aplicados neste estudo são apresentados na Tabela 11.

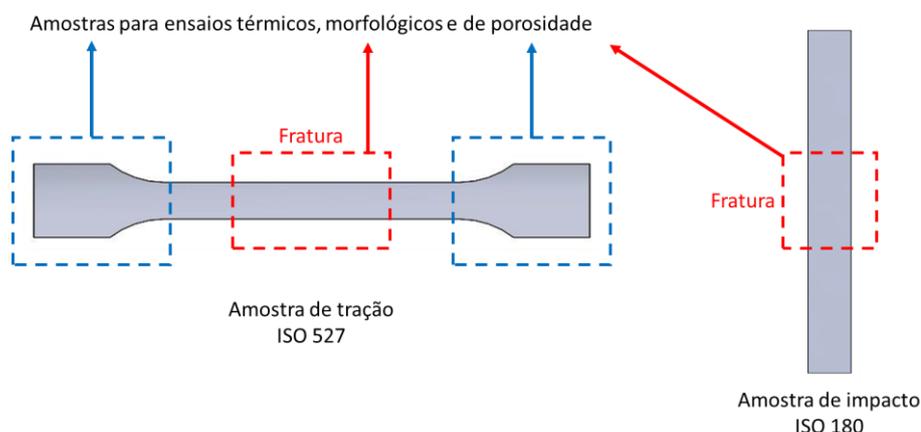


Figura 65. Divisão das amostras para realização dos ensaios mecânicos, térmicos e morfológicos.

Tabela 11. Relação dos ensaios e análises técnicas planejadas para o projeto de pesquisa.

| Ensaio | Norma - Procedimento | Resultados esperados | Finalidade |
|------------|----------------------|--|-------------------------------|
| Tração | ISO 527 | Tensão máxima, Módulo elástico e Alongamento | |
| Impacto | ISO 180 | Tensão máxima ao impacto | Mapear propriedades mecânicas |
| Porosidade | ISO 5017 e ISO 18754 | Porosidade aparente | |

Os primeiros métodos de análise a serem aplicados são os Testes de normalidade das médias de cada experimento, aplicado com todos os resultados de cada orientação para um dos ensaios. Este método de análise conhecido também como ANOVA *One Way*, aplicado para análise de variância de uma única variável, tem seus resultados obtidos pelo processamento dos dados do modelo de DOE pelo software Minitab 19.

3.1.2 Fabricação das amostras

3.1.2.1 Modelagem e otimização da cuba de impressão

A modelagem das amostras foi executada através do software Solidworks, seguindo as recomendações de dimensões das normas ISO 527 e ISO 180, para amostras de tração e de impacto, respectivamente. O Solidworks foi aplicado também para ajustar os ângulos de posicionamento das amostras antes de enviar ao software de gestão da cuba de impressão, esta orientação foi realizada pelo recurso de montagem do Solidworks, que permite rotacionar as peças em diferentes direções. Para controle e rastreabilidade das amostras, cada orientação foi marcada em uma das extremidades das amostras (ressalto), com códigos que referenciassem suas posições, seguindo a codificação mostrada na Tabela 12. Os modelos das amostras foram tessalados (triangulação) com precisão configurada como alta. Os arquivos das amostras pré-orientadas foram exportados como 3MF, a extensão de arquivo mais recomendada para trabalhar com a tecnologia de MJF.

Tabela 12. Orientações associadas aos códigos ressaltados nas amostras.

| Código | Ângulo em relação ao plano XY (Horizontal) | Ângulo em relação ao plano XZ (Vertical) | Código de reorientação de acordo com norma ABNT 16798 considerando orientação inicial XYZ |
|---------------|---|---|--|
| 0/45 | 0° | 45° | 0, 0, +45 |
| 13/13 | 13° | 13° | 0, -13, +13 |
| 13/77 | 13° | 77° | 0, -13, +77 |
| 45/0 | 45° | 0° | 0, -45, 0 |
| 45/45 | 45° | 45° | 0, -45, +45 |
| 45/90 | 45° | 90° | 0, -45, +90 |
| 77/13 | 77° | 13° | 0, -77, +13 |
| 77/77 | 77° | 77° | 0, -77, +77 |
| 90/45 | 90° | 45° | 0, -90, +45 |

Para gestão e otimização da cuba de impressão foi utilizado o software Materialise Magics, compatível com as impressoras de MJF da HP. Para melhor aproveitamento da área de impressão e melhoria da densidade de empacotamento foi optado por gerar uma cuba de impressão com todas as amostras de todos os estudos de casos executados neste projeto, desta

forma a cuba de impressão foi manipulada e otimizada para compor todos as amostras destes estudos. Para amostras de tração considerou-se replicar 7 amostras e para impacto, 5 amostras. Desta forma a quantidade total de amostras foi de 200 (soma das amostras dos estudos de caso). Para a otimização da cuba de impressão, foram determinação os parâmetros de 5 mm de distanciamento entre amostras e de 10 mm de distanciamento entre as peças e as extremidades do volume de impressão, como recomendado pela HP. Após esta definição, foi aplicado o recurso de otimização do software Materialise Magics, que simula diferentes posicionamentos das peças dentro do volume, de acordo com as distâncias estabelecidas, para encontrar o melhor empacotamento da cuba, ou seja, aquele com menor altura de impressão e com maior densidade de empacotamento. A cuba otimizada gerada pelo software é apresentada na Figura 66, A cuba otimizada obteve uma altura de impressão de 258,42mm, densidade de empacotamento de 5,07% (proporção do volume ocupado por peças para todo o volume de impressão disponível), e 678314 triângulos, com uma área de superfície de 913047,101 mm².

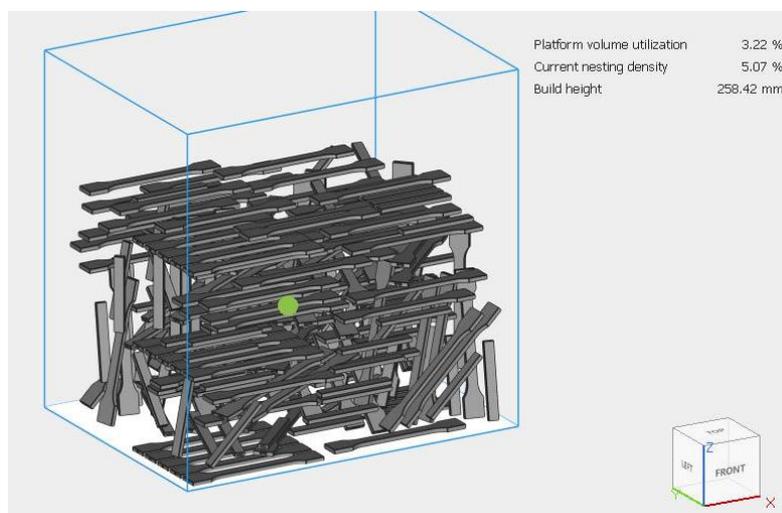


Figura 66. Otimização da cuba de impressão gerada pelo software Materialise Magics para as amostras dos estudos de caso.

3.1.2.2 Materiais e impressão das amostras

Para a fabricação das amostras foi utilizado como material o Ultrasint® PP da Basf (HP 3D *High Reusability* PP), desenvolvido para as impressoras MJF da HP. Foi usada uma taxa de mistura de material novo e usado de 80/20 (80% de pó de PP usado e 20% de pó de PP virgem), que é a taxa recomendada pela HP. A mistura foi feita através da estação de processamento da impressora MJF 5210 da HP, que condiciona o material para impressão e promove mistura homogênea de material virgem e usado. Os agentes de fusão e de detalhamento utilizados foram respectivamente o HP 3D700 SL *Fusing Agent* e o HP 3D700 SL *Detailing Agent*.

O processo de impressão 3D por MJF foi executado por uma impressora Multi Jet Fusion HP de modelo 5210 com um volume de construção efetivo de $380 \times 284 \times 380$ mm. Esta tecnologia é otimizada para uma espessura de camada de $80\mu\text{m}$, podendo atingir uma taxa de impressão teórica de até $5058 \text{ cm}^3/\text{h}$. A resolução do processo de impressão no plano XY e XZ, para este equipamento da HP corresponde a 1200 dpi. Para esta impressão foram aplicados o perfil de impressão *Balanced* e o perfil de resfriamento lento natural, de 42h para o Polipropileno. A impressora utilizado no estudo estava em condição nova, imediatamente após instalação, com calibração e manutenção verificadas.

Após a impressão e o resfriamento, as amostras foram desempacotadas e pós-processadas pela estação de processamento das impressoras de MJF da HP. As amostras tiveram seu acabamento superficial finalizado apenas por uma cabine de jateamento de esferas de vidro, sem envolvimento de outros processos de acabamento para mitigar possíveis variações, pois o foco do estudo é apenas quanto ao processo MJF. A Figura 67 apresenta todas as amostras do trabalho de avaliação da orientação de impressão, separadas e identificadas por orientação, após o desempacotamento e acabamento por jateamento.



Figura 67. Amostras do trabalho de avaliação da orientação de impressão, separadas após o desempacotamento e jateamento.

3.1.3 Ensaio mecânicos

Todas as amostras foram previamente levadas ao laboratório climatizado para condicionamento de 24h. As amostras tiveram suas dimensões (largura e espessura) medidas por um paquímetro digital com duas casas decimais. Estas dimensões servem como base de dados para a realização dos ensaios mecânicos, para tratamento e cálculo de propriedades. As

metodologias dos testes mecânicos estão em acordo com a norma ABNT NBR ISO 17296 – 3, que recomenda que para peças fabricadas por manufatura aditiva, se utilize os procedimentos das normas ISO 527 e ISO 180 para ensaios de tração e impacto, respectivamente.

3.1.3.1 Ensaios de tração

O ensaio de Tração foi realizado para levantamento e avaliação das propriedades de tensão máxima (resistência a tração, em MPa), deformação máxima (alongamento, em %) e módulo elástico (em MPa). Os testes de tração foram executados em uma máquina universal de ensaios EMIC Modelo DL 2000 e a aquisição e tratamento dos dados foram feitos pelo Software Tesc, compatível com o equipamento de ensaio, que gera as curvas de Tensão vs Deformação para cada amostra, bem como as médias e desvios padrões para cada propriedade monitorada. As dimensões das amostras e procedimentos de ensaio foram estabelecidas em conformidade com a norma ISO 527, considerando um comprimento de amostra de 150 mm e velocidade de ensaio de 5 mm/min.

3.1.3.2 Ensaios de impacto

Os testes de Impacto executados foram do tipo Izod, em uma máquina Instron, modelo CEAST 9050, com martelo de 2,7 J e configuração Izod. As dimensões das amostras e procedimentos de ensaio foram estabelecidas em conformidade com a norma ISO 180, considerando um entalhe de 2 mm de profundidade e de ângulo de 45° no centro das amostras, em amostras de 80 mm de comprimento. A propriedade aferida neste ensaio é a de resistência ao impacto (em KJ/m²) obtida pela Equação 1 a seguir, adequada para amostras entalhadas.

$$\alpha = \frac{E}{h.b} \cdot 10^3 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

α = Resistência ao impacto (KJ/m²)

E = Energia aferida (J)

h = Espessura da amostra (mm)

b = Largura da amostra (mm)

3.1.3.3 Medições dimensionais

Avaliações dimensionais foram efetuadas nas amostras de impacto e de tração, tendo como base de referência as dimensões determinadas pela norma ISO 180 e ISO 527, considerando 10 mm de largura e 4 mm de espessura como a medida de referência. As amostras foram medidas com o uso de um paquímetro digital com duas casas decimais de precisão. Os valores das medidas de largura e espessura foram medidos e calculou-se as médias e desvios padrões para cada orientação avaliada, bem como a área transversal correspondente para cada orientação e seus desvios. Estes dados servem também como base de cálculo no software do equipamento de tração e no cálculo da resistência ao impacto. As medidas de áreas transversais em mm² foram consideradas para as análises de tração e impacto separadamente.

3.1.4 Porosidade aparente

Considerando que não há uma recomendação ou norma específica para avaliação de porosidade em peças poliméricas fabricadas por manufatura aditiva, considerou-se a aplicação do método de Arquimedes para verificação da porosidade aparente baseada na diferença em percentual do volume das amostras. Para isso considerou-se como referência as normas ISO 5017 e ISO 18754 que tratam de métodos de medição de porosidade aparente pelo método de Arquimedes para peças porosas sinterizadas. Nesta medição considerou-se uma relação entre as massas das peças secas (2 h de secagem em estufa a 110 °C), massas submersas e massas das peças “cozidas” sob um tratamento imerso em água por 3 h a 110 °C e 30min de resfriamento para preenchimento dos poros. A partir da medição das 3 configurações de massas a porosidade aparente é calculada pela relação demonstrada na Equação 2, em conformidade com as normas ISO 5017 e ISO 18754.

$$\pi_a = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100\% \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

π_a = Porosidade aparente (%/V);

m_1 = Massa seco (Kg);

m_2 = Massa imerso (Kg);

m_3 = Massa “cozido” (Kg).

As medições de massa foram realizadas em uma balança de precisão para medições com configurações de medição a seco ou imersas. Para líquido de imersão considerou-se a água, com o intuito de se igualar ao mesmo líquido aplicado no “cozimento” para preenchimento dos poros na medição das massas das amostras “cozidas” e quando imersas. O equipamento utilizado para medição das massas foi a balança de precisão e medidor de densidade de marca Gehaka e modelo DSL910. As amostras usadas para medição das massas foram as extremidades das amostras de tração cortadas e lixadas para apresentar aproximadamente o mesmo comprimento (cerca de 70 mm), conforme mostrado na Figura 68. Para as medições de massa foram separadas 5 destas amostras para cada orientação avaliada.

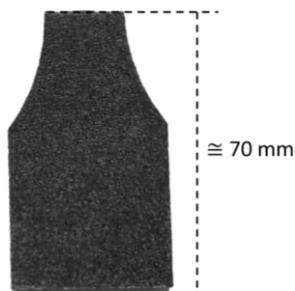


Figura 68. Região das amostras selecionadas para utilização nos testes de medição de porosidade aparente.

3.1.5 Ensaio térmico

O Ensaio térmico aplicado no estudo foi o DSC (*Differential Scanning Calorimeter* ou no português Calorimetria Exploratória Diferencial). Os testes foram executados em um equipamento de marca TA Instruments, modelo Q10. Os testes foram executados com uma única corrida de aquecimento e resfriamento de 20°C até 280°C, com taxa de aquecimento de 10°C/min e purga de N₂ de 50 mL/min. Com procedimentos em conformidade com a norma ISO 11357.

O objetivo deste ensaio neste estudo foi majoritariamente avaliar a cristalinidade das amostras impressas via MJF de polipropileno sob efeito das orientações de impressão, com o intuito de investigar como a orientação de uma peça pode afetar a taxa de cristalinidade ao longo desta mesma peça. Considerando que a depender da direção de deposição de camadas e de deposição de energia de radiação infravermelha possa ocorrer variações no resfriamento na peça que geram efeitos nas propriedades mecânicas, a medição da cristalinidade pode oferecer dados que comprovem ou neguem este tipo de efeito. Para isso foram consideradas amostras selecionadas de 5 orientações (0°/45°, 45°/0°, 45°/45°, 45°/90° e 90°/45°) utilizando de uma

seção das pontas das extremidades de cada lado de amostras impressas nestas orientações, somando 10 amostras de DSC no total, para comparações de taxa de cristalinidade. Cada pedaço de amostra com massa de cerca de 6 mg.

A porcentagem de cristalinidade (em %) foi calculada usando a Equação 3, onde a entalpia de fusão foi obtida a partir da integração da área do pico de fusão das curvas de Fluxo de calor e Temperatura dos ensaios de DSC e o calor de fusão de PP 100% cristalino foi considerado como 208 J/g, visto que varia de 207 a 209 J/g na literatura (CANEVAROLO, 2004).

$$X_c = \frac{\Delta H_c}{\Delta H_m} \times 100\% \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

X_c = Taxa de cristalinidade (%)

ΔH_c = Entalpia de fusão mensurada (J/g)

ΔH_m = Entalpia de fusão 100% cristalino (J/g)

3.1.6 Análises morfológicas

As imagens para análises morfológicas foram obtidas através de um microscópio ótico de marca Zeiss e modelo Scope A.1 e câmera digital de marca Zeiss e modelo AxioCam ERc 5s de software próprio. Foram obtidas imagens com lentes com aproximações de 40, 50 e 100 vezes.

As amostras e superfícies utilizadas para obtenção são detalhadas na Figura 69. Para as análises morfológicas foram selecionadas as amostras com orientações 0°/45°, 45°/0°, 45°/45°, 45°/90° e 90°/45°. Foram retiradas imagens da superfície superior das extremidades das amostras de tração para análise superficial “como impressa”. Das regiões de fratura das amostras de tração foram retiradas imagens da superfície transversal da fratura para avaliação da estrutura e porosidade.

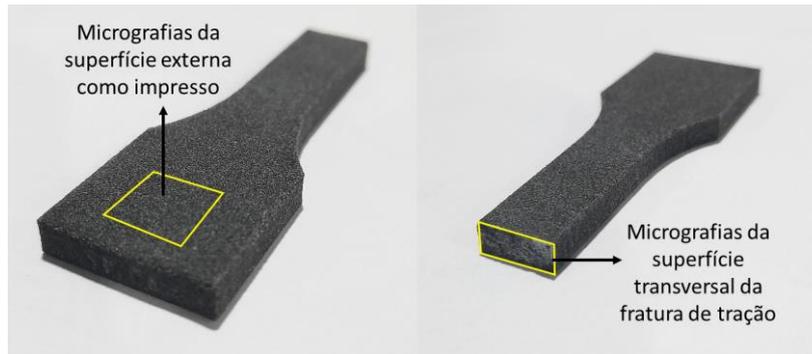


Figura 69. Regiões das amostras de tração selecionadas para obtenção de micrografias.

Para as micrografias das superfícies transversais de fatura das amostras de tração foram retiradas imagens com aproximação de 50x ao longo de toda a superfície da face fraturada. As imagens foram então tratadas no software Image Composite Editor para mesclagem em uma imagem completa a partir das micrografias, gerando uma imagem de toda a superfície com alta resolução.

3.2 Avaliação do desempenho do processo MJF

Para avaliar o desempenho do processo foi pensado um planejamento de experimentos aplicadas as ferramentas computacionais do software Materialise Magics, que permite simular cubas de impressão com diversas variações de características, obtendo como respostas dados importantes sobre as impressões, sem ser necessário produzir diversas cubas para obter estas informações. Então os dados obtidos nesta análise são considerados “estimados” por serem baseados em simulações. O intuito deste tipo de estudo é avaliar características econômicas e gerenciais, de forma a oferecer uma resposta simples e validada via análise estática quanto a influência dos ângulos de orientação no desempenho do processo MJF. O planejamento experimental e as configurações de simulações no Software Materialise Magics são explicados a seguir.

3.2.1 Planejamento experimental das simulações de cubas

Para esta análise a orientação de impressão das peças impressas categoriza também como ponto central de análise, contudo considerando que este efeito possa ser diferente a depender da quantidade de peças a serem impressas foi considerada uma terceira variável além dos ângulos em relação aos planos XY e XZ, sendo esta variável a quantidade de peças mensurada por unidade. As análises estatísticas empregadas foram também o teste de

normalidade e a metodologia de DOE de Superfície de Resposta para otimização dos parâmetros testados, contudo por se tratar de um modelo com 3 variáveis de entrada deve-se considerar um $\alpha = 1,68179$ para um modelo central composto. Com este valor α os valores dos ângulos são alterados para 0° , 18° , 45° , 72° e 90° . Para a quantidade de peças considerou-se os valores de 6, 20, 40, 60 e 74 unidades, também ajustados em conformidade com o valor de α . obtendo-se assim 15 experimentos pré-determinados pela metodologia de RSM, como mostrados na Figura 70. Para esta definição de experimentos utilizou-se também o software Minitab 19, que automatiza a geração do modelo estatístico e dos experimentos, com base nas variáveis de entrada e no modelo de DOE selecionado. Cada ponto no gráfico representa uma combinação entre as três variáveis de entrada (Orientações em relação aos planos horizontal e vertical e quantidade peças na cuba), bem como representa cada experimento, ou grupos de amostras. Todas as análises estatísticas foram executadas através da inserção dos dados dos experimentos reais no Software de análise estatística Minitab 19, obtendo de forma automatizada resultados como Testes de normalidade (Tukey) e Análise do modelo de DOE (ANOVA, ou análise de variância, Gráficos de efeitos e resíduos, Gráficos de contorno e de superfície de resposta, e Otimização por superfície de resposta).

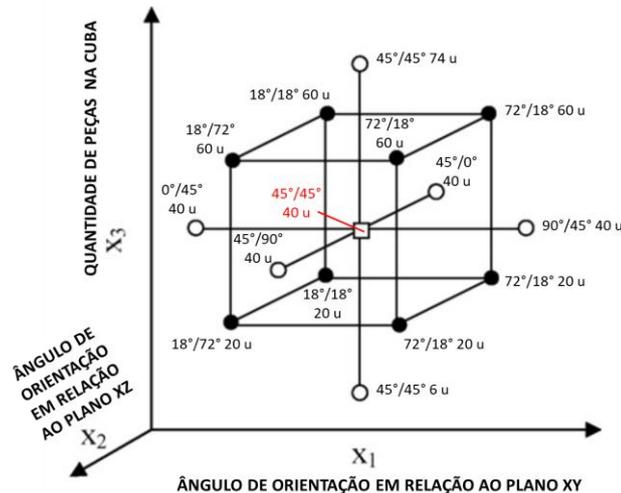


Figura 70. Planejamento experimental de modelo central composto (Superfície de resposta) com as respectivas combinações de variáveis aplicadas neste modelo.

3.2.2 Modelagem e configuração das cubas

Para configuração e simulações das cubas de impressão foi utilizado o software Materialise Magics, compatível com as impressoras de MJF da HP. Para esta análise foi considerada uma peça típica de impressão em impressoras MJF com dimensões adequadas para replicação em diferentes quantidades, assim é importante considerar que os dados obtidos são significativos e validos para peças similares a esta. O modelo utilizado foi o de um componente

de armação de óculos para fabricação por manufatura aditiva, demonstrado na Figura 71, com cerca de 143 mm de comprimento (total), 47 mm de largura (total) e com aproximadamente 2,5 mm de espessura ao longo da armação, além de apresentar um volume de 7274,82 mm³ e área superficial de 8710.24 mm². 2474864



Figura 71. Modelo 3D de peça selecionada para análises, sendo uma peça frontal de armação de óculos manufaturados aditivamente.

As simulações foram configuradas para considerar impressão em PP (o que afeta tempo de deposição de agentes e de energia) e com resfriamento configurado para lento natural (resfriamento lento não forçado, o recomendado para polipropileno e o mesmo utilizado na impressão das amostras físicas). Considerou-se ainda taxa de mistura de material com 20% novo e 80% usado, conforme recomenda a fabricante da impressora e conforme também foi utilizado para impressão das amostras físicas. Para as otimizações de cuba configurou-se o software para fixar os ângulos pré-estabelecidos, permitindo apenas o reposicionamento das peças, com distância entre peças extremidades da cuba de 10 mm. As cubas otimizadas simuladas são apresentadas na Figura 72.

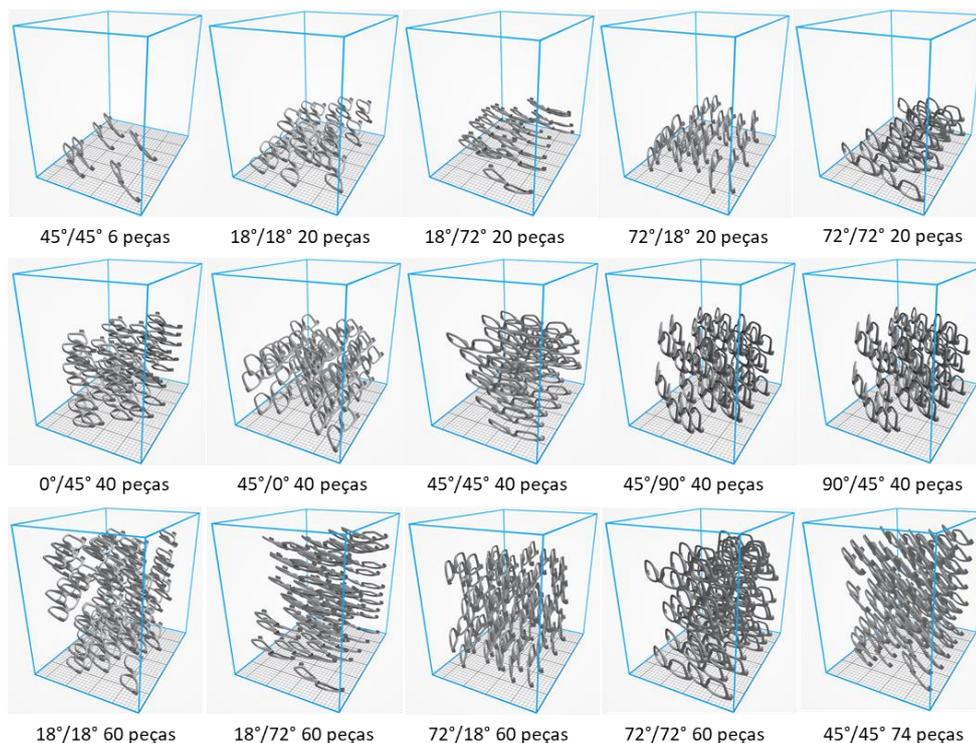


Figura 72. Cubas simuladas geradas por otimização de empacotamento no software Materialise Magics, para todas as combinações de variáveis analisadas neste modelo.

3.2.3 Obtenção de dados e análise de custos

Para avaliações quantitativas das cubas geradas foram considerados os levantamentos de fatores gerados no processo de otimização de cubas, sendo estes a distribuição de camadas, altura de cubas, densidade de empacotamento e tempo de impressão, estes dados são obtidos pela análise das cubas nos softwares Materialise Magics e HP Build Manager. Para análises qualitativas foram aplicadas análises de risco nas cubas otimizadas, análise gerada pelas funções de análise do software Materialise Magics.

Para análise de custos utilizou-se como forma de cálculo de custos a planilha de precificação utilizada no Bureau de manufatura aditiva do SENAI CIMATEC, que com mais de 2 anos de experiência em serviços e projetos de manufatura aditiva desenvolveu cálculos de precificação adequados aos custos operacionais e materiais envolvidos no processo de impressão via MJF. Contudo a planilha ou os cálculos envolvidos não poderão ser apresentados neste estudo por questões de confidencialidade. Este método de cálculo de custo é amplamente utilizado para impressões no Bureau de manufatura aditiva SENAI CIMATEC e para cálculo de custos considera primariamente os dados de altura de cuba e densidade de empacotamento,

obtidos na otimização de cubas geradas pelo software Materialise Magics. Assim os custos estimados foram obtidos com base nas cubas otimizadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos são apresentados a seguir, trazendo os dados obtidos, análises técnicas e análises estatísticas com base no modelo experimental de superfície de resposta aplicado no estudo. Algumas indicações de otimização são abordadas para as propriedades que apresentaram significância estatística para a influência da orientação de impressão por meio dos gráficos de superfície de resposta, contudo as indicações de otimização de resposta também são descritas no tópico de conclusões.

Os resultados estão separados primeiro na análise das amostras de polipropileno com testes mecânicos, morfológicos e térmicos e segundo com a análise do processo MJF considerando os levantamentos obtidos nas simulações de cubas da peça selecionada.

4.1 Fabricação de amostras

A Figura 73 apresenta o gráfico elaborado pelos dados exportados do recurso de análise de distribuição de camadas do software Materialise magics. O gráfico de distribuição de camadas oferece a possibilidade de analisar a área de superfície de cada camada e a distribuição dentro de sua construção. Em um trabalho cotidiano este tipo de variação chamaria atenção como um ponto a ser verificado para melhor ajustar a cuba, mas neste caso, a causa dos picos é conhecida e esperada, sem possibilidade de alteração da cuba. Outros pontos de atenção são variações de áreas transversais que se diferenciam do padrão médio, presentes no topo da cuba de impressão. Estas variações podem causar problemas de distribuição de calor, que geram distorções, como o efeito piscina (capilaridade), que foi realmente verificado nas peças impressas como é abordado nos resultados. Em um trabalho de impressão convencional, a recomendação seria alterar os ângulos de orientação das peças para evitar este tipo de problema, mas neste trabalho a orientação não pode ser alterada, pois é uma variável controlada e precisou ser fixada nos ângulos pré-determinados, mesmo que este tipo de ocorrência tenha sido verificada, pois é isso que é consequência de certas orientações e deve ser avaliado como uma possível justificativa para variações nas repostas obtidas pelas análises. Algumas áreas transversais obtidas na cuba otimizada são apresentadas na Figura 74, representando regiões da base, meio e do topo da cuba respectivamente.

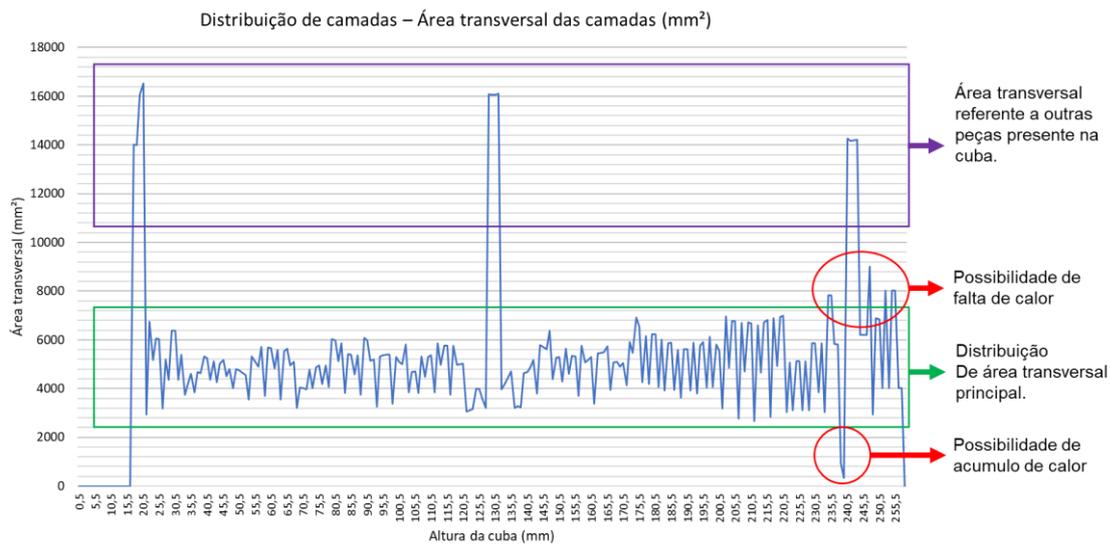


Figura 73. Gráfico de distribuição de (área de) camadas obtidas pela exportação dos dados do software Materialise Magics e sua análise.

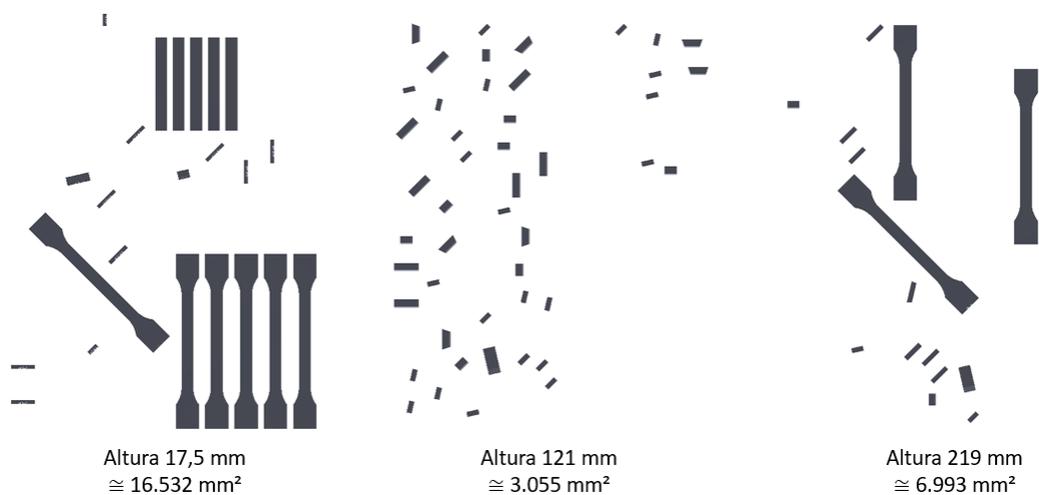


Figura 74. Exemplos de áreas transversais em alturas na base, meio e topo da cuba impressa.

A Figura 75 mostra a análise de coloração gradiente da cuba de impressão, gerada pelo software Materialise Magics. Nesta análise, são definidos manualmente um valor de espessura mínima e máxima e o software demonstra pela tonalidade de cor quais regiões correspondem as espessuras mostradas na legenda. Os triângulos são coloridos de acordo com a espessura da parede. Esta análise permite identificar partes de peças com dimensões muito baixas ou peças com partes muito densas, que poderiam implicar em alterações de posicionamento ou de redesign para prevenção de problemas e defeitos que estas partes podem causar. Na cuba gerada para os estudos de caso, a única diferença significativa é notada nas extremidades das amostras, que corresponde a regiões com as marcações ressaltadas dos códigos de orientação.

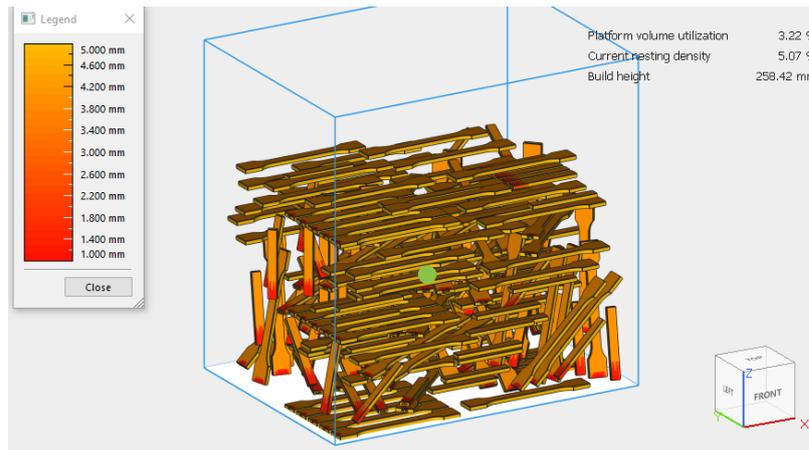


Figura 75. Análise de coloração gradiente gerada pelo software Materialise Magics para a cuba de impressão das amostras.

A Figura 76 apresenta o resultado gerado pelo software Materialise Magics para a análise de risco de construção. Esta análise mostra o risco de falha ou distorção nas peças impressas de acordo com a distribuição de camadas. O risco é visualizado em vermelho, amarelo ou verde. Áreas com alto risco são mostradas em vermelho, áreas com médio risco em amarelo e áreas sem risco são mostradas em verde. As áreas vermelhas presentes na análise estão relacionadas com as variações de área transversal identificadas no gráfico de distribuição de camadas. Estas áreas indicam prioritariamente a possibilidade de distorções de capilaridade, chamadas de efeito piscina. Na capilaridade a superfície superior da peça tem bordas elevadas em comparação com o resto da área, que está em uma posição inferior. Isso é gerado principalmente pela interação entre o agente fluído e o material em pó, pois quando a camada é fundida, esta se comportará como um fluído e tende a contrair a região central da área fundida ao resfriar. Para este tipo de problema, como já comentado, o indicado seria alterar os ângulos das peças, mas para os estudos de caso as amostras precisam ser fixadas em ângulos pré-determinados para padronização e controle de variáveis. Neste caso, para os resultados aferidos nos ensaios, é preciso considerar que as amostras foram mantidas em suas respectivas orientações, mesmo que as distorções tenham sido verificadas, podendo haver uma influência destas, mesmo que pequena.

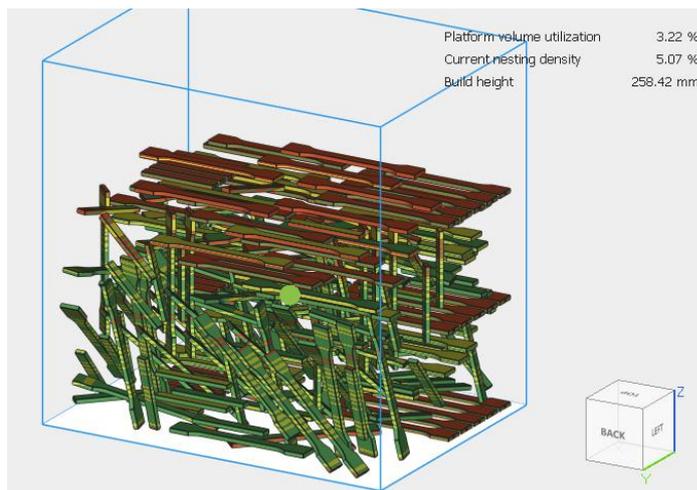


Figura 76. Análise de risco de construção gerada pelo software Materialise Magics para a cuba de impressão das amostras.

4.2 Ensaios mecânicos

4.2.1 Ensaios de tração

Os dados das curvas tensão vs deformação das amostras de cada orientação, tratados pelo software Tesc, foram exportados para tratamento manual, onde foram geradas curvas médias, que representem graficamente as médias das curvas das amostras para cada orientação avaliada. Estas curvas, são apresentadas na Figura 77. Pelas curvas é possível observar que o comportamento da região elástica é relativamente semelhante para as diferentes orientações, com médias variando de 843,42 MPa a até 964,62 MPa aproximadamente. Entretanto, na região de deformação plástica é possível visualizar diferenças causadas pela orientação de impressão, principalmente quanto a tensão máxima sob tração, medida de resistência a tração mensurada em MPa, que variou de 21,3 MPa em 13°/13° a até 23,69 MPa em 90°/45°. O mesmo vale para a deformação máxima, medida de alongamento mensurada em porcentagem, que variou de 16,12 % em 77°/77° a até 50,93 % em 0°/45°. Um ponto positivo quanto a esta observação é que o comportamento elástico das peças impressas por MJF não demonstra ser significativamente influenciado pela orientação de impressão. Isso é importante de ser notado, pois a baixa anisotropia é uma característica interessante para diversas aplicações de produtos fabricados por MA e é sempre buscada, além de que a maioria dos requisitos técnicos de produtos tem seus limites técnicos estabelecidos dentro da faixa de comportamento elástico. Enquanto algumas amostras apresentaram característica de fratura parcialmente frágil, a maioria apresentou deformações indicando característica dúctil, mas com ausência de “empescoçamentos”, como é mostrado na Figura 78.

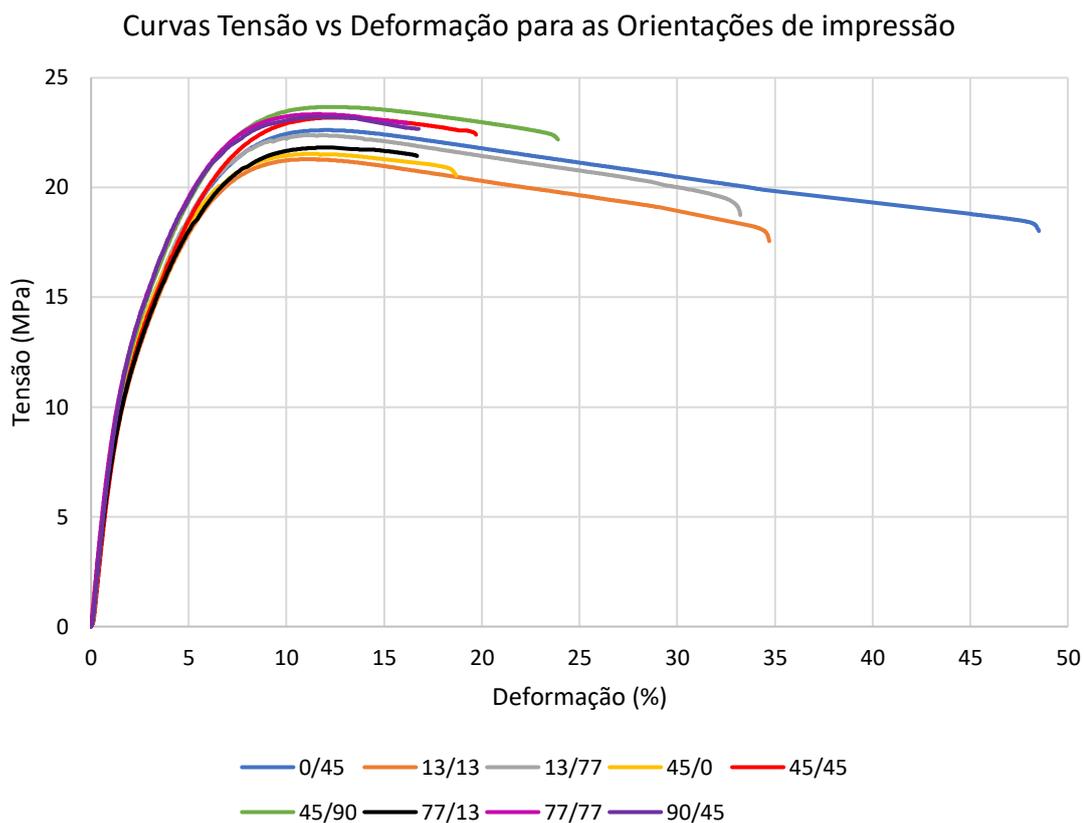


Figura 77. Gráfico contendo as curvas de Tensão vs Deformação para todas as orientações de impressão avaliadas.

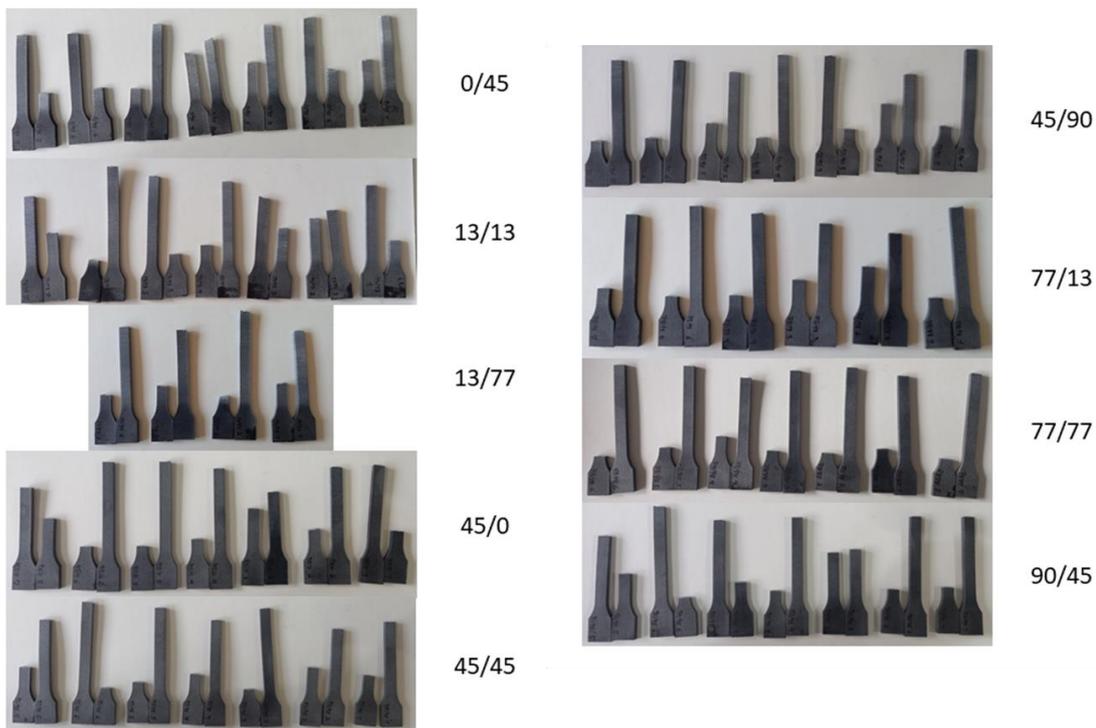


Figura 78. Amostras de tração após realização dos ensaios com a classificação das orientações.

A seguir são investigadas de forma aprofundada as propriedades de resistência a tração (tensão máxima a tração, MPa), módulo elástico (MPa) e alongamento (deformação máxima a tração, %) com os dados coletados e tratados dos resultados dos ensaios de tração.

O gráfico da Figura 79 apresenta as médias e desvios padrões para os resultados de resistência a tração de cada orientação, onde o posicionamento das barras foi colada em ordem crescente de acordo com o ângulo de orientação no plano vertical (XZ). Pelo gráfico é possível identificar que a maior influência perceptível na diferença dos resultados notados nas curvas abordadas anteriormente é devido ao ângulo de orientação em relação ao plano vertical, onde mesmo considerando os desvios padrões é possível notar que o aumento de seu valor gera um aumento também na resistência das peças de PP impressas por MJF, visto que peças a 90° de XZ obtiveram uma resistência média de 23,67 MPa, enquanto peças orientadas a 0° de XZ obtiveram de 21,53 MPa. Um comportamento parecido foi identificado por Mele et al. (2020) ao avaliar amostras de tração em diferentes orientações de impressão em relação ao plano vertical de peças de PA12 impressas por MJF. Mele et al. (2020) associaram esta diferença de resultados a área total das peças que são expostas a energia infravermelha depositada pelas lâmpadas de fusão. A Figura 80 apresenta um esquema demonstrando como o movimento das lâmpadas infravermelhas interagem com as áreas transversais das peças na impressão por MJF. Mais sobre essa interação é discutido nas análises térmicas. Neste esquema, nas peças orientadas a 0° e a 45° em relação ao plano XZ, a intensidade de energia infravermelha depositada pelas lâmpadas funde uma área significativamente menor do que nas peças orientadas a 90° em relação ao plano XZ, considerando a operação e direção de passagem das lâmpadas de fusão. Esta operação pode levar a uma fusão mais completa do material na região de fusão nas peças com áreas mais expostas a radiação em cada passagem de deposição de energia, o que melhora a ligação entre camadas e consequentemente gera um aumento na resistência mecânica (MELE, et al. 2020).

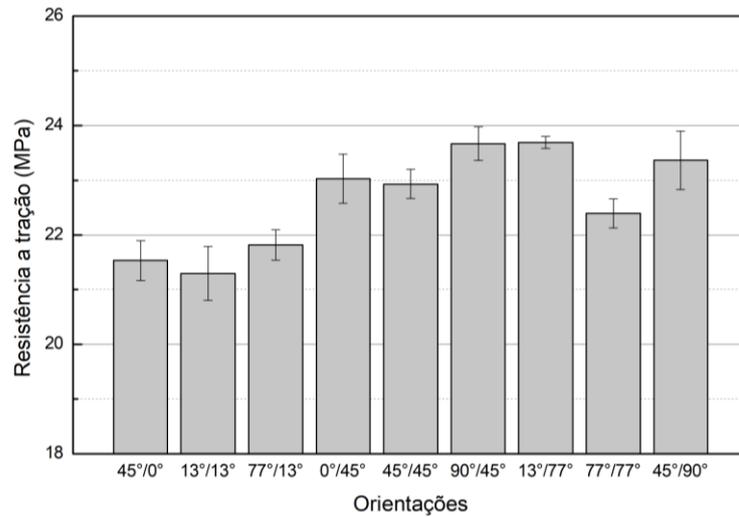


Figura 79. Gráfico comparando médias e desvios padrões dos resultados de Resistência a tração (tensão máxima sob tração, MPa) das orientações avaliadas.

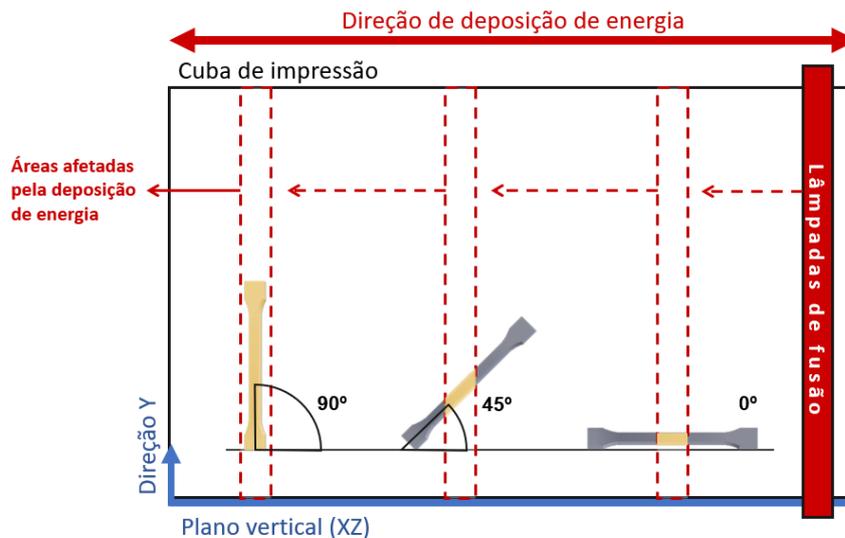


Figura 80. Esquema demonstrando a influência da direção de deposição de energia nas amostras com diferentes orientações.

Contudo é importante analisarmos que este tipo de efeito pode ser notado e explicado em peças com uma dimensão relativamente maior que as outras, como o caso do comprimento das amostras de tração. Se a peça apresentar forma e dimensões próximas a de um cubo ou uma esfera, com dimensões de largura, espessura e comprimento relativamente semelhantes, esta influência pode ser menor, devido a semelhança entre as áreas expostas a energia depositada. No caso de peças cúbicas, peças direcionadas na diagonal (45°) em relação ao plano XZ ainda poderiam apresentar diferenças na resistência a tração. A Figura 81 demonstra estas observações.

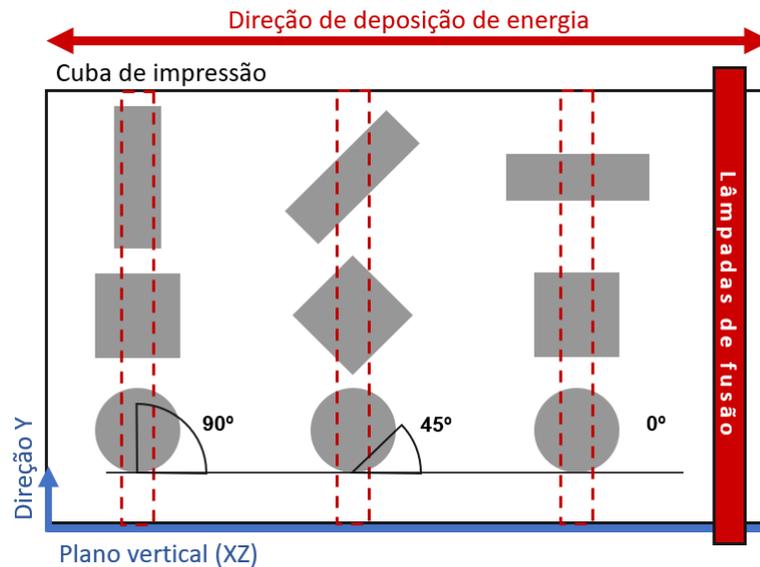


Figura 81. Esquema demonstrando a influência da direção de deposição de energia em peças com diferentes formatos e orientações.

A Tabela 13 apresenta os principais índices da análise de variância e do modelo dos testes de ANOVA One Way e normalidade dos dados de resistência a tração. O Valor-P, inferior ao nível de significância de 0,05, revelou que as médias de resultados para a resistência a tração são diferentes com significância estatística, indicando que o parâmetro de orientação de impressão gerou uma influência nesta propriedade, comprovando o que foi observado. O modelo apresentou desvios padrões baixos, com um S de 0,36, indicando que o modelo consegue descrever bem as respostas analisadas. Tal fato é reforçado pelos valores altos de R^2 , indicando que o modelo possui boas capacidades de ajustes de dados (86,99%) e de predição (79,47%).

Tabela 13. Índices da Análise de variância dos dados individuais de resistência a tração.

| Valor-F | Valor-P | S | R^2 | $R^2(\text{aj})$ | $R^2(\text{pred})$ |
|---------|---------|--------|--------|------------------|--------------------|
| 29,26 | <0,001 | 0,3656 | 86,99% | 84,02% | 79,47% |

A Figura 82 apresenta os gráficos de resíduos para a análise de variância da ANOVA One way e testes de normalidade, dos dados de resistência a tração. O gráfico de probabilidade normal sugere que o modelo de dados apresenta boa normalidade. O histograma dos dados de resistência a tração apresenta simetria relativamente boa, indicando que os dados não possuem influências de *outliers*. O gráfico de Versus ajustado indica que os dados não apresentam

padrões reconhecíveis, indicando que os dados desta análise são aleatoriamente distribuídos e têm variância constante, conforme é desejado para um bom modelo de análise.

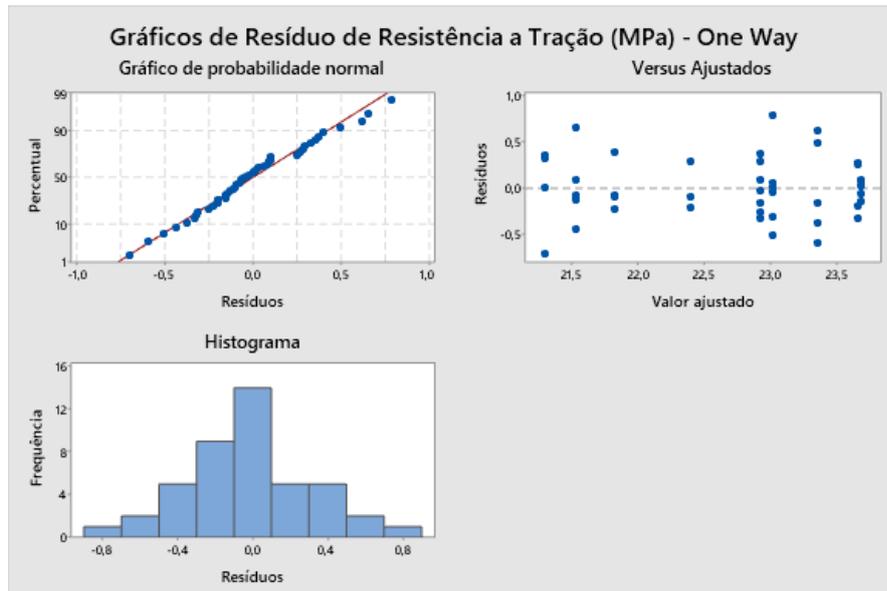


Figura 82. Gráficos de resíduos para os testes de ANOVA One Way e normalidade dos dados de resistência a tração.

A ANOVA, análise de variância, do modelo de Superfície de resposta, para a resposta resistência a tração é apresentada na Tabela 14. Foi identificado que o modelo obteve significância estatística (Valor-P inferior a 0,05), sendo adequado para investigar a influência dos parâmetros de orientações na resistência a tração. Neste modelo, a variável ângulo em relação ao plano vertical (XZ) obteve significância estatística no modelo linear, reforçando as observações de que esta orientação foi a responsável por influenciar o aumento da resistência a tração das amostras de PP impressas por MJF.

Tabela 14. Análise de variância da Resistência a tração.

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Modelo | 5 | 5,85759 | 1,17152 | 7,20 | 0,011 |
| Linear | 2 | 1,25600 | 0,62800 | 3,86 | 0,074 |
| XY | 1 | 0,04956 | 0,04956 | 0,30 | 0,598 |
| XZ | 1 | 1,22092 | 1,22092 | 7,50 | 0,029 |
| Quadrado | 2 | 0,73212 | 0,36606 | 2,25 | 0,176 |
| XY*XY | 1 | 0,00652 | 0,00652 | 0,04 | 0,847 |
| XZ*XZ | 1 | 0,73143 | 0,73143 | 4,49 | 0,072 |
| Interação com 2 Fatores | 1 | 0,04965 | 0,04965 | 0,31 | 0,598 |
| XY*XZ | 1 | 0,04965 | 0,04965 | 0,31 | 0,598 |
| Erro | 7 | 1,13936 | 0,16277 | | |
| Falta de ajuste | 3 | 0,91824 | 0,30608 | 5,54 | 0,066 |
| Erro puro | 4 | 0,22112 | 0,05528 | * | * |
| Total | 12 | 6,99695 | | | |

Visto que a ANOVA obteve significância estatística para esta propriedade, foi possível seguir a análise para identificar como os parâmetros de orientação influenciam na propriedade de resistência a tração.

O Gráfico normal de efeitos padronizados, para a resistência a tração, é apresentado na Figura 83. A partir de sua análise é possível não apenas confirmar que a orientação em relação ao plano XZ é a variável mais significativa para influenciar a resistência a tração, como esta é a única variável significativa neste modelo e que seu efeito é positivo, ou seja, quanto maior o ângulo em relação ao plano vertical (XZ), maior será a resistência a tração.

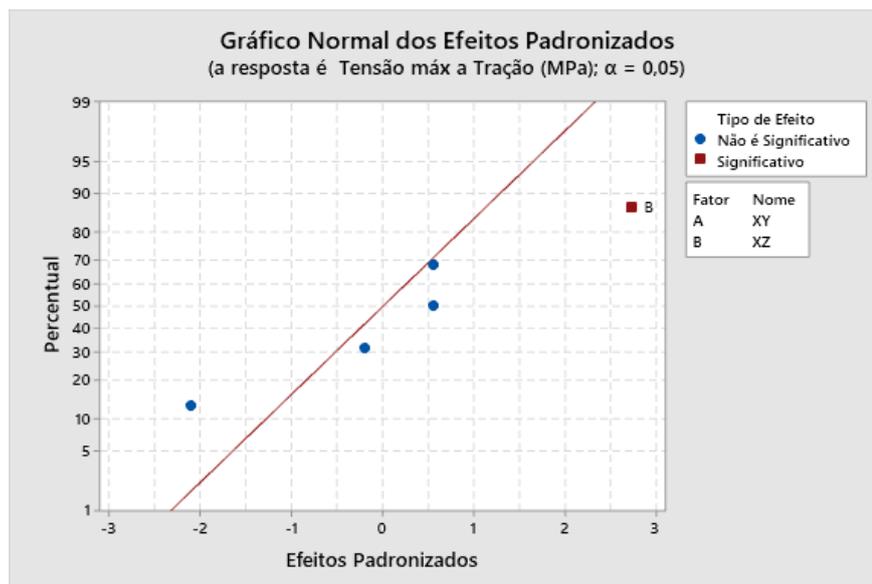


Figura 83. Gráfico normal de efeitos padronizados do modelo de superfície de resposta para a resposta de Resistência a tração.

Com a significância atestada para da resistência a tração no modelo de superfície de resposta avaliado, foi possível gerar o gráfico de superfície para mapear o comportamento da influência das orientações de impressão nesta propriedade, conforme é mostrado na Figura 84. O gráfico demonstra um comportamento relativamente linear, onde a resistência a tração aumenta à medida que o ângulo em relação ao plano vertical (XZ) é aumentado, ressaltando o que já foi discutido.

Gráfico de Superfície de Tensão máx a Tração (MPa) versus XZ; XY

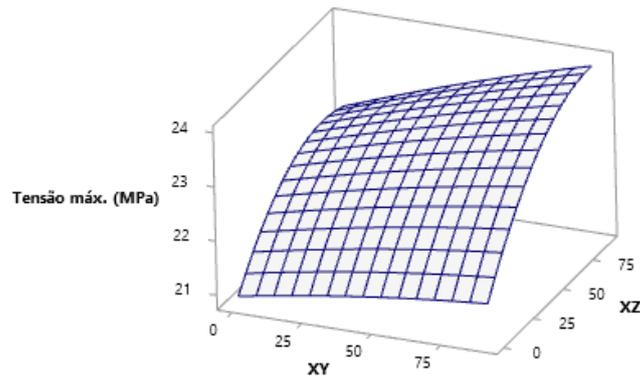


Figura 84. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para a Resistência a tração.

Aqui, outro quesito que necessita de atenção é quanto a resistência a tração é afetada pelo ângulo em relação ao plano horizontal (XY). Neste estudo por análise crítica e por validação estatística, foi observado que esse parâmetro não gerou influência na propriedade de resistência com significância estatística suficiente. Em outros trabalhos, foi observado um comportamento diferente, como nos trabalhos de Lee et al. (2020), O'Connor et al. (2020) e Calignano, Giuffrida e Galati (2021) para amostras impressas por MJF de PA11 e de PA12. Em seus trabalhos, amostras orientadas na horizontal apresentaram resistência a tração superiores e os autores justificam esse fato a fatores como a porosidade e a disposição e direção das camadas, que mudam de uma orientação de impressão para outra. Como explicam Calignano et al. (2021), amostras orientadas na vertical apresentariam maior resistência a tração, pois suas camadas estão orientadas paralelamente a direção de aplicação de força de tração, ao contrário de amostras orientadas na vertical, que tem suas camadas orientadas perpendicularmente a direção de aplicação de força de tração, como demonstrado na Figura 85. Dito isso, não é completamente possível afirmar que para o PP seria diferente sem que análises mais robustas possam ser efetuadas, pois a não significância pode ter sido causada pelo modelo estatístico aplicado (pelo gráfico de superfície é inclusive possível observar esse comportamento afetando o resultado de resistência a tração do PP). Como Montgomery (2017) e Antony (2014) explicam, as análises de um modelo de DOE pode ser afetada pelo tamanho da amostragem e a robustez do modelo aplicado, sendo necessário em alguns casos reformular e testar um novo modelo de experimentos para conseguir identificar algum efeito que possa ter se mantido incompreendido.

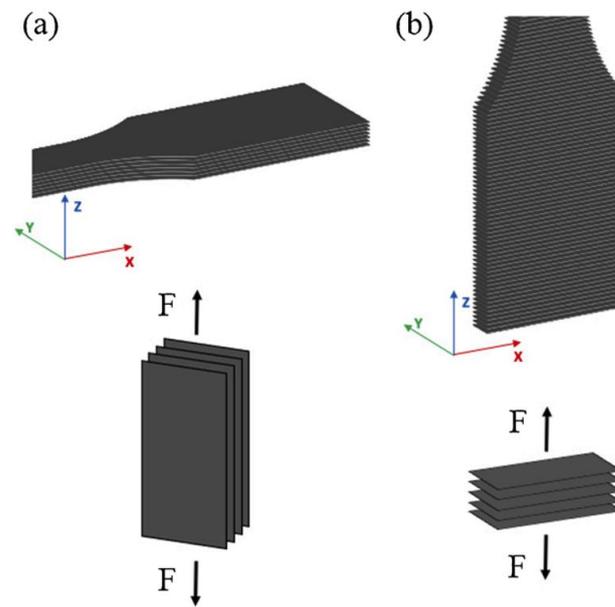


Figura 85. Disposição da camada impressa de acordo com a direção da carga de tração: (a) Orientação horizontal e (b) Orientação vertical (CALIGNANO, GIUFFRIDA e GALATI, 2021).

Outro fator que pode ter afetado o modelo a não perceber o efeito do ângulo em relação ao plano horizontal (XY) seria a taxa de aplicação da força nos testes de tração. Outros estudos, como o de Abdallah, Ali e Pervaiz (2023) e o de Mehdipou et al. (2021) comprovam que para o PA12, a taxa de aplicação de força, crescente de 1 mm/min a até 50 mm/min, pode alterar a forma da curva de tensão e deformação e afetar as respostas mecânicas consideravelmente, como demonstrado na Figura 86 para os resultados identificados por Abdallah, Ali e Pervaiz (2023). Neste estudo foi aplicada a taxa de 5 mm/min o PP. É possível que o PP apresente característica similar e que esta taxa baixa fez com que o modelo experimental não conseguisse identificar significância estatística quanto ao ângulo em relação ao plano horizontal (XY), neste caso seria interessante a condução de estudos futuros variando a taxa de aplicação de força no ensaio de tração para verificação deste comportamento.

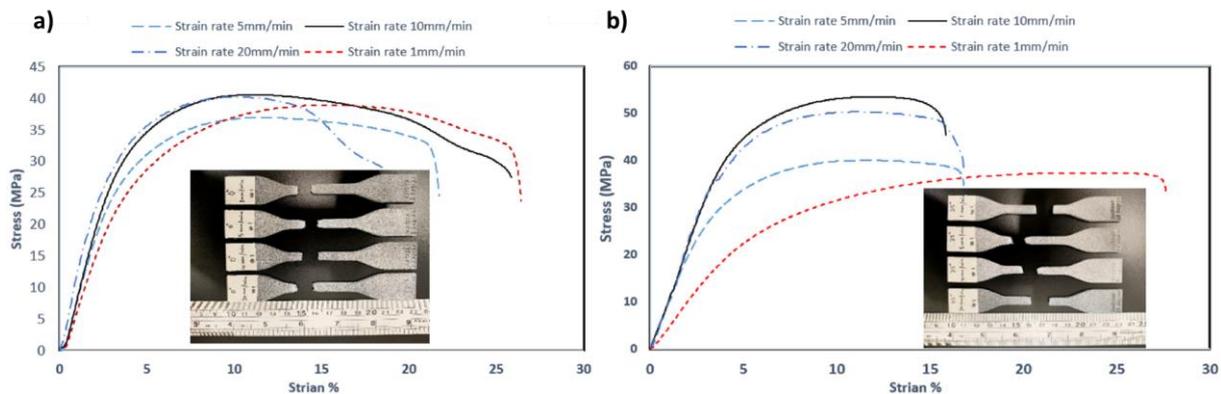


Figura 86. Curvas de tensão x deformação para amostras de PA12 impressas em MJF orientadas em a) horizontal e b) 25°, com variações de taxa de força. Adaptado de Abdallah, Ali e Pervaiz (2022).

O gráfico da Figura 87 apresenta as médias e desvios padrões para os resultados de módulo elástico de cada orientação, onde o posicionamento das barras foi colocada em ordem crescente de acordo com o ângulo de orientação no plano horizontal (XY). Pelo gráfico é possível identificar que o comportamento elástico do PP não é significativamente alterado pelas orientações de impressão, como já comentado sobre as curvas de tensão vs deformação. Ao considerar os desvios padrões esta observação é reforçada, pois pode-se considerar os resultados pertencentes dentro de uma mesma faixa. Esse comportamento foi identificado também para outros materiais de MJF como o PA11 e PA12, em trabalhos como os de O'Connor et al. (2018), Lee et al. (2020) e Osswald et al. (2021). Os resultados de módulo elástico obtidos neste estudo estão na faixa de 800 a 1000 MPa, enquanto em outros estudos estão em cerca de 1300 MPa e nos dados oferecidos pela fornecedora do material, HP, é de cerca de 1600 MPa. Esta diferença pode estar relacionada ao método de teste, pois embora as normas aplicadas sejam as mesmas, podem ter aplicado configurações de geometria de corpos de prova e velocidades de ensaio diferentes. No trabalho de Mehdipou et al. (2021) ao compararem o desempenho de peças de PA12 impressas por MJF e SLS em diferentes direções e velocidades de ensaio, foi identificado que a resposta mecânica das peças de MJF são altamente dependentes da taxa de velocidade aplicada, o que não é o caso para peças impressas pelo processo de SLS. Mehdipou et al. (2021) testaram velocidades de 5mm/min até 50mm/min, observando que em taxas menores os valores de módulo elástico reduziram em cerca de 400 MPa, sendo que neste trabalho se utilizou a taxa de 5 mm/min.

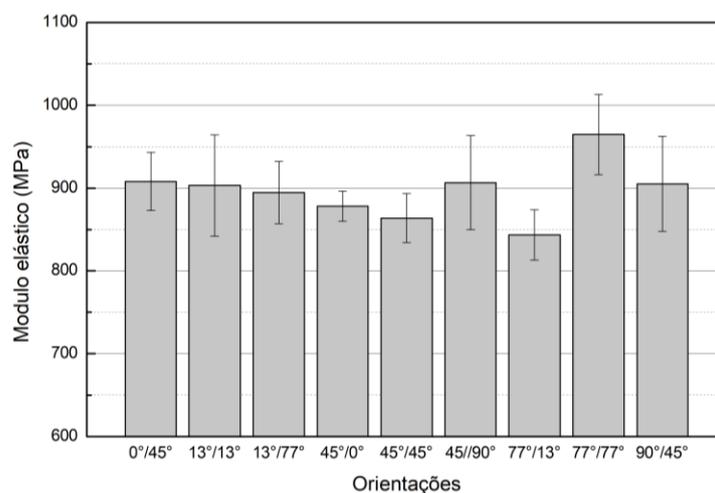


Figura 87. Gráfico comparando médias e desvios padrões dos resultados de Módulo elástico (MPa) das orientações avaliadas.

A Tabela 15 apresenta os principais índices da análise de variância e do modelo dos testes de ANOVA One Way e normalidade, para os dados de modulo elástico. O Valor-P, inferior ao nível de significância de 0,05, infere que as médias de resultados são diferentes com significância estatística, contudo, o Valor-F encontrado foi muito baixo, o que indica que o modelo não seja muito significativo. O modelo apresentou desvios padrões altos, com um S de 42,08, indicando que o modelo possui dificuldade em descrever as respostas analisadas. Esta dificuldade é notada pelos valores relativamente baixos de R^2 , indicando que o modelo não tem boas capacidades de ajustes de dados (42,46%) e de predição (5,45%). Estas análises indicam que a alta variação nos resultados de modulo elástico dificulta predições quanto a influência da orientação de impressão nesta propriedade.

Tabela 15. Índices da Análise de variância dos dados individuais de modulo elástico.

| Valor-F | Valor-P | S | R² | R²(aj) | R²(pred) |
|----------------|----------------|----------|----------------------|--------------------------|----------------------------|
| 3,23 | 0,007 | 42,0801 | 42,46% | 29,31% | 5,45% |

A Figura 88 apresenta os gráficos de resíduos para a análise de variância da ANOVA One way e testes de normalidade, para os dados de módulo elástico. A curva do gráfico de probabilidade normal sugere que o modelo de dados apresenta uma distribuição assimétrica a esquerda. O histograma reforça a assimetria nos dados, que pode ser causada pela alta variância nos dados. O gráfico de versus ajustado indica que os dados não apresentam padrões reconhecíveis, indicando que os dados desta análise são aleatoriamente distribuídos e têm variância constante, conforme é desejado para um bom modelo de análise.

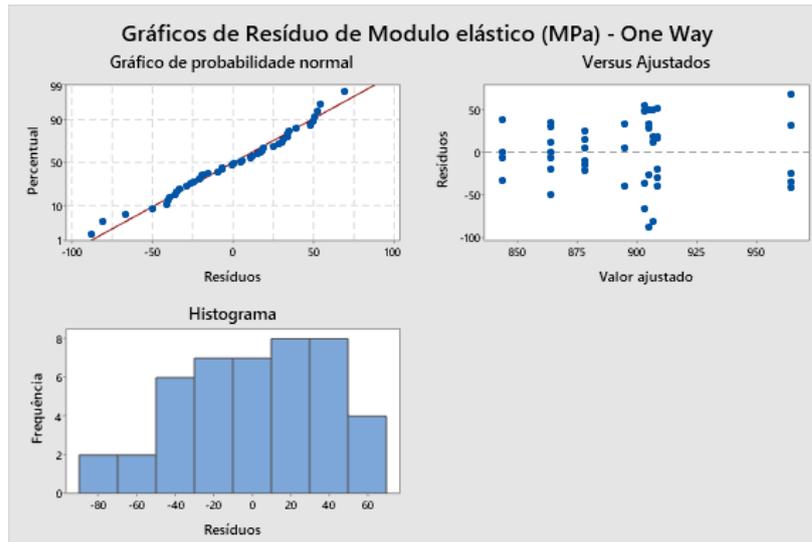


Figura 88. Gráficos de resíduos para os testes de ANOVA One Way e normalidade dos dados de módulo elástico.

A ANOVA, análise de variância, do modelo de Superfície de resposta, para a resposta módulo elástico é apresentada na Tabela 16. Foi identificado que o modelo não obteve significância estatística (Valor-P foi superior a 0,05). Com esse resultado uma análise plausível seria que de fato as orientações de impressão não geram influências significativas nos resultados desta propriedade. A variação nos resultados de modulo elástico pode ser atribuída a erros próprios de execução inerentes do procedimento de ensaio ou de manuseio das amostras.

Tabela 16. Análise de variância do Modulo elástico.

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Modelo | 5 | 11975,7 | 2395,1 | 3,67 | 0,060 |
| Linear | 2 | 7436,2 | 3718,1 | 5,70 | 0,034 |
| XY | 1 | 6790,7 | 6790,7 | 10,40 | 0,015 |
| XZ | 1 | 2845,7 | 2845,7 | 4,36 | 0,075 |
| Quadrado | 2 | 4832,2 | 2416,1 | 3,70 | 0,080 |
| XY*XY | 1 | 3654,2 | 3654,2 | 5,60 | 0,050 |
| XZ*XZ | 1 | 1730,6 | 1730,6 | 2,65 | 0,148 |
| Interação com 2 Fatores | 1 | 4202,2 | 4202,2 | 6,44 | 0,039 |
| XY*XZ | 1 | 4202,2 | 4202,2 | 6,44 | 0,039 |
| Erro | 7 | 4569,5 | 652,8 | | |
| Falta de ajuste | 3 | 680,1 | 226,7 | 0,23 | 0,869 |
| Erro puro | 4 | 3889,4 | 972,3 | * | * |
| Total | 12 | 16545,1 | | | |

Visto que a ANOVA não obteve significância estatística para esta propriedade, não foi preciso seguir a análise. Considerou-se então que os parâmetros de orientação de impressão no processo de MJF não influenciam significativamente na propriedade de modulo elástico.

O gráfico da Figura 89 apresenta as médias e desvios padrões para os resultados de alongamento (deformação máxima a tração, em %) de cada orientação avaliada, onde o posicionamento das barras foi colocada em ordem crescente de acordo com o ângulo de orientação no plano horizontal (XY). Pelo gráfico é evidente que há uma relação de efeito entre os parâmetros de orientação das amostras e os resultados de alongamento. Verifica-se que à medida que o ângulo em relação ao plano horizontal (XY) é aumentado, a deformação máxima diminui, peças posicionadas totalmente na horizontal alcançaram deformações máximas de cerca de 48,32%, enquanto peças posicionadas totalmente na vertical alcançaram de cerca de 16,26%. Comportamento similar foi identificado por Safka et al. (2021) ao estudar amostras de PP impressas por MJF sob tração, bem como para outros materiais para MJF, como para o TPU por Wei et al. (2021), para o PA11 por Lee et al.(2020) e para o PA12 por Calignano, Giuffrida e Galati (2021).

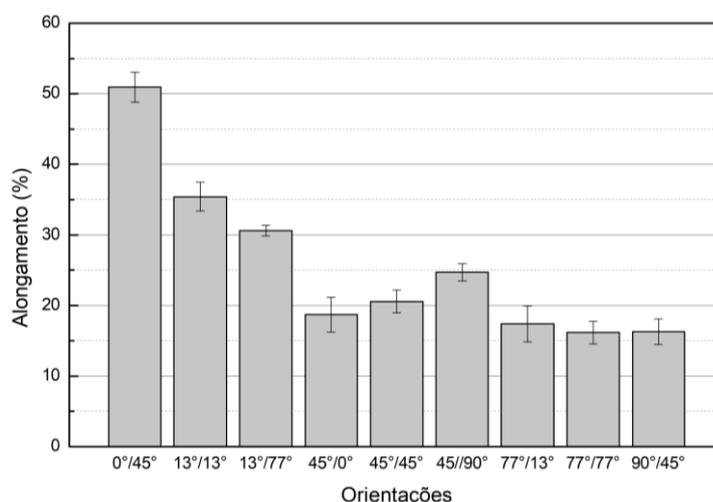


Figura 89. Gráfico comparando médias e desvios padrões dos resultados de Alongamento até ruptura (Deformação até ruptura, %) das orientações avaliadas.

Esse comportamento pode estar atrelado à disposição e direção das camadas que é diferente para cada orientação de impressão. Como demonstrando na Figura 90, amostras impressas na horizontal têm suas camadas formadas pela área correspondente a todo o perímetro da amostra, e assim são paralelas a direção de aplicação da força de tração. Já as amostras orientadas na horizontal, possuem suas camadas formadas ao longo do comprimento das amostras, e assim são perpendiculares a direção de aplicação de força de tração, o que reduz o alongamento ao antecipar a trinca, que ocorre nas regiões intercamadas, que possuem ligações mais fracas e são sujeitas a concentração de tensão. Calignano, Giuffrida e Galati (2021) também associou esse efeito a disposição das camadas em seu estudo, ao analisarem amostras

de tração impressas por PA12 no MJF, que explicam que o alongamento até ruptura foi a propriedade mais afetada pela orientação de impressão no processo de MJF. Nota-se que amostras impressas na vertical apresentam fraturas com característica frágil, enquanto as impressas na horizontal apresentam característica de fratura parcialmente dúctil, embora o comportamento frágil ainda seja predominante.

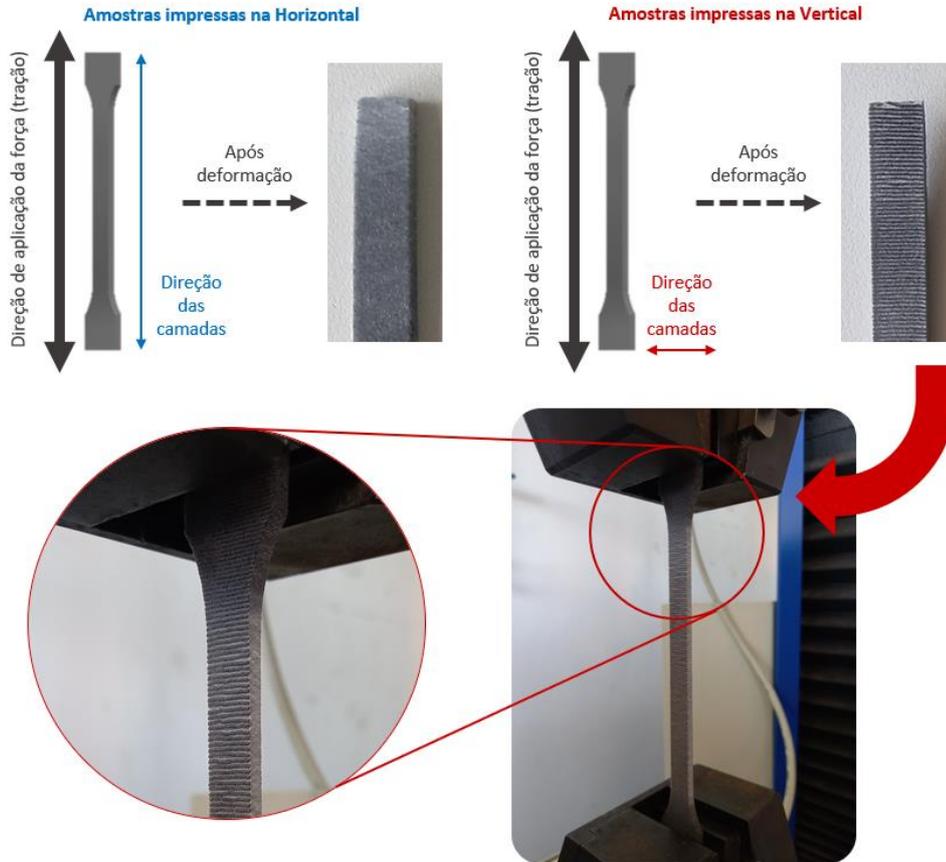


Figura 90. Esquema demonstrando a interação entre a direção de camadas e direção de aplicação da força de tração.

A Tabela 17 apresenta os principais índices da análise de variância e do modelo dos testes de ANOVA One Way e normalidade, para os dados de alongamento. O Valor-P, inferior ao nível de significância de 0,05, revela que as médias de resultados para o alongamento são diferentes com significância estatística, indicando que o parâmetro de orientação de impressão possui influência nesta propriedade. O modelo apresentou desvios padrões baixos, com um S de 2,73, indicando que o modelo consegue descrever bem as respostas analisadas. Esta observação é reforçada pelos valores muito altos de R^2 , indicando que o modelo possui ótimas capacidades de ajustes de dados (94,44%) e de predição (90,07%).

Tabela 17. Índices da Análise de variância dos dados individuais de alongamento até ruptura.

| Valor-F | Valor-P | S | R ² | R ² (aj) | R ² (pred) |
|---------|---------|------|----------------|---------------------|-----------------------|
| 70,08 | <0,001 | 2,73 | 94,44% | 93,09% | 90,07% |

A Figura 91 apresenta os gráficos de resíduos para a análise de variância da ANOVA One way e testes de normalidade, dos dados de alongamento. O gráfico de probabilidade normal sugere que o modelo de dados apresenta boa normalidade, com apenas um possível outliers identificado. O histograma dos dados apresenta simetria relativa, com influência de apenas um *outlier*. O gráfico de versus ajustado indica que os dados não apresentam padrões reconhecíveis, indicando que os dados desta análise são aleatoriamente distribuídos e têm variância constante, conforme é desejado para um bom modelo de análise.

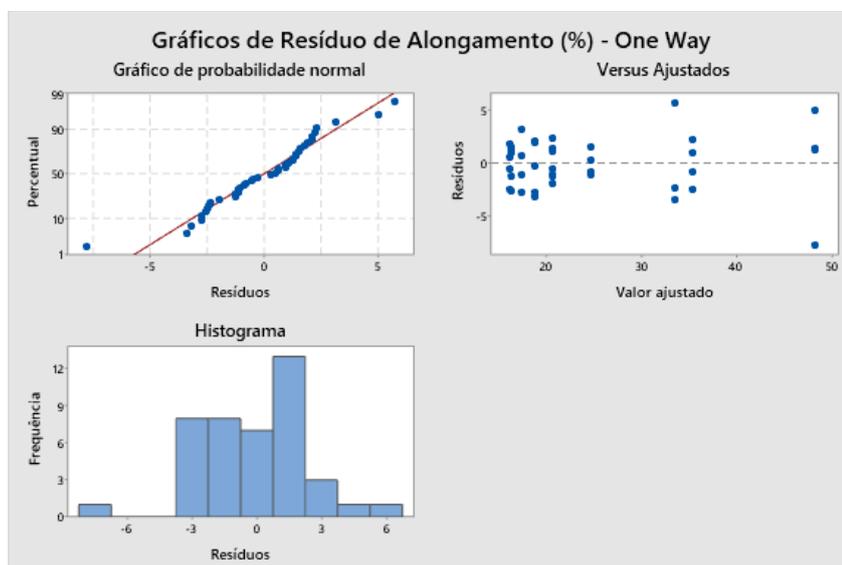


Figura 91. Gráficos de resíduos para os testes de ANOVA One Way e normalidade dos dados de alongamento.

A ANOVA, análise de variância, do modelo de Superfície de resposta, para a resposta alongamento é dada na Tabela 18. Foi identificado que o modelo obteve significância estatística (Valor-P inferior a 0,05), sendo adequado para investigar a influência dos parâmetros de orientações no alongamento. Neste modelo, a variável ângulo em relação ao plano horizontal (XY) obteve significância estatística no modelo linear e no quadrado, reforçando as observações de que esta orientação afeta o percentual de alongamento das amostras de PP impressas por MJF.

Tabela 18. Análise de variância do Alongamento.

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Modelo | 5 | 1010,99 | 202,198 | 33,08 | 0,000 |
| Linear | 2 | 417,73 | 208,866 | 34,17 | 0,000 |
| XY | 1 | 356,22 | 356,224 | 58,27 | 0,000 |
| XZ | 1 | 0,28 | 0,281 | 0,05 | 0,836 |
| Quadrado | 2 | 193,05 | 96,525 | 15,79 | 0,003 |
| XY*XY | 1 | 189,04 | 189,042 | 30,93 | 0,001 |
| XZ*XZ | 1 | 0,07 | 0,073 | 0,01 | 0,916 |
| Interação com 2 Fatores | 1 | 0,13 | 0,129 | 0,02 | 0,888 |
| XY*XZ | 1 | 0,13 | 0,129 | 0,02 | 0,888 |
| Erro | 7 | 42,79 | 6,113 | | |
| Falta de ajuste | 3 | 34,18 | 11,392 | 5,29 | 0,071 |
| Erro puro | 4 | 8,61 | 2,153 | * | * |
| Total | 12 | 1053,78 | | | |

Visto que a ANOVA obteve significância estatística para esta propriedade, foi possível seguir com este modelo de superfície de resposta para a análise para identificar como os parâmetros de orientação influenciam na propriedade de alongamento.

O Gráfico normal de efeitos padronizados, para o alongamento, é apresentada na Figura 92. Através de sua análise é possível validar que a orientação em relação plano XY (horizontal) é a variável mais significativa para influenciar nos resultados de alongamento. Ainda, a variável pode apresentar efeito quadrático com apresentar uma interação com a variável de orientação quanto ao plano XZ (vertical), embora o efeito desta interação não tenha expressado significância. O efeito do ângulo em relação ao plano horizontal é principalmente negativo, ou seja, quanto maior o ângulo, menor será o alongamento das peças impressas por PP.

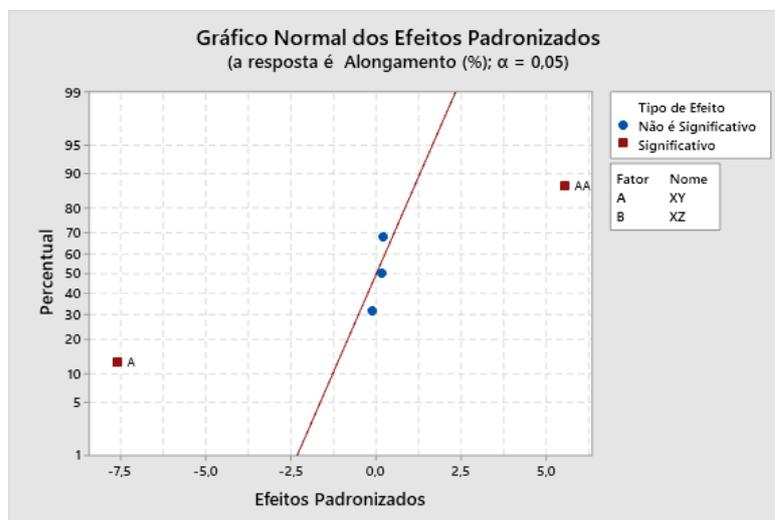


Figura 92. Gráfico normal de efeitos padronizados do modelo de superfície de resposta para a resposta de Alongamento.

Validada a significância estatística para os dados de alongamento no modelo de superfície de resposta avaliado, foi possível gerar o gráfico de superfície para mapear o comportamento da influência das orientações de impressão nesta propriedade, conforme é mostrado na Figura 93. O gráfico demonstra um comportamento relativamente quadrático, onde o alongamento reduz à medida que o ângulo em relação ao plano horizontal (XY) é aumentado, confirmando o que já foi abordado.

Gráfico de Superfície de Alongamento (%) versus XZ; XY

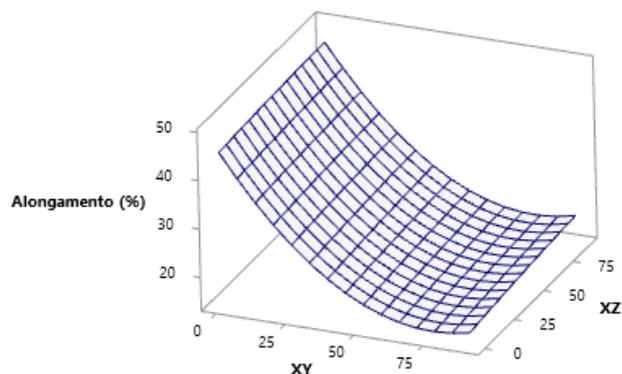


Figura 93. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para o Alongamento.

Quanto a avaliação dimensional das amostras de tração, O gráfico apresentado na Figura 94 indica as médias e desvios padrões para os resultados aferidos das dimensões da área transversal das amostras, considerando a região central das amostras e não as extremidades. Pelo gráfico é possível observar que a orientação de impressão gera uma variação nas dimensões da seção das amostras. As amostras mais orientadas na horizontal conseguem atingir valores mais próximos da referência esperada (40 mm²), enquanto amostras orientadas na vertical apresentam aumento nas dimensões, se afastando do valor de referência desejado. Sağbaş (2020) encontrou um comportamento similar ao comparar a precisão dimensional de parafusos fabricados por MJF orientados a 90° e a 45° em relação ao plano XY, tendo identificado variações na peça a 90°, as quais associou ao efeito de capilaridade. Visto que o mesmo efeito foi observado através de microscopias, pode-se considerar que a capilaridade resultante nas geometrias das amostras com diferentes orientações tenha afetado a variação nos resultados dimensionais.

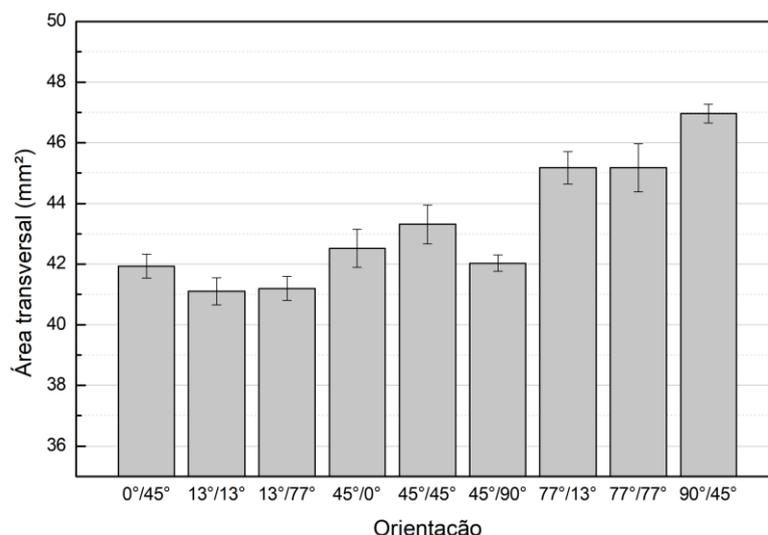


Figura 94. Área transversal das medições dimensionais da região central das amostras de tração.

A Tabela 23 apresenta os principais índices da análise de variância e do modelo dos testes de ANOVA One Way e normalidade, para os dados dimensionais das amostras de tração. Em todas as medidas avaliadas, o Valor-P foi inferior ao nível de significância de 0,05, indicando que as médias de resultados são diferentes com significância estatística. Os modelos apresentam desvios padrões relativamente baixos e valores de R mais altos para a espessura e a área transversal, indicando boas capacidades de interpretação e de predição.

Tabela 19. Índices da Análise de variância dos dados individuais de espessura, largura e área transversal das regiões centrais das amostras de tração.

| Variável | Valor-F | Valor-P | S | R ² | R ² (aj) | R ² (pred) |
|------------------|---------|---------|--------|----------------|---------------------|-----------------------|
| Espessura | 64,30 | <0,001 | 0,0462 | 93,63% | 92,17% | 90,12% |
| Largura | 19,93 | <0,001 | 0,0465 | 82,02% | 77,91% | 73,00% |
| Área Transversal | 61,80 | <0,001 | 0,5389 | 93,39% | 91,88% | 89,84% |

As análises de variância para as respostas das dimensões são apresentadas na Tabela 20, trazendo apenas as variáveis que apresentaram significância no modelo testado. Foi identificado que o modelo obteve significância estatística (Valor-P foi inferior a 0,05) para as medições dimensionais aferidas, sendo observado ainda que ambos os parâmetros de orientação de fabricação influenciaram os resultados, indicando que a orientação das peças impressas por MJF pode afetar a precisão dimensional. Embora este efeito tenha apresentado significância estatística, é preciso considerar ainda a intensidade desta influência foi baixa. Ainda, para a largura das amostras de tração, foi indicado no modelo de superfície de resposta incapacidade de predição. No entanto, pode ser necessário considerar esta variação, por exemplo, quando se pretende fabricar produtos com requisitos dimensionais mais críticos, sendo necessário otimizar

o processo para atender estes requisitos. Ainda, no modelo foi verificada uma interação entre os dois ângulos para a espessura.

Tabela 20. Análise de variância das dimensões das regiões centrais das amostras de tração no modelo de superfície de resposta.

| Variável | Fatores com significância no modelo de resposta de superfície | Valor-P | S | R ² | R ² (aj) | R ² (pred) |
|------------------|---|---------|--------|----------------|---------------------|-----------------------|
| Espessura | Modelo | 0,000 | | | | |
| | Linear | 0,000 | | | | |
| | XY | 0,000 | | | | |
| | XZ | 0,002 | | | | |
| | Quadrado | 0,001 | 0,1388 | 99,35% | 98,88% | 95,34% |
| | XY*XY | 0,028 | | | | |
| | XZ*XZ | 0,001 | | | | |
| | Interação com 2 fatores | 0,011 | | | | |
| | XY*XZ | 0,011 | | | | |
| Largura | Modelo | 0,009 | | | | |
| | Linear | 0,004 | | | | |
| | XY | 0,046 | | | | |
| | XZ | 0,010 | 0,0331 | 84,93% | 74,17% | 0,00% |
| | Quadrado | 0,004 | | | | |
| | XY*XY | 0,035 | | | | |
| | XZ*XZ | 0,005 | | | | |
| Área transversal | Modelo | 0,000 | | | | |
| | Linear | 0,001 | | | | |
| | XY | 0,029 | | | | |
| | XZ | 0,000 | 0,1875 | 99,23% | 98,68% | 94,52% |
| | Quadrado | 0,000 | | | | |
| | XY*XY | 0,000 | | | | |
| | XZ*XZ | 0,000 | | | | |

Com a significância atestada para os resultados dimensionais, foi possível gerar o gráfico de superfície para mapear o comportamento da influência das orientações de impressão nas dimensões das regiões centrais das amostras de tração, conforme é mostrado na Figura 95. O gráfico demonstra um comportamento dependente das duas orientações estudadas, onde o ponto ótimo desejado seria considerando área transversal de 40 mm². Através do gráfico é visível que amostras orientadas a 0° na horizontal (plano XY) e 0° na vertical (plano XZ) são as mais se adequam ao valor esperado.

Gráfico de Superfície de Área transversal (mm²) versus XZ; XY

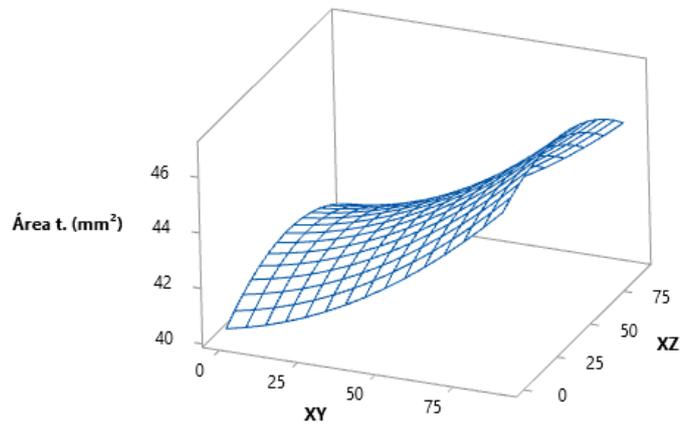


Figura 95. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para a área transversal média das regiões centrais das amostras de tração.

4.2.1 Ensaios de impacto

As amostras dos ensaios de impacto foram classificadas por orientação, conforme é mostrado na Figura 96, a qual apresenta as amostras e demonstra suas regiões de falha geradas pelo impacto aplicado pelo modelo de teste Izod.

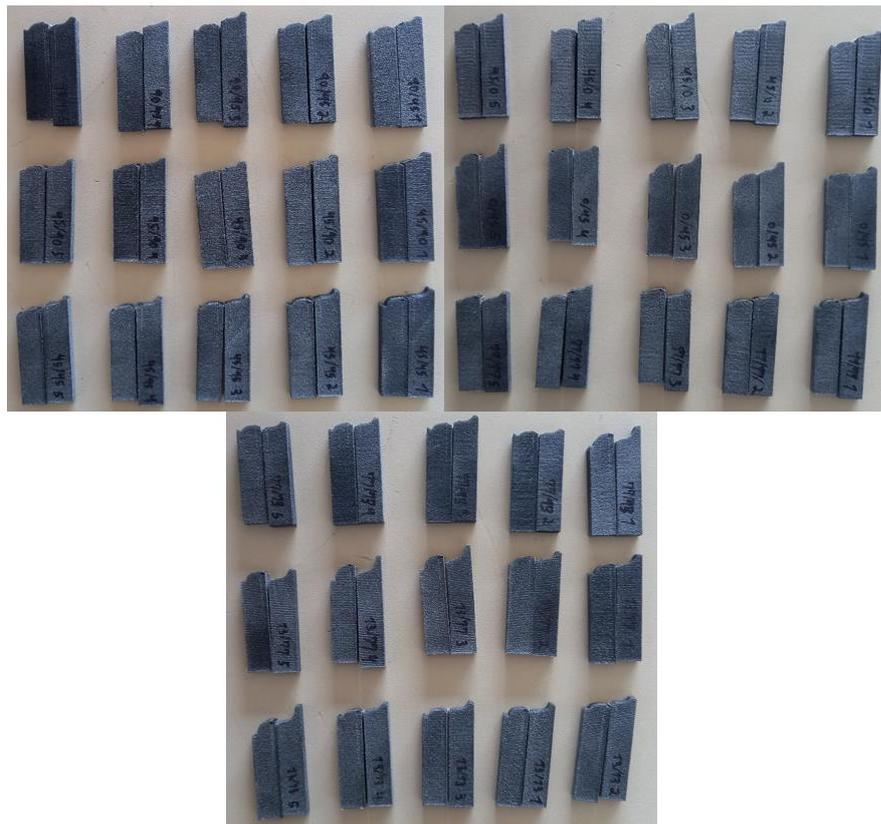


Figura 96. Amostras dos ensaios de impacto após a realização dos testes, com as orientações avaliadas marcadas.

O gráfico a seguir, da Figura 97, apresenta as médias e desvios padrões para os resultados calculados de resistência ao impacto para cada orientação de impressão avaliada, onde o posicionamento das barras foi colocada em ordem crescente de acordo com o ângulo de orientação no plano horizontal (XY). Pelo gráfico é possível verificar que a resistência ao impacto não é significativamente influenciada pelas orientações de impressão, sem apresentar também um padrão perceptível. Os desvios padrões alocam os valores encontrados dentro de uma mesma faixa de erro, e podem estar associados a erros de operação e de entalhe típicos do ensaio de impacto. Pode-se propor com estes resultados que a orientação de impressão não afeta a resistência ao impacto das peças de PP impressas por MJF, o que é mais aprofundado nas análises estatísticas a seguir.

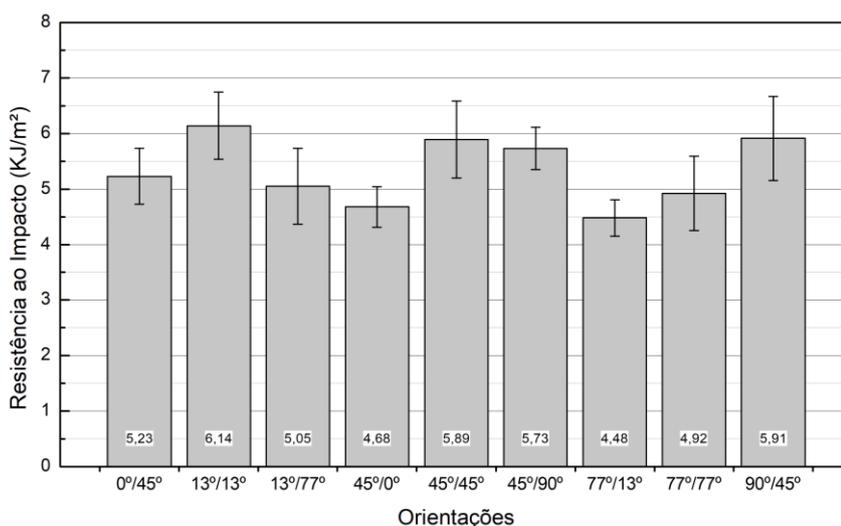


Figura 97. Gráfico comparando médias e desvios padrões dos resultados de Resistência ao impacto (KJ/m²) das orientações avaliadas.

A Figura 98 demonstra algumas amostras representando as orientações 45°/90°, 45°/0°, 0°/45° e 90°/45°, apresentando as fraturas resultantes do ensaio de impacto. Pela análise visual pode ser verificado que as fraturas presentes nas amostras foram similares para todas as orientações, sem variações significativas na forma, que pode ser associada à de fratura frágil, um comportamento esperado para polímeros com alta cristalinidade, como o PP. Outro fator presente em todas as amostras de cada orientação é a presença de poros, inerente do processo de fusão em leito de pó, que pode ter influenciado nas variações de resistência ao impacto. A Figura 99 demonstra a presença de poros em uma amostra de impacto para a orientação de 45°/45°.

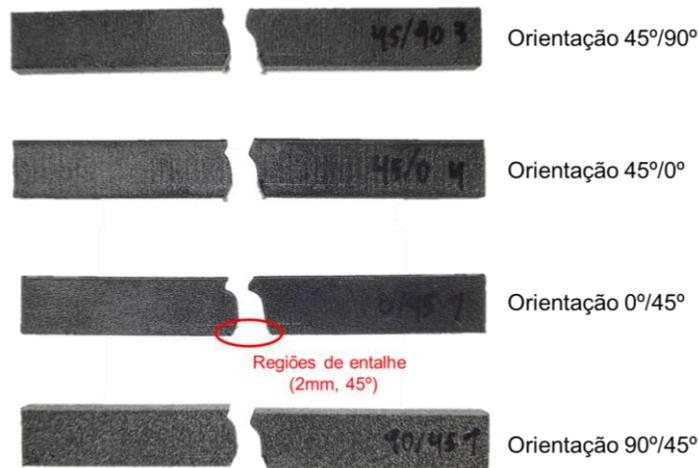


Figura 98. Exemplos de amostras de impacto fraturadas, com características de fratura frágil.

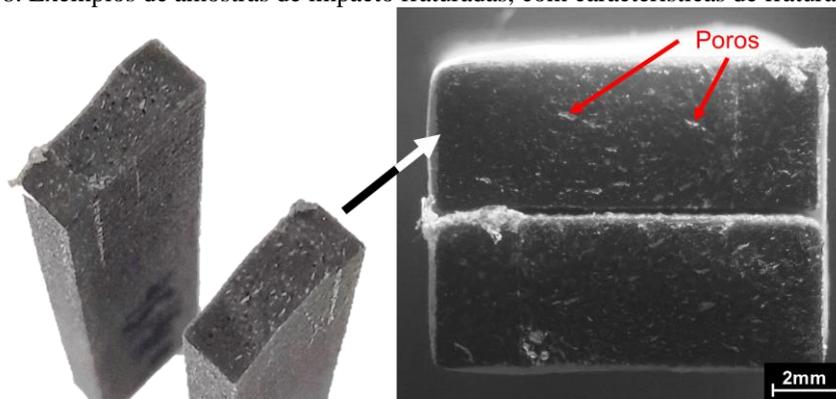


Figura 99. Amostra de impacto da orientação 45°/45°, detalhamento com maior proximidade a região fraturada na esquerda e uma micrografia com aproximação de 6,4 x da face fraturando revelando as porosidades.

A Tabela 21 apresenta os principais índices da análise de variância e do modelo dos testes de ANOVA One Way e normalidade, para os dados de resistência ao impacto. O Valor-P, inferior ao nível de significância de 0,05, infere que as médias de resultados são diferentes com significância estatística, contudo, o Valor-F encontrado foi muito baixo, o que indica que o modelo não seja muito significativo. O modelo apresentou desvios padrões relativamente altos para a escala desta propriedade, com um S de 0,57, indicando que o modelo possa ter dificuldade em descrever as respostas analisadas. Esta dificuldade é notada pelos valores relativamente baixos de R^2 , indicando que o modelo não tem boas capacidades de ajustes de dados (56,54%) e de predição (27,41%). Estas análises indicam que a alta variação nos resultados de resistência ao impacto dificulta predições quanto a influência da orientação de impressão nesta propriedade. A interpretação plausível para este caso é que a orientação de impressão não gera variação significativa, influência, na resistência ao impacto. Os erros de variância podem estar mais associados, neste caso, a erros relativos à manipulação de amostras,

imprecisões de entalhe ou medição visual do operador, que são inerentes para este tipo específico de ensaio mecânico.

Tabela 21. Índices da Análise de variância dos dados individuais de resistência ao impacto.

| Valor-F | Valor-P | S | R ² | R ² (aj) | R ² (pred) |
|---------|---------|--------|----------------|---------------------|-----------------------|
| 5,20 | <0,001 | 0,5719 | 56,54% | 45,63% | 27,21% |

A Figura 100 apresenta os gráficos de resíduos para a análise de variância da ANOVA One way e testes de normalidade, para os dados de resistência ao impacto. A curva do gráfico de probabilidade normal sugere que o modelo de dados apresenta uma distribuição normal adequada. O histograma indica simetria nos dados, sem influências de *outliers*. O gráfico de versus ajustado indica que os dados não apresentam padrões reconhecíveis, indicando que os dados desta análise são aleatoriamente distribuídos e têm variância constante, conforme é desejado para um bom modelo de análise.

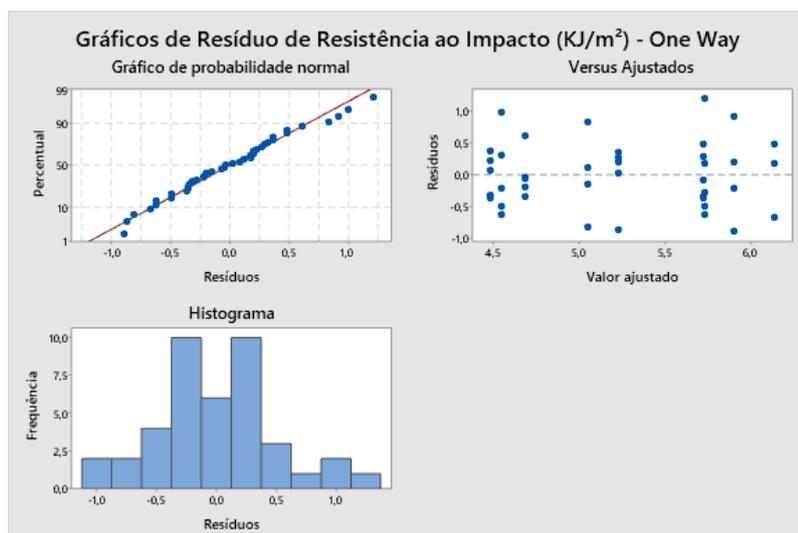


Figura 100. Gráficos de resíduos para os testes de ANOVA One Way e normalidade dos dados de resistência ao impacto.

A ANOVA, análise de variância, do modelo de Superfície de resposta, para a resposta resistência ao impacto é apresentada na Tabela 22. Foi identificado que o modelo não obteve significância estatística (Valor-P foi superior a 0,05). Para esse resultado uma análise plausível seria que realmente as orientações de impressão não geram influências significativas nos resultados desta propriedade, ressaltando o que já foi discutido.

Tabela 22. Análise de variância da Resistência ao impacto.

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Modelo | 5 | 1,01418 | 0,20284 | 0,49 | 0,773 |
| Linear | 2 | 0,22880 | 0,11440 | 0,28 | 0,765 |
| XY | 1 | 0,06763 | 0,06763 | 0,16 | 0,697 |
| XZ | 1 | 0,07899 | 0,07899 | 0,19 | 0,674 |
| Quadrado | 2 | 0,46829 | 0,23414 | 0,57 | 0,590 |
| XY*XY | 1 | 0,03933 | 0,03933 | 0,10 | 0,766 |
| XZ*XZ | 1 | 0,45506 | 0,45506 | 1,11 | 0,328 |
| Interação com 2 Fatores | 1 | 0,33471 | 0,33471 | 0,81 | 0,397 |
| XY*XZ | 1 | 0,33471 | 0,33471 | 0,81 | 0,397 |
| Erro | 7 | 2,87617 | 0,41088 | | |
| Falta de ajuste | 3 | 2,21834 | 0,73945 | 4,50 | 0,090 |
| Erro puro | 4 | 0,65783 | 0,16446 | * | * |
| Total | 12 | 3,89035 | | | |

Visto que a ANOVA não obteve significância estatística para esta propriedade, não foi preciso seguir a análise de mapeamento de influência. Considerou-se então que os parâmetros de orientação de impressão no processo de MJF não influenciam significativamente na propriedade de resistência ao impacto.

Quanto a avaliação dimensional das amostras de impacto, O gráfico apresentado na Figura 101 indica as médias e desvios padrões para os resultados aferidos das dimensões da área transversal das amostras. Pelo gráfico é possível observar uma tendência nos resultados relacionada à variação nas orientações de fabricação, onde as amostras mais orientadas na horizontal conseguem atingir valores menores e mais próximos da referência esperada (40 mm²), enquanto amostras orientadas na vertical aumentaram os valores das dimensões, se afastando do valor de referência desejado. O mesmo comportamento foi o observado para as amostras de tração, o que fortalece a suposição de que realmente a orientação seja o fator principal que gerou as variações observadas.

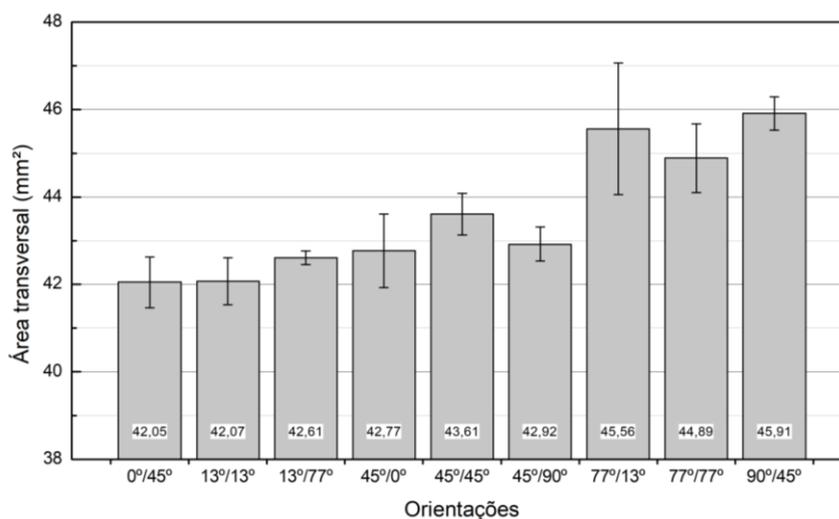


Figura 101. Gráfico de área transversal para as amostras de impacto nas diferentes orientações avaliadas.

A Tabela 23 apresenta os principais índices da análise de variância e do modelo dos testes de ANOVA One Way e normalidade, para os dados dimensionais. Para todos os casos, o Valor-P foi inferior ao nível de significância de 0,05, indicando que as médias de resultados são diferentes com significância estatística. Contudo, foi identificado um Valor-F mais baixo (para o nível de significância de 0,05) na medição da dimensão largura, o que indica que o modelo não seja muito significativo para esta variável. Os modelos apresentam desvios padrões relativamente baixos e valores de R mais altos para a espessura e a área transversal, indicando boas capacidades de interpretação e de predição.

Tabela 23. Índices da Análise de variância dos dados individuais de espessura, largura e área transversal das amostras de impacto.

| Variável | Valor-F | Valor-P | S | R ² | R ² (aj) | R ² (pred) |
|------------------|---------|---------|--------|----------------|---------------------|-----------------------|
| Espessura | 21,17 | <0,001 | 0,0634 | 82,47% | 78,57% | 72,61% |
| Largura | 7,09 | <0,001 | 0,0644 | 61,17% | 52,54% | 39,33% |
| Área Transversal | 23,48 | <0,001 | 0,6547 | 84,67% | 81,07% | 72,75% |

As análises de variância para as respostas das dimensões são apresentadas na Tabela 24, a qual apresenta apenas as variáveis que apresentaram significância. Foi identificado que o modelo obteve significância estatística (Valor-P foi inferior a 0,05) também para as medições dimensionais aferidas nas amostras de tração, com ambos os ângulos de orientação influenciando os resultados. Embora a influência da orientação de impressão tenha apresentado significância estatística, é preciso considerar ainda a intensidade desta influência, afinal para a geometria avaliada, a variação dimensional foi no máximo na ordem de um desvio padrão de 0,65 mm, o que para muitas aplicações não é uma variação crítica.

Tabela 24. Análise de variância das dimensões amostras de impacto no modelo de superfície de resposta.

| Variável | Fatores com significância no modelo de resposta de superfície | Valor-P | S | R ² | R ² (aj) | R ² (pred) |
|------------------|---|----------------|--------|----------------|---------------------|-----------------------|
| Espessura | Modelo | 0,000 | 0,0126 | 99,19% | 98,61% | 94,22% |
| | Linear | 0,014 | | | | |
| | XY | 0,005 | | | | |
| | Quadrado XY*XY | 0,004 0,002 | | | | |
| Largura | Modelo | 0,000 | 0,0110 | 98,62% | 97,64% | 90,19% |
| | Linear | 0,014 | | | | |
| | XZ | 0,005 | | | | |
| | Quadrado XZ*XZ | 0,004 0,002 | | | | |
| Área transversal | Modelo | 0,000 | 0,1324 | 99,18% | 98,59% | 94,14% |
| | Linear | 0,001 | | | | |
| | XY | 0,003 | | | | |
| | XZ | 0,000 | | | | |
| | Quadrado XY*XY | 0,000 0,003 | | | | |
| | XZ*XZ | 0,000 | | | | |

Com a significância atestada para os resultados dimensionais, foi possível gerar o gráfico de superfície para mapear o comportamento da influência das orientações de impressão nas dimensões transversais das amostras de impacto, conforme é mostrado na Figura 102. O gráfico é muito similar ao gerado para as medições dimensionais das amostras de tração, indicando que amostras orientadas a 0° na horizontal (plano XY) e 0° na vertical (plano XZ) são as mais se adequam ao valor esperado.

Gráfico de Superfície de Área transversal (mm²) versus XZ; XY

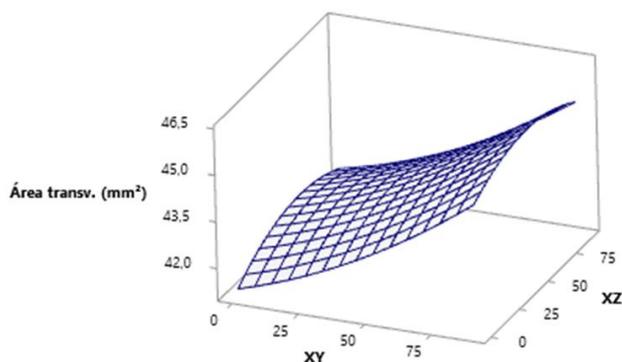


Figura 102. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para a área transversal média das amostras de impacto.

4.3 Porosidade aparente

Através da medição das massas das amostras foi possível calcular a porosidade aparente para cada orientação avaliada. As massas obtidas são listadas na Figura 103 para as 3 condições de medição aplicadas nas amostras, enquanto a Figura 104 apresenta a porosidade aparente calculada pela relação entre as massas, dada em percentual. Os resultados indicam um aumento da porosidade a medida que o ângulo em relação ao plano XZ aumenta, mas apresenta variações neste comportamento, que podem reduzir o valor mensurado a depender do ângulo em relação ao plano XY, o que pode indicar uma interação entre os dois ângulos. Este efeito do ângulo em relação ao plano XZ permite traçar uma relação entre a porosidade e a resistência mecânica, visto que as duas características demonstraram maior efeito proveniente deste ângulo e a resistência mecânica ser uma propriedade significativamente afetada pela presença ou ausência de porosidade. Pela análise é possível observar também uma ordem de grandeza de valor para a porosidade das peças de polipropileno. As amostras apresentaram porosidade aparente média de 0,05 a 0,26% do volume total. Estes valores baixos (inferiores a 1%) de porosidade estão

condizentes com resultados obtidos por outros autores para outro material processado por MJF, o PA11 que apresentou porosidade na faixa de 0,69 a 0,94% (PANDELIDI, LEE E KAJTAZ, 2021) ou na faixa de 0,06 a 0,69% (LEE et al. 2020), sendo inferior a porosidade do PA12 processado via MJF, que pode apresentar porosidades acima de 3% (O' CONNOR et a. 2018). Como já abordado no levantamento bibliográfico, a presença de porosidade está associada ao empacotamento intra-camada do pó no plano horizontal, relacionadas ao espalhamento do pó na camada depositada, onde as partículas de pó se ajustam para uma posição mais estável pelo efeito de gravidade, aumentando a compactação do pó no plano vertical, mais do que ocorre no horizontal (LEE et al., 2020). Embora neste estudo não se tenha aplicado métodos de análise topográfica, em todos estudos com MJF é observado que os poros se concentram mais no interior das peças, com formas irregulares. Essa formação de poros é também associada à evaporação do solvente aquoso no agente de fusão depositado na peça e também ou agente de detalhamento à base de água que pode ser depositado em regiões intermediárias (internas) da peça durante a impressão para reduzir o acúmulo térmico (CAI et al., 2021). Embora Lee e tal. (2020) indique que o maior efeito da orientação na porosidade seja no plano vertical, CAI et al. (2021) comenta que o acúmulo térmico pode também afetar, isso justificaria uma interação entre os efeitos dos ângulos e a razão do ângulo em relação ao plano XZ ter sido mais significativo neste estudo.

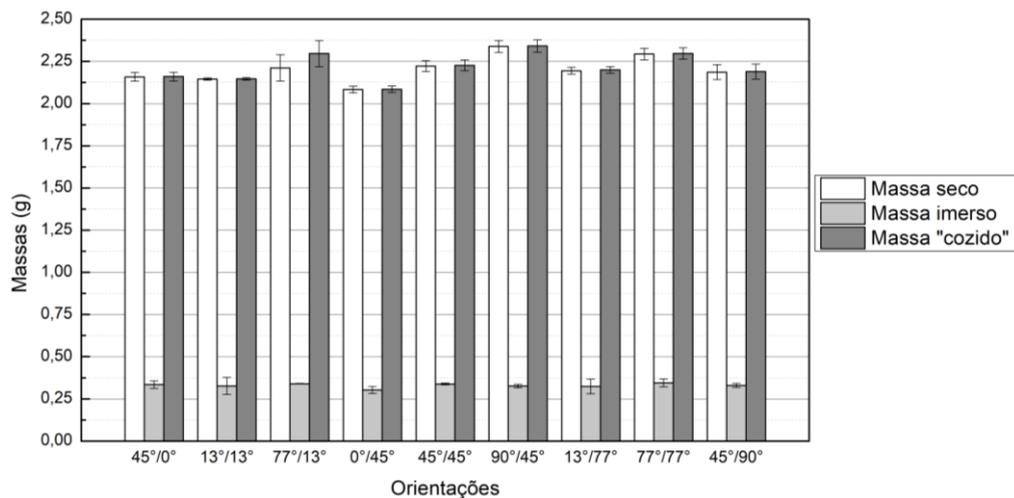


Figura 103. Medições de massas seco, imerso e “cozido”, para cálculo de porosidade aparente.

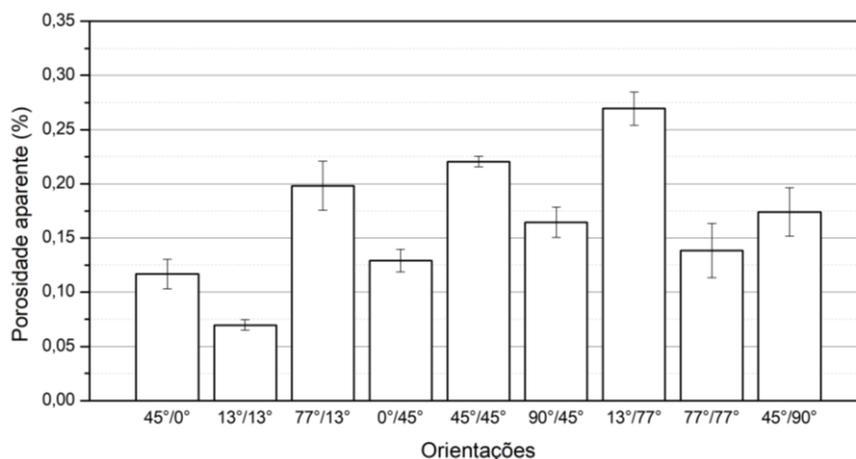


Figura 104. Gráfico de porosidade aparente para as orientações avaliadas, em ordem crescente considerando o ângulo em relação ao plano XZ.

A Tabela 25 apresenta os principais índices da análise de variância e do modelo dos testes de ANOVA One Way e normalidade dos dados de porosidade aparente. O Valor-P, inferior ao nível de significância de 0,05, demonstra que as médias de resultados para a porosidade aparente são diferentes com significância estatística, indicando que o parâmetro de orientação de impressão gerou uma influência na porosidade. O modelo ainda apresentou desvios padrões baixos, indicando que o modelo consegue descrever bem as respostas analisadas, com valores altos de R^2 , revelando que o modelo possui boas capacidades de ajustes de dados e de predição.

Tabela 25. Índices da Análise de variância dos dados individuais de porosidade aparente.

| Valor-F | Valor-P | S | R^2 | $R^2(\text{aj})$ | $R^2(\text{pred})$ |
|---------|---------|---------|--------|------------------|--------------------|
| 47,97 | <0,001 | 0,01604 | 94,79% | 92,81% | 89,32% |

Os gráficos de resíduos para a análise de variância da ANOVA One way e testes de normalidade, dos dados de porosidade aparente são apresentados na Figura 105. O gráfico de probabilidade normal indica que o modelo de dados apresenta boa normalidade. O histograma dos dados de porosidade aparente apresenta simetria relativamente boa, indicando que os dados não possuem influências de *outliers*. O gráfico de Versus ajustado mostra que os dados não apresentam padrões reconhecíveis, indicando que os dados são aleatoriamente distribuídos e têm variância constante, comportamento adequado para um bom modelo de análise.

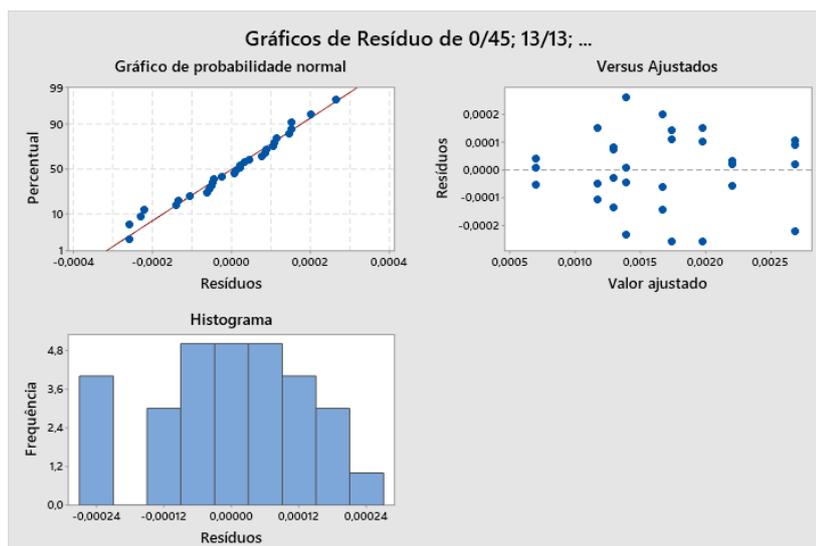


Figura 105. Gráficos de resíduos para os testes de ANOVA One Way e normalidade dos dados de porosidade aparente.

A ANOVA do modelo de superfície de resposta, para a resposta porosidade aparente é apresentada na Tabela 26. Foi identificado que o modelo obteve significância estatística (Valor-P inferior a 0,05), sendo adequado para investigar a influência dos parâmetros de orientações na porosidade aparente. Neste modelo, todas as variáveis estudadas obtiveram significância estatística nos modelos linear e quadrado, validando que a orientação de impressão afetou a porosidade nas amostras de PP impressas por MJF. Ainda é observada uma forte interação entre os dois ângulos, validando o que foi observado.

Tabela 26. Análise de variância da porosidade aparente.

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Modelo | 5 | 0,035364 | 0,007073 | 26,39 | 0,000 |
| Linear | 2 | 0,032356 | 0,016178 | 60,36 | 0,000 |
| XY | 1 | 0,019282 | 0,019282 | 71,94 | 0,000 |
| XZ | 1 | 0,024534 | 0,024534 | 91,54 | 0,000 |
| Quadrado | 2 | 0,012156 | 0,006078 | 22,68 | 0,001 |
| XY*XY | 1 | 0,006690 | 0,006690 | 24,96 | 0,002 |
| XZ*XZ | 1 | 0,006983 | 0,006983 | 26,05 | 0,001 |
| Interação com 2 Fatores | 1 | 0,016811 | 0,016811 | 62,72 | 0,000 |
| XY*XZ | 1 | 0,016811 | 0,016811 | 62,72 | 0,000 |
| Erro | 7 | 0,001876 | 0,000268 | | |
| Falta de ajuste | 3 | 0,001876 | 0,000625 | * | * |
| Erro puro | 4 | 0,000000 | 0,000000 | * | * |
| Total | 12 | 0,037240 | | | |

A partir da validação estatística do modelo, é possível analisar a influência da orientação na porosidade aparente através dos gráficos de efeitos padronizados e de superfície de resposta apresentados nas Figura 106 e Figura 107 respectivamente. Pelo gráfico de Pareto de efeitos padronizados é possível identificar que realmente o ângulo em relação ao plano XZ é o fator de

maior influência na porosidade das amostras de PP impressas via MJF, contudo há uma interação significativa entre os dois ângulos que também afetou esta propriedade. O gráfico de superfície de resposta para porosidade aparente apresenta formas de otimização desta propriedade pela variação dos ângulos de impressão, as condições que apresentam menor porosidade aparentem no modelo analisado são nos extremos de 0° em XY e 90° em XZ ou 90° em XY e 90° em XZ. Ter este fator mapeado é importante pois a porosidade é uma característica que afeta diretamente as propriedades mecânicas. Essa influência nas propriedades mecânicas também foi observada por Lee et al. (2020), O'Connor et al. (2020) e Calignano, Giuffrida e Galati (2021), ao estudarem a impressão por MJF.

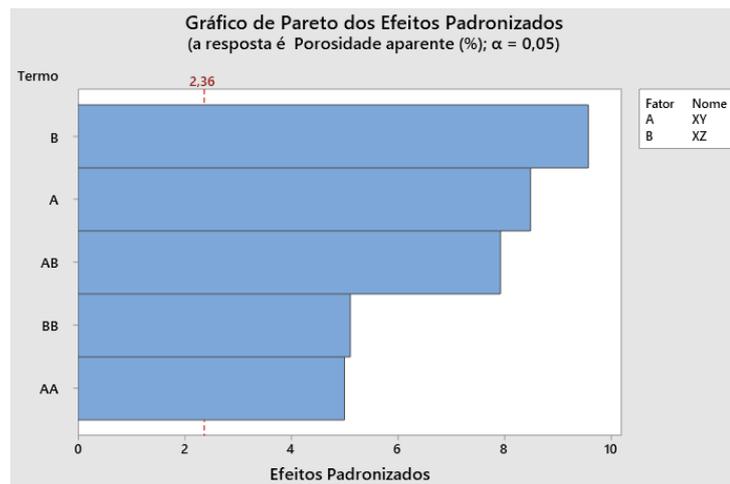


Figura 106. Gráfico normal de efeitos padronizados do modelo de superfície de resposta para a resposta de Alongamento.

Gráfico de Superfície de Porosidade aparente (%) versus XZ; XY

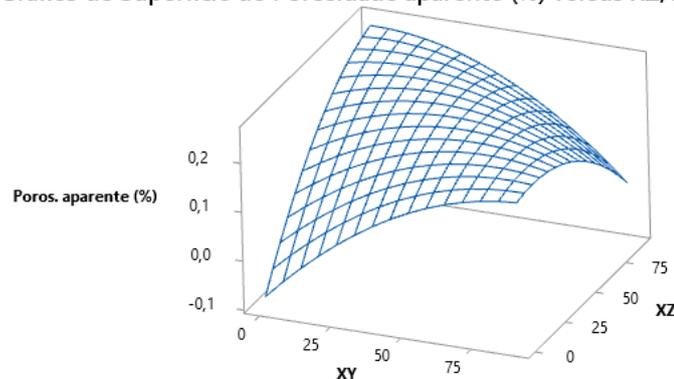


Figura 107. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para o porosidade aparente .

4.4 Ensaio térmico

4.4.1 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) do PP particulado

A curva de DSC para o pó de PP virgem é apresentada na Figura 108. A curva apresenta resultados coerentes para o PP, com pico de fusão em 139,14°C, próximo ao informado no datasheet do material (138°C) e próximo ao encontrado por Šafka et al. (2021) ao avaliar pó de PP para MJF virgem em ensaio de DSC (138°C). Com uma área do pico de fusão de 99,87 J/g, o pó de PP apresentou uma taxa de cristalinidade de 48,01 % (conforme a equação de taxa de cristalinidade), coerente com a cristalinidade de um PP convencional, que pode variar na faixa de 40 a 70% (CANEVAROLO, 2004).

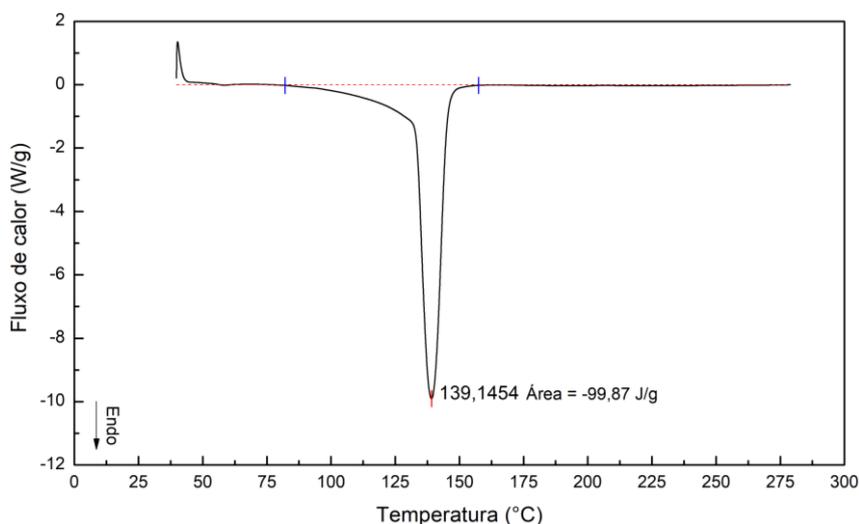


Figura 108. Gráfico de DSC para teste com pó virgem do PP para MJF.

4.4.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) das amostras de PP impressas

Através dos ensaios de DSC foi possível obter as curvas de Fluxo de calor x Temperatura das amostras das orientações selecionadas, bem como obter a entalpia de fusão pelo cálculo da área do pico de fusão. As curvas geradas por todas as amostras de PP impressas em MJF apresentam uma linha base não uniforme (não totalmente horizontal) e precisaram passar por um processo de ajuste com base na Linha zero e no “lag térmico”. Segundo Höhne et al. (2003) a linha de base é a parte da curva de fluxo de calor produzida pelo DSC e reações ou transições na amostra podem levar a esse tipo de ocorrência, visto que a linha de base é a soma da linha zero e a taxa de fluxo de calor causada pela diferença de capacidades de calor na amostra e na referência. Variações na linha base podem ocorrer devido a variação na capacidade

térmica da amostra, massa e forma das amostras, transições de 2ª ordem, condutividade térmica da amostra, empacotamento da amostra, expansão ou contração da amostra, taxa de aquecimento e reações na amostra (CANEVAROLO, 2004; HÖHNE et al., 2003). É plausível considerar que alguns destes fatores podem ter afetado as linhas base obtidas, visto que as amostras não são compostas por material polimérico puro, já que o PP processado por MJF contém substâncias dos agentes de fusão e de detalhamento. Scherer et al. (2020) identificaram na composição dos agentes de fusão e de detalhamento surfactantes e solventes orgânicos, água, negro de fumo, 2-metil-1,2-tiazol-3-ona (2-metil 4-isotiazolin-3-ona) e 1,2-benzotiazol-3-ona (3-benzi sotiazolinona) que são biocidas e UV-ativos, além de 3,7% de 2-pirrolidona e 11,1% de trietilenoglicol no agente de detalhamento e 18,7% de 2-pirrolidona e 8,4% de trietilenoglicol no agente de fusão. Estes aditivos presentes nos agentes têm funções de regulação da viscosidade, controle térmico e redução da degradação das peças (SCHERER et al. 2020).

As Figura 109, Figura 110 e Figura 111 apresentam as curvas de DSC obtidas para as amostras com ângulo XZ fixo em 45° e ângulo XY (em relação ao plano horizontal) variando entre 0°, 45° e 90° (peça “deitada”, em diagonal e “em pé” respectivamente). Estas figuras possuem visões laterais de cada orientação, com indicações das direções de deposição de camadas e de movimento das lâmpadas de radiação infravermelha (a deposição de energia se dá de forma perpendicular ao movimento das lâmpadas). Já as Figura 112, Figura 113 e Figura 114 apresentam as curvas de DSC obtidas para as amostras com ângulo XY fixo em 45° e ângulo XZ (em relação ao plano vertical) variando entre 0°, 45° e 90°, com imagens de vista superior destas orientações. As marcações “1” e “2” se referem ao local de onde as amostras de DSC foram retiradas. As curvas apresentadas consideram apenas o aquecimento das amostras, com direção endotérmica negativa e mostram os picos de fusão, bem como a área da integral dos picos em J/g. Os resultados indicam que tanto pico de fusão quanto a entalpia sofrem variações ao se comparar as orientações ou ao se comparar as extremidades de uma mesma peça. Os picos de fusão obtidos se encontram na faixa de 140 a 147°C, valores coerentes para o PP que pode variar entre 112 até 160°C (CANEVAROLO, 2004). Contudo estes valores são um pouco maiores do que o PP em pó de antes da impressão, de 1,34 até 5,18 % maiores.

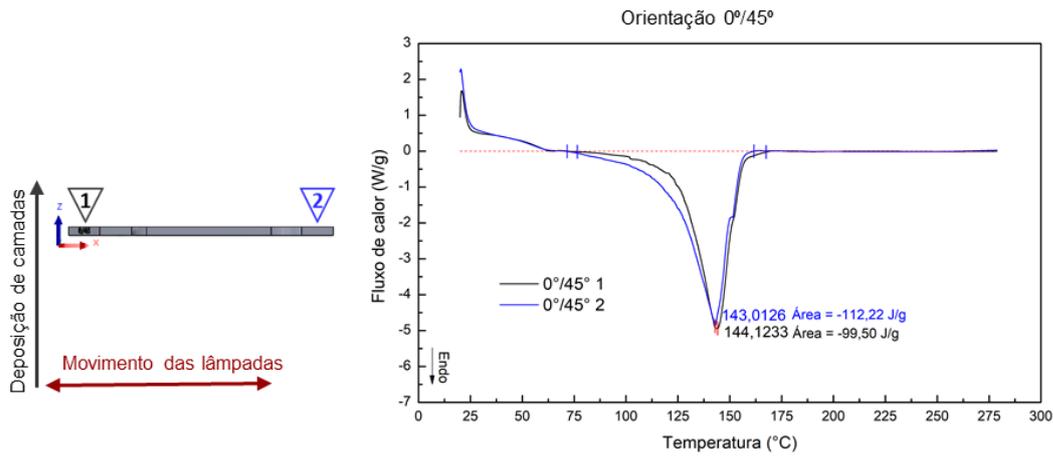


Figura 109. Gráfico de DSC para teste com as duas extremidades da amostra de tração a 0°/45°, com vista lateral da peça e direções de deposição de camadas e de movimento das lâmpadas de radiação infravermelha.

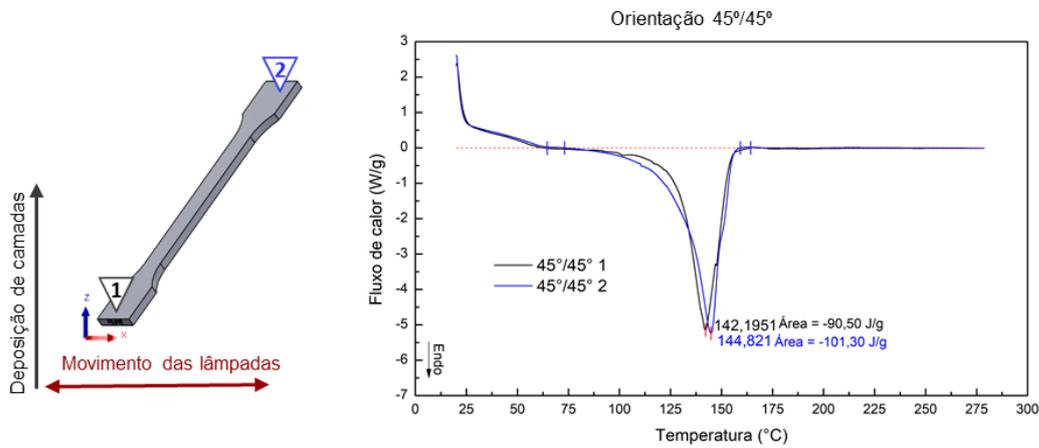


Figura 110. Gráfico de DSC para teste com as duas extremidades da amostra de tração a 45°/45°, com vista lateral da peça e direções de deposição de camadas e de movimento das lâmpadas de radiação infravermelha.

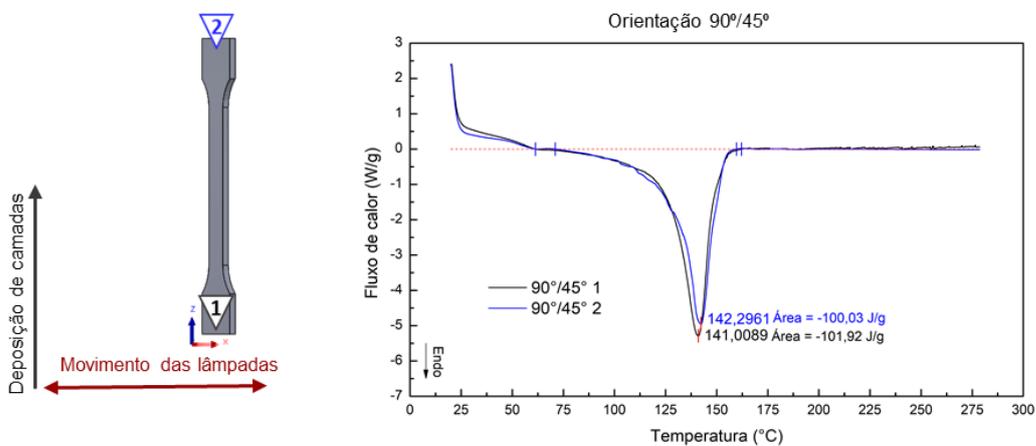


Figura 111. Gráfico de DSC para teste com as duas extremidades da amostra de tração a 90°/45°, com vista lateral da peça e direções de deposição de camadas e de movimento das lâmpadas de radiação infravermelha.

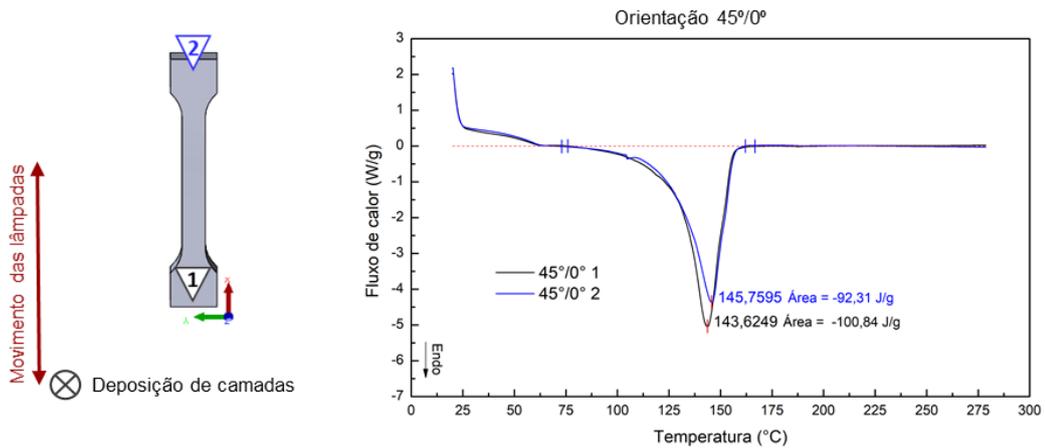


Figura 112. Gráfico de DSC para teste com as duas extremidades da amostra de tração a $45^\circ/0^\circ$, com vista superior da peça e direções de deposição de camadas e de movimento das lâmpadas de radiação infravermelha.

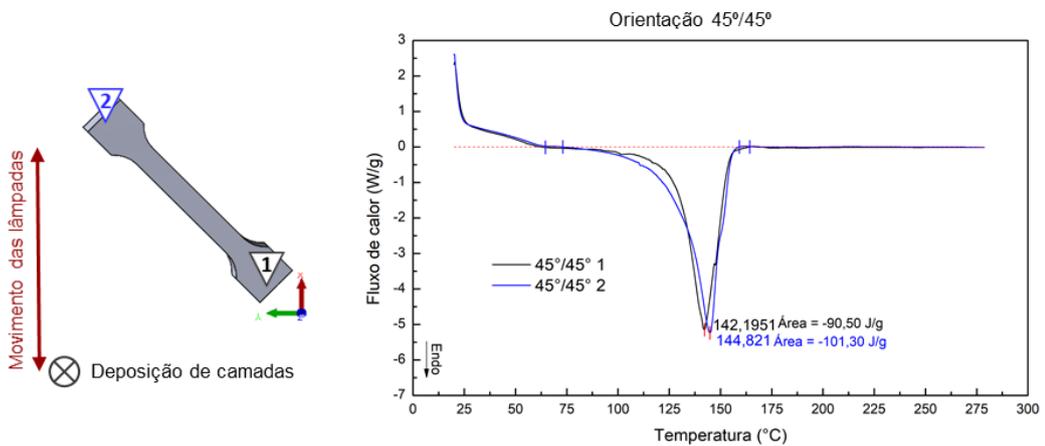


Figura 113. Gráfico de DSC para teste com as duas extremidades da amostra de tração a $45^\circ/45^\circ$, com vista superior da peça e direções de deposição de camadas e de movimento das lâmpadas de radiação infravermelha.

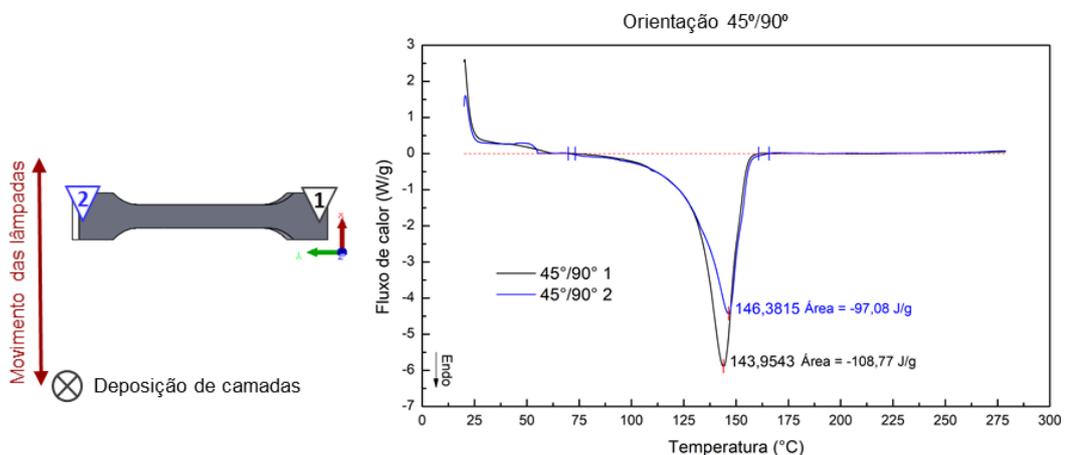


Figura 114. Gráfico de DSC para teste com as duas extremidades da amostra de tração a $45^\circ/90^\circ$, com vista superior da peça e direções de deposição de camadas e de movimento das lâmpadas de radiação infravermelha.

A Figura 115 apresenta os resultados de taxa de cristalinidade em % calculadas a partir da integração das áreas dos picos de fusão nas curvas de DSC, com os resultados para apenas

as amostras com variações de ângulos em relação ao plano horizontal (XY) com as visões laterais das peças avaliadas. As taxas de cristalinidade variaram de 43 a 54 %, uma faixa coerente para o PP, como para o que foi aferido com o pó de PP não processado. É possível observar em ambos lados das amostras um comportamento parecido, onde há uma queda da cristalinidade da peça em horizontal para a peça em diagonal seguida por um aumento da cristalinidade na peça em vertical, contudo a faixa de cristalinidade se manteve similar para estas orientações. Entretanto, a diferença entre valores de taxa de cristalinidade reduziu à medida que o ângulo em relação ao plano XY foi aumentado. A amostra posicionada na horizontal apresentou uma diferença de 6,12 na taxa de cristalinidade enquanto a amostra posicionada na vertical apresentou uma diferença de 0,91 na taxa de cristalinidade. Essa diferença pode ser associada ao resfriamento não uniforme ao longo das amostras a medida que são impressas, gerando diferentes taxas de resfriamento, como a peça na horizontal possui uma área transversal muito superior à da peça na vertical, tende a acumular mais calor a medida que a energia infravermelha é aplicada nas camadas, como comentado no tópico 4.2.1. A Figura 116 apresenta um esquema onde esse efeito pode ser visualizado. Considerando uma peça de grande área transversal, mais energia será depositada nesta camada ao longo do movimento das lâmpadas de radiação infravermelha, gerando um maior gradiente térmico, assim, uma extremidade da peça resfriará mais lentamente, justificando a grande diferença de cristalinidade entre uma extremidade e outra. O mesmo raciocínio pode ser considerado para peças com mesma área transversal, mas com comprimentos diferentes percorridos pela deposição de energia infravermelha, como demonstrado na Figura 117.

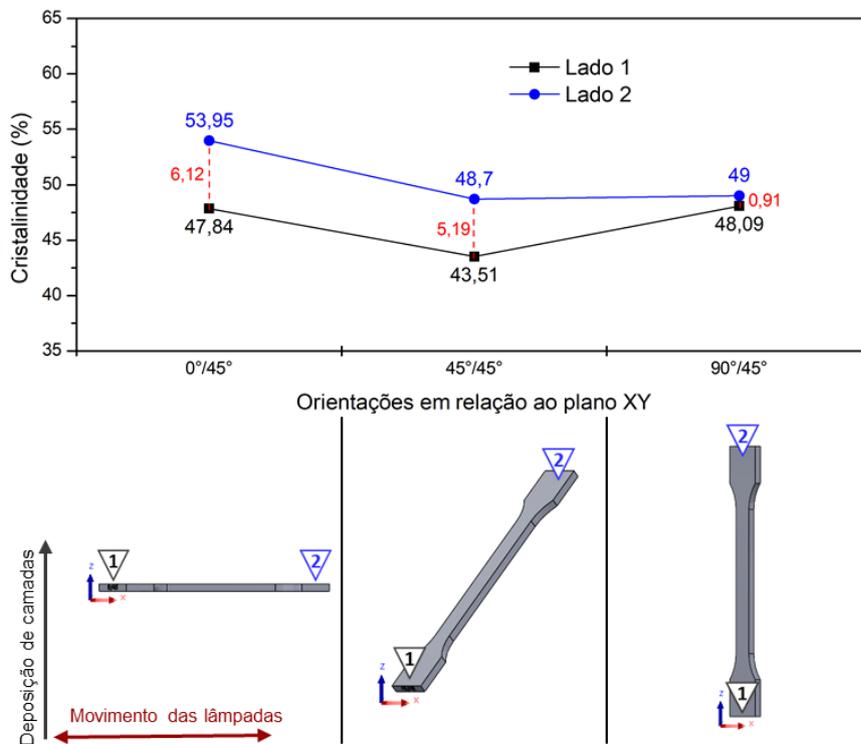


Figura 115. Resultados de Taxa de cristalinidade para as amostras variando o ângulo em relação ao plano XY.

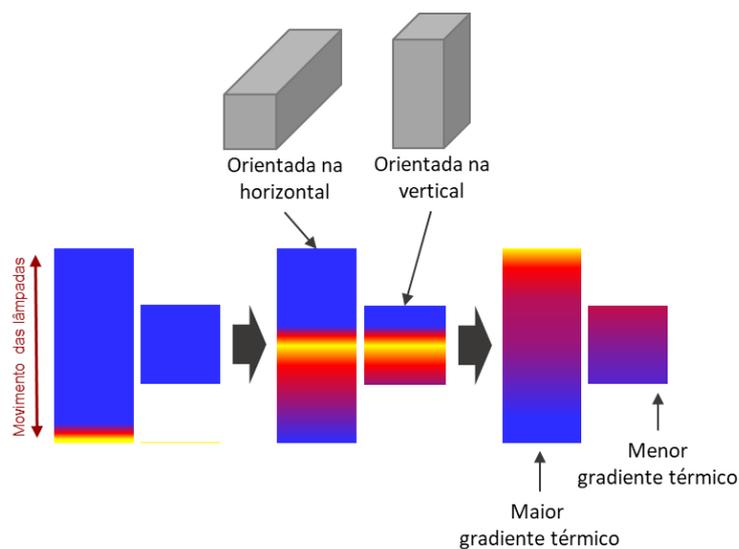


Figura 116. Diferença no gradiente térmico em relação a área afetada pelo movimento de deposição de energia infravermelha, para peças com áreas transversais diferentes.

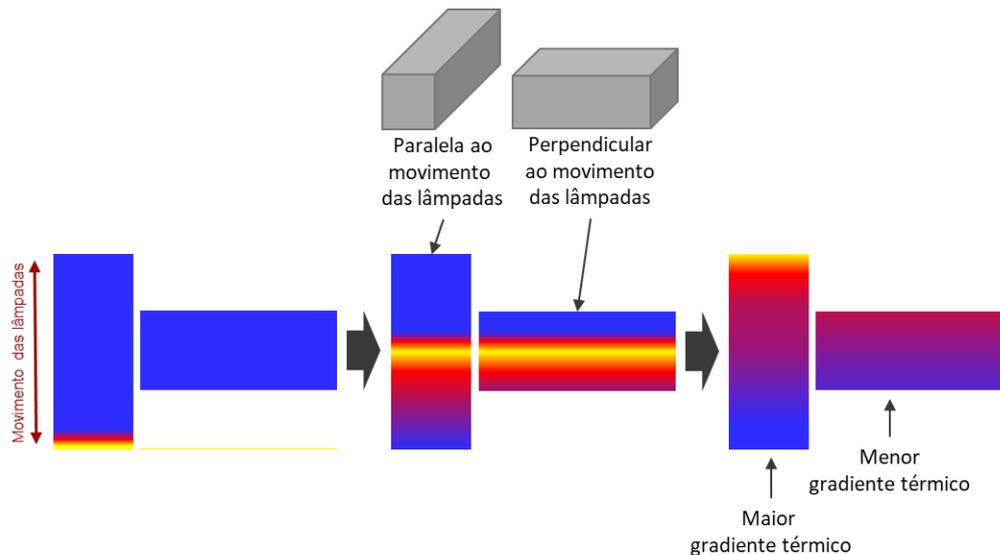


Figura 117. Diferença no gradiente térmico em relação a área afetada pelo movimento de deposição de energia infravermelha, para peças com áreas transversais iguais, mas orientadas de forma diferente.

As Figura 118 apresenta os resultados de taxa de cristalinidade em % calculadas a partir da integração das áreas dos picos de fusão nas curvas de DSC, com os resultados para as amostras com variações de ângulos em relação ao plano vertical (XZ) com visões superiores das peças avaliadas. As taxas de cristalinidade variaram de 43 a 53 %, correspondendo a uma faixa similar para as peças com variações de orientação no plano XY. Para estas orientações, foi observado um comportamento de aumento da diferença de cristalinidade a medida que o ângulo em relação ao plano XZ aumenta. Como estas amostras possuem mesma área transversal, diferente do caso anterior, pode-se considerar que esta variação esteja associada também ao posicionamento das peças na cuba de impressão, visto que esse fator pode também gerar variações no resfriamento das peças, como foi observado e comprovado por Chen et al. (2022) ao testar o PA12 diferentes posições ao longo da cuba de MJF, para uma mesma amostra orientada em uma mesma direção. Chen et al. (2022) identificou que peças próximas as extremidades da cuba podem sofrer resfriamento mais rápido, tendo observado diferenças na taxa de cristalinidade total das peças bem como em propriedades mecânicas. Este fato pode indicar que seja necessário realizar investigações mais aprofundadas associando diferenças nas propriedades das peças geradas pela interação entre orientação de impressão e posicionamento na cuba.

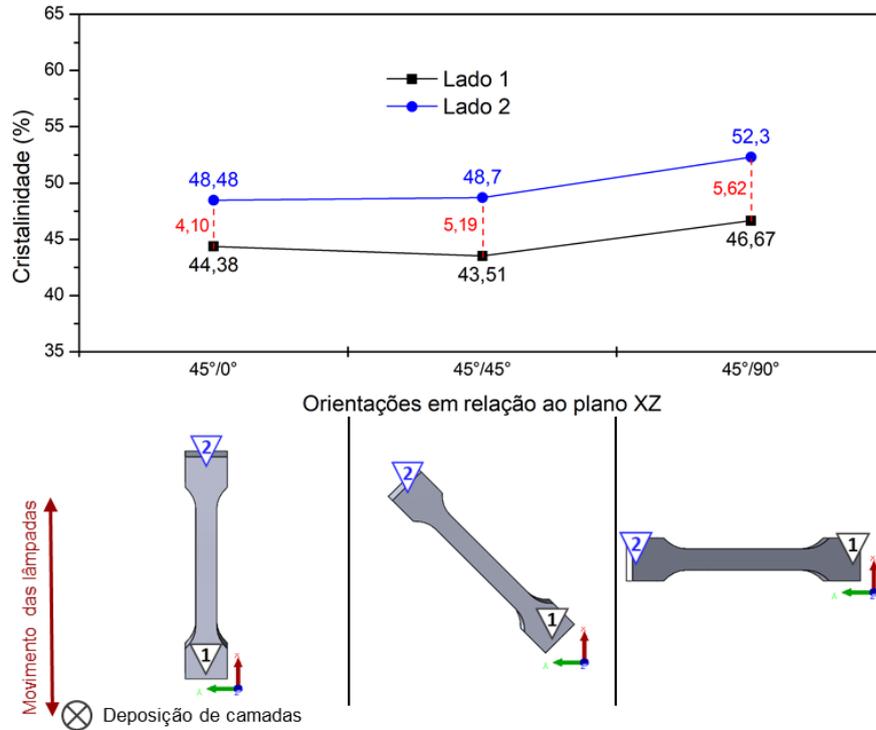


Figura 118. Resultados de Taxa de cristalinidade para as amostras variando o ângulo em relação ao plano XZ.

A Figura 119 apresenta a compilação das médias das medições de cada orientação testada para taxa de cristalinidade e temperatura de fusão, bem como para o pó de PP anterior ao processamento como referência. Considerando as médias entre os valores das extremidades das amostras a cristalinidade das peças se encontra em faixas similares e o mesmo vale para a temperatura de fusão. Com isso é possível sugerir que embora uma variação a depender do gradiente térmico e das áreas transversais das peças, no geral as orientações não geram grandes variações, ou seja, sem anisotropia significativa em relação a estas propriedades.

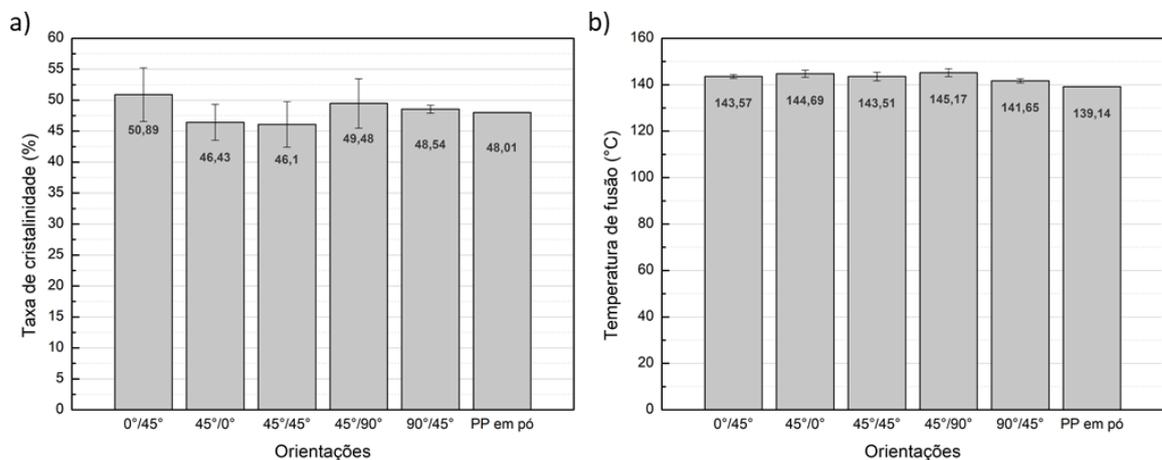


Figura 119. Gráficos para médias de a) Taxa de cristalinidade das orientações testadas e b) Temperatura de fusão das orientações testadas.

4.5 Análises morfológicas

4.5.1 Micrografias das fraturas de tração.

As faces fraturadas das amostras de tração após os ensaios são apresentadas nas Figura 120, Figura 121, Figura 122, Figura 123 e Figura 124, para as amostras de orientação $0^\circ/45^\circ$, $45^\circ/0^\circ$, $45^\circ/45^\circ$, $45^\circ/90^\circ$ e $90^\circ/45^\circ$ respectivamente. As imagens revelam características morfológicas como efeitos de capilaridade e distorções e presença de porosidade que são discutidos mais a seguir. É importante considerar que as distorções de formas nestas amostras podem ter sido influenciadas pela deformação mecânica após os testes de tração e assim não possível considera-las como completamente resultado da impressão.

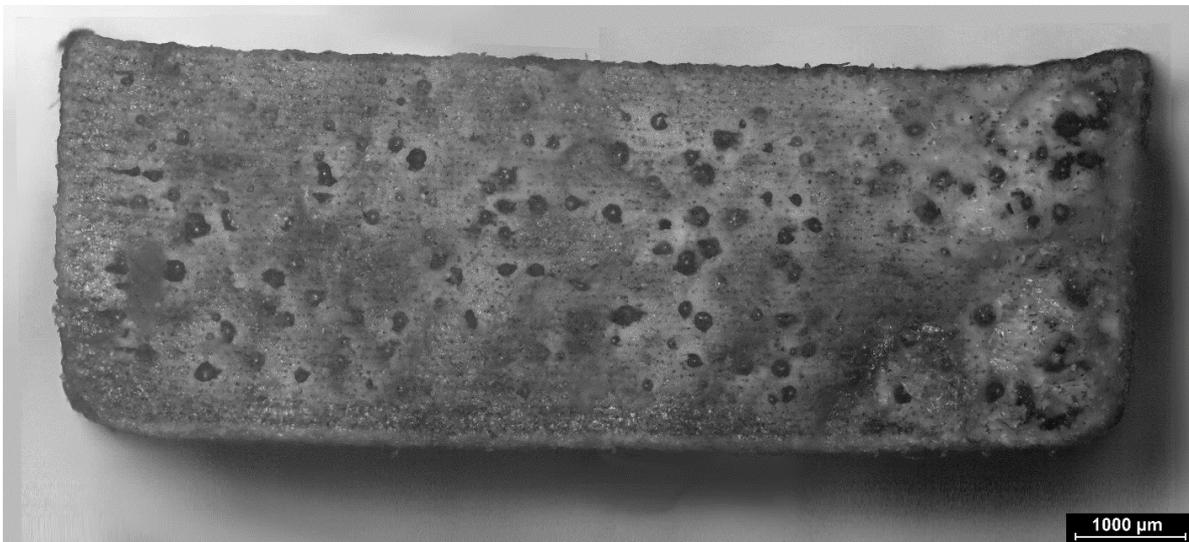


Figura 120. Face da fratura de tração de amostra orientada em $0^\circ/45^\circ$.

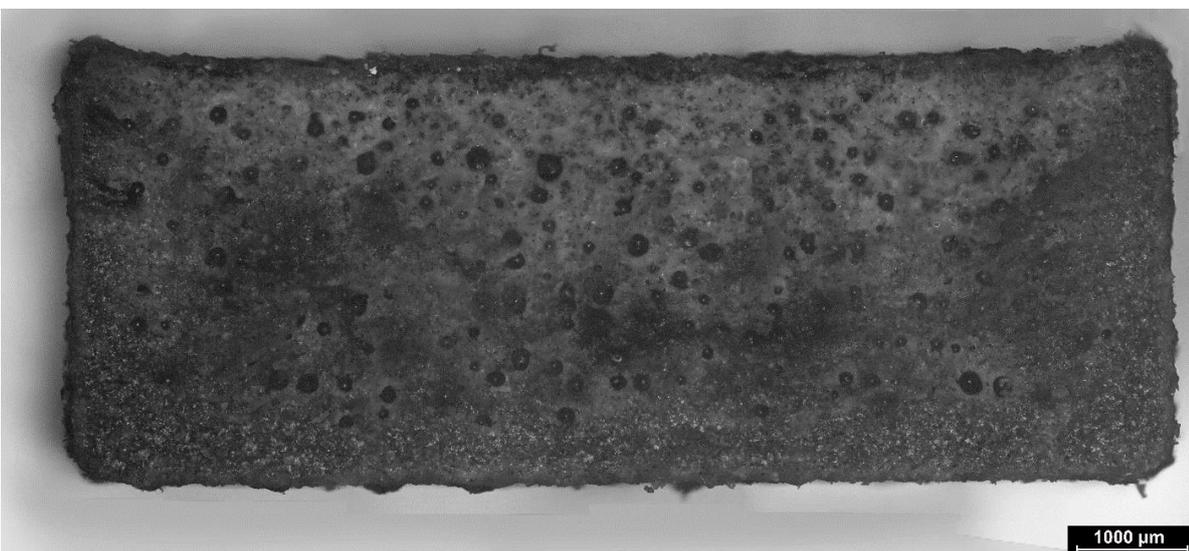


Figura 121. Face da fratura de tração de amostra orientada em $45^\circ/0^\circ$.

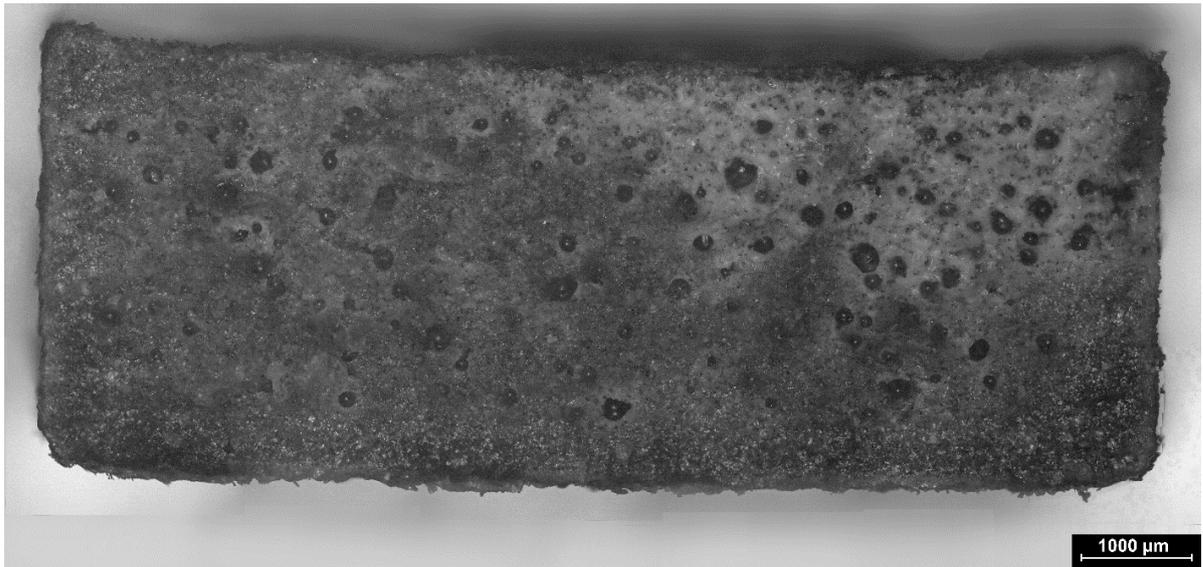


Figura 122. Face da fratura de tração de amostra orientada em $45^\circ/45^\circ$.

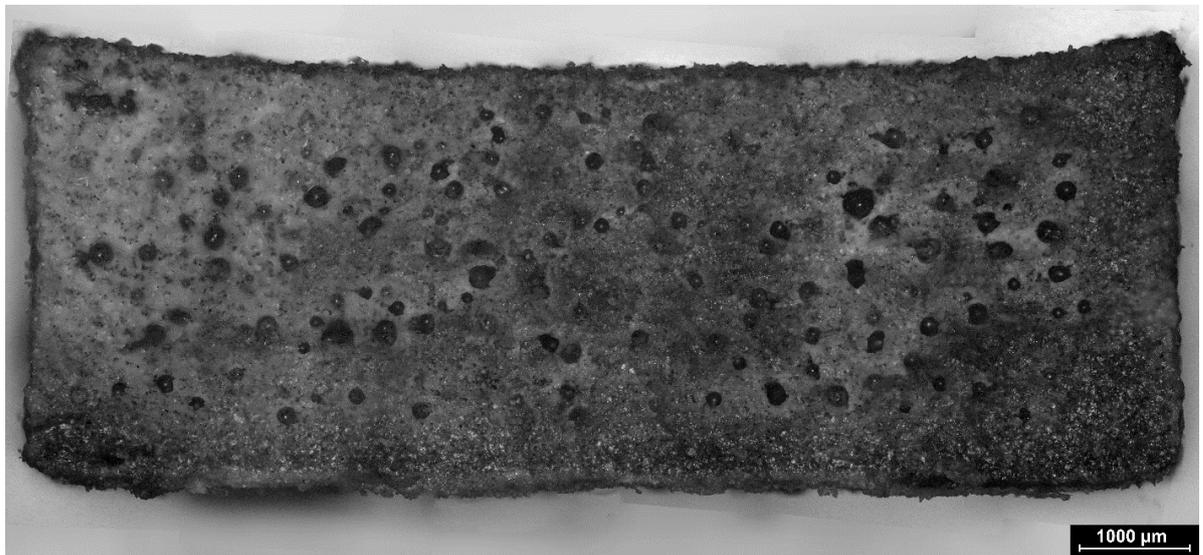


Figura 123. Face da fratura de tração de amostra orientada em $45^\circ/90^\circ$.

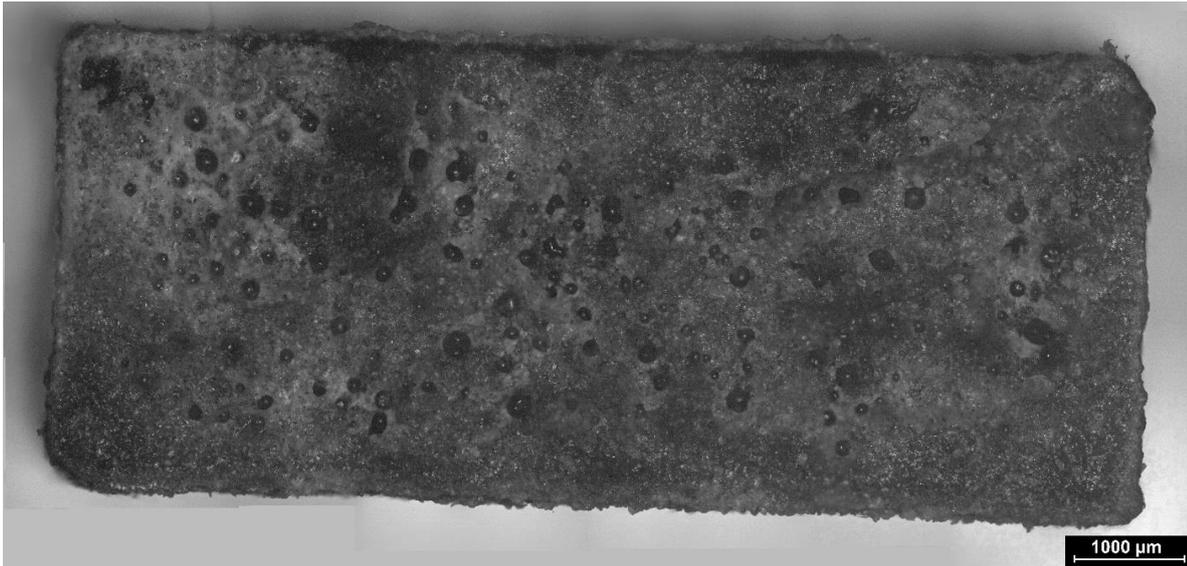


Figura 124. Face da fratura de tração de amostra orientada em 90°/45°.

Pelas superfícies transversais é possível visualizar que o efeito de capilaridade ocorreu para todas as amostras, com exceção da orientação 90°/45° (peça orientada completamente na vertical). O efeito de capilaridade é um fenômeno que pode ocorrer no processo de MJF devido ao acúmulo térmico em camadas com grandes planos horizontais voltados para cima. Este efeito é resultado da interação entre os agentes de fusão e de detalhamento do processo MJF e a camada de material particulado, que ao se fundir se comporta como um fluido e tende a contrair na região central a medida que a camada resfria, gerando arestas vivas no perímetro da camada fundida, como demonstrado no esquema da Figura 125 (MELE et al., 2021). Como explicam Mele et al. (2019), em condições onde a área de contorno é grande em comparação com o volume da peça, a presença de surfactantes nos agentes de fusão e de detalhamento podem levar a uma modificação das condições de umidade nas proximidades do contorno da peça gerando uma eventual distorção da camada fundida pela radiação infravermelha. Esta distorção localizada leva ao desvio das bordas superiores da peça. Em geral recomenda-se alterar as orientações das peças para reduzir grandes áreas superficiais no topo de peça expostas a regiões de acúmulo térmico ou regiões mais frias (extremidades da cuba de impressão) para prevenir esse tipo de efeito (HP, 2020).

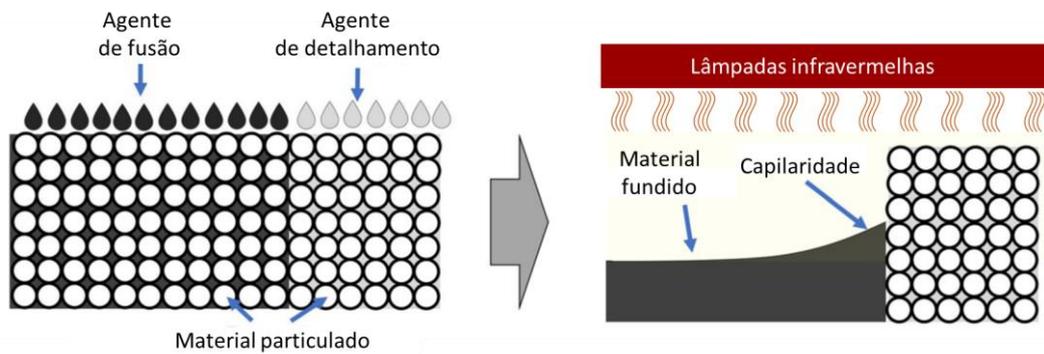


Figura 125. Esquema demonstrando como ocorre o efeito de capilaridade nas peças impressas por MJF, adaptado de Mele et al. (2021)

Nas imagens das superfícies fraturadas é possível ainda identificar outro fator bastante presente, a presença de poros ou cavidades deformadas durante a aplicação da força. Poros são comuns em materiais manufaturados aditivamente e são diretamente associados com a resposta mecânica dos mesmos. A região de falha das amostras pode estar associada ao fato de sejam regiões de maior concentração de poros e conseqüentemente de maior acumulo de tensões, o que tornariam esta região ter uma tendência maior a fraturar durante a aplicação de tração. Em todos os casos nenhuma porosidade foi identificada nas regiões superficiais das amostras, comportamento próprio e comum do processo MJF, também identificado em outros estudos com outros materiais processados por MJF como nos estudos de Lee et al. (2020), Guo et al. (2020) e Pandelidi et al. (2021). Contudo, estas imagens podem não ser significativamente representativas para uma análise aprofundada geral de porosidade das orientações testadas pois podem ter sofrido influências da tensão e da deformação aplicadas nos testes de tração.

4.5.1 Micrografias das superfícies externas e internas.

As micrografias das superfícies externas superiores e internas das faces fraturadas após testes de tração são apresentadas nas Figura 126, Figura 127, Figura 128, Figura 129, Figura 130, Figura 131, Figura 132, Figura 133, Figura 134, para as amostras orientadas a $0^\circ/45^\circ$, $13^\circ/13^\circ$, $13^\circ/77^\circ$, $45^\circ/0^\circ$, $45^\circ/45^\circ$, $45^\circ/90^\circ$, $77^\circ/13^\circ$, $77^\circ/77^\circ$ e $90^\circ/45^\circ$ respectivamente. As micrografias permitem visualizar com maiores detalhes as influências do mecanismo de deposição de material e impressão do MJF na estrutura das peças impressas em PP. Pela análise das imagens das superfícies externas superiores é possível visualizar o “efeito escada” nas amostras com baixos ângulos em relação ao plano horizontal XY, para as orientações $13^\circ/13^\circ$, $13^\circ/77^\circ$, $45^\circ/0^\circ$ e $45^\circ/45^\circ$ mais precisamente, com maior intensidade nas orientações $13^\circ/13^\circ$ e

13°/77°. Este efeito é associado a deposição em camadas, característica própria da MA e presente em muitos processos de MA, que resulta em uma superfície com perfil similar a camadas Mele et al. (2020). Nas imagens este efeito pode ser pelas faixas cruzando a superfícies externa das amostras. Outros autores também identificaram estas características, como Nazir et al. (2019) e Yelamanchi et al. (2021), que associam as faixas mais escuras as regiões entre camadas onde é feita a deposição do agente de fusão durante a impressão por MJF. As superfícies externas possuem um perfil rugoso composto pela mesclagem de regiões claras e escuras. No processo de MJF as camadas externas são cobertas por uma camada de recobrimento branca afetada pelo agente de detalhamento enquanto internamente há a peça em si em preto. Durante o acabamento o recobrimento branco é retirado por processos como jateamento de esferas, tamboreamento (vibroacabamento) e/ou lixamento, mas ainda alguns resíduos deste recobrimento permanecem na superfície das peças impressas em MJF, resultando nesta estética. Contudo outros processos de acabamento poderiam ser aplicados para uma superfície mais uniforme, considerando pós etapas de pintura ou tingimento para promover coloração mais uniforme.

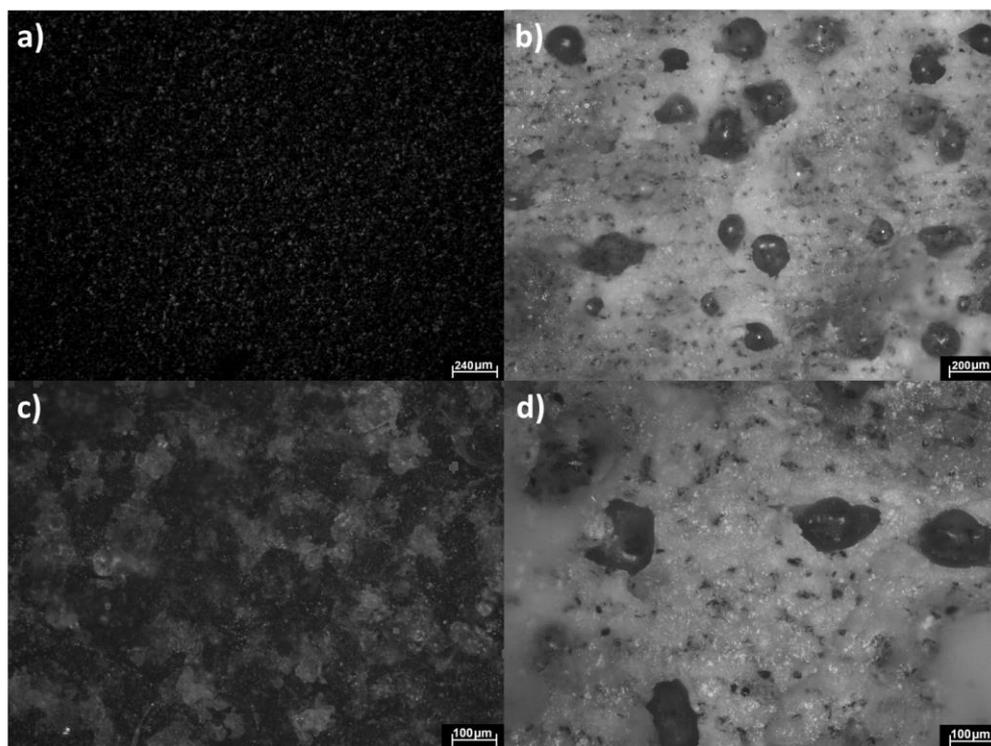


Figura 126. Micrografias de amostra orientada em 0°/45° para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes.

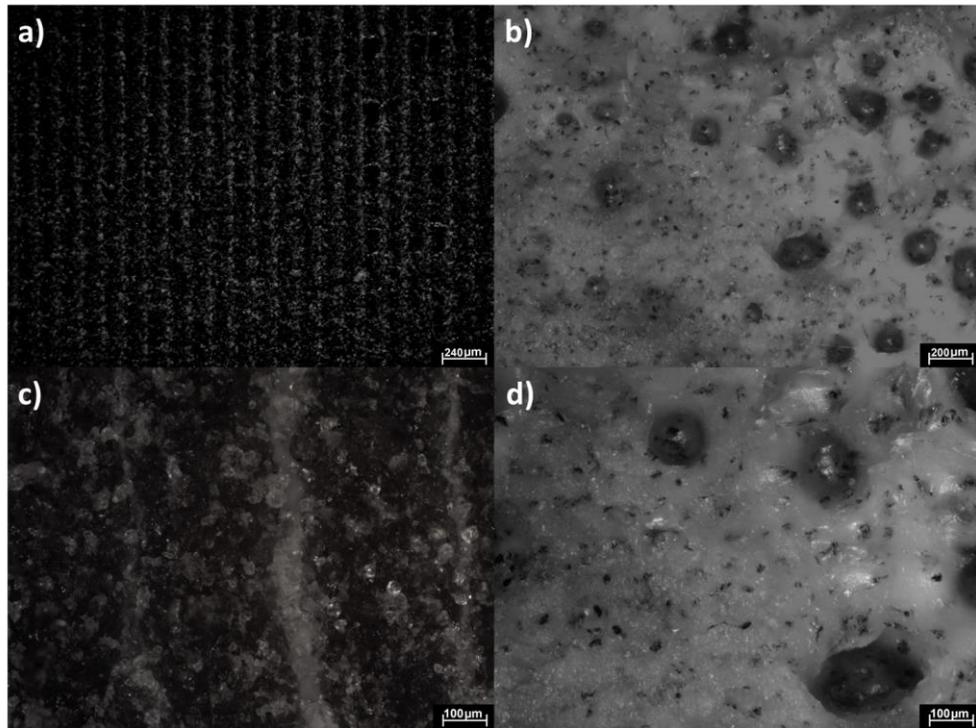


Figura 127. Micrografias de amostra orientada em $13^{\circ}/13^{\circ}$ para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes.

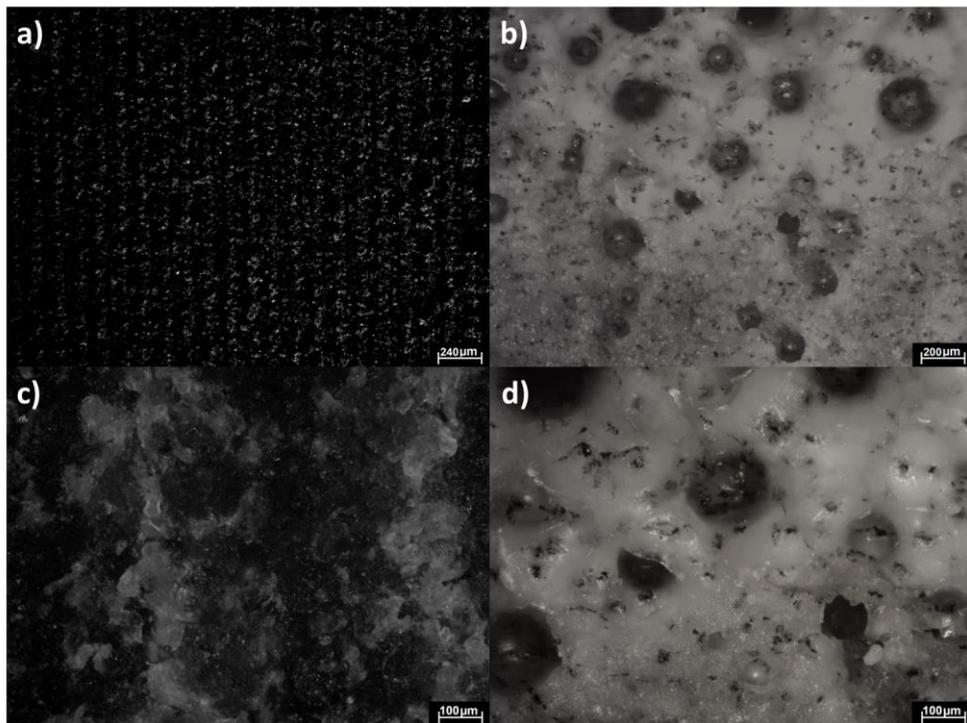


Figura 128. Micrografias de amostra orientada em $13^{\circ}/77^{\circ}$ para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes.

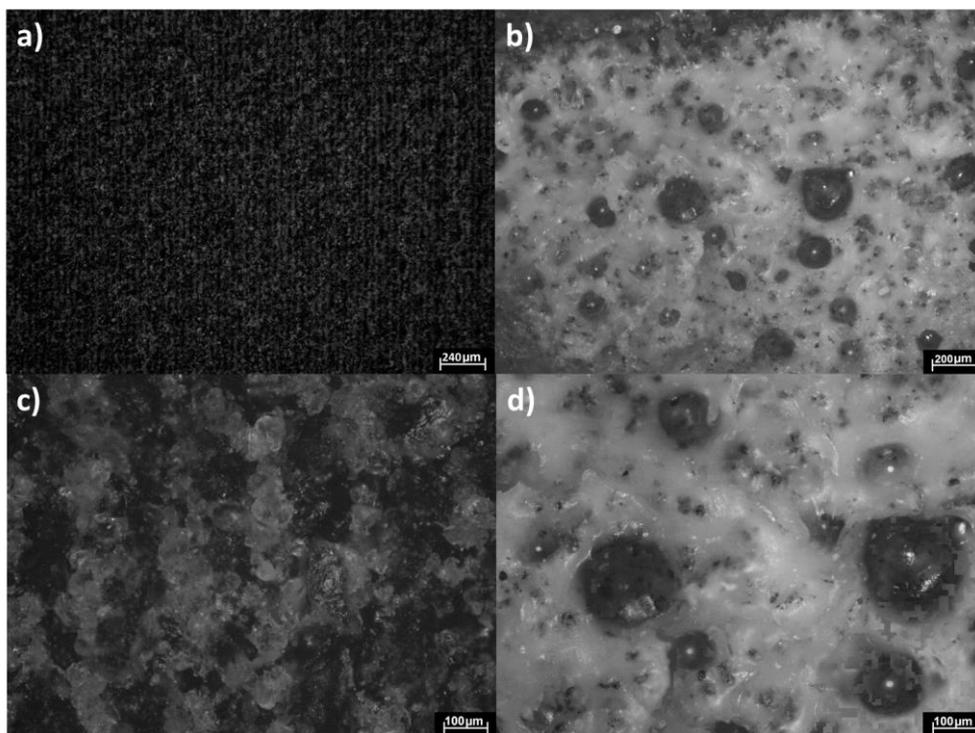


Figura 129. Micrografias de amostra orientada em $45^{\circ}/0^{\circ}$ para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes.

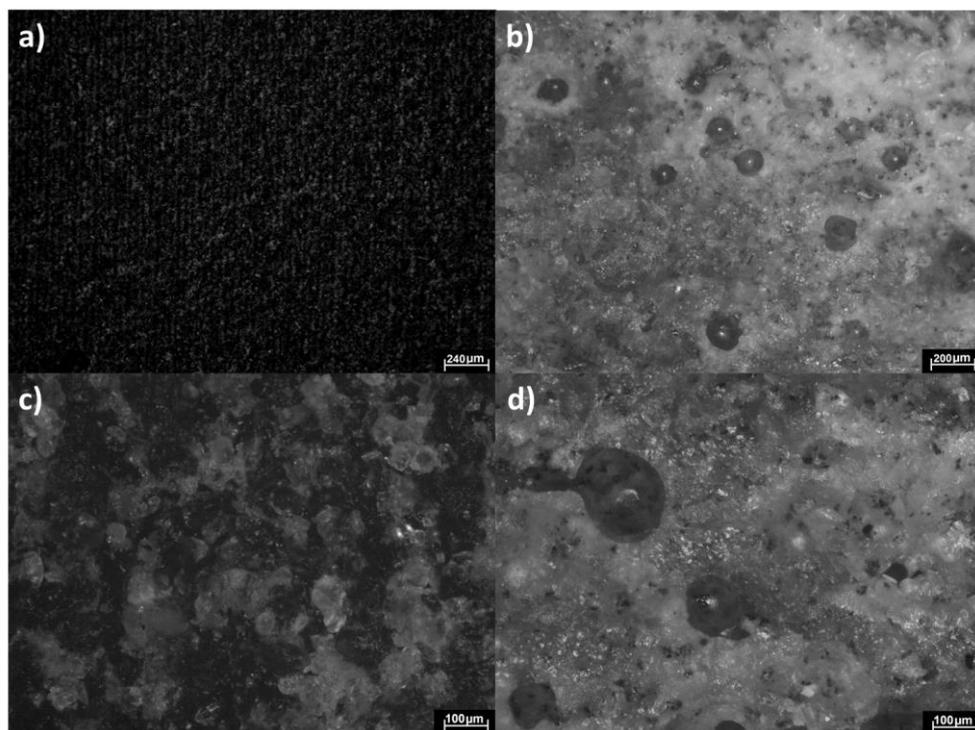


Figura 130. Micrografias de amostra orientada em $45^{\circ}/45^{\circ}$ para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes.

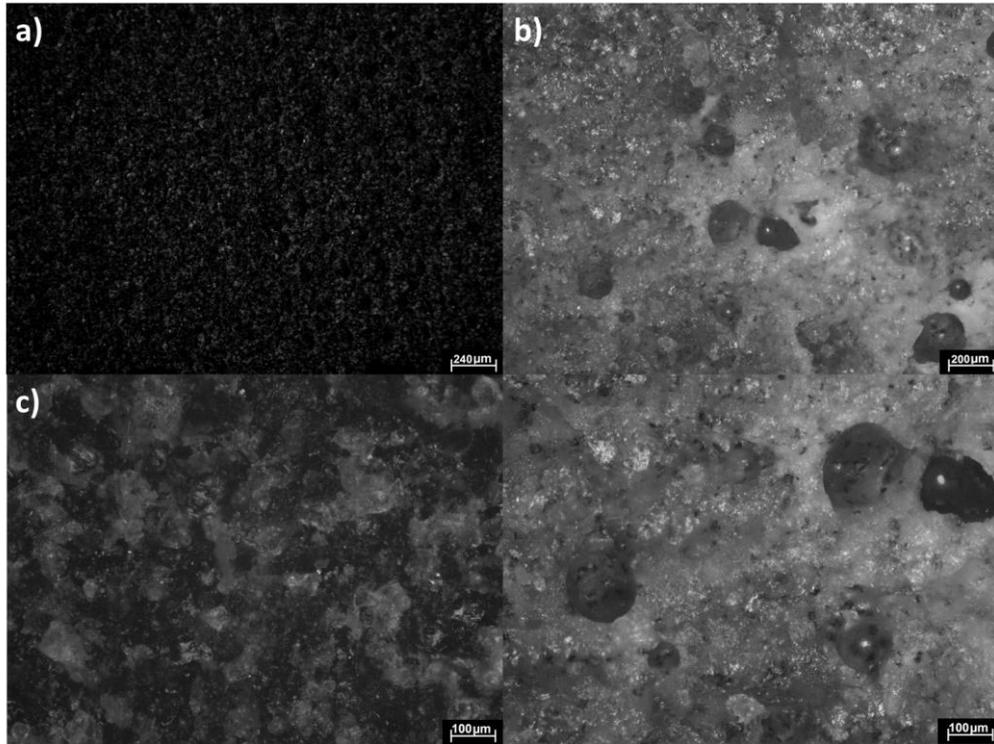


Figura 131. Micrografias de amostra orientada em $45^{\circ}/90^{\circ}$ para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes.

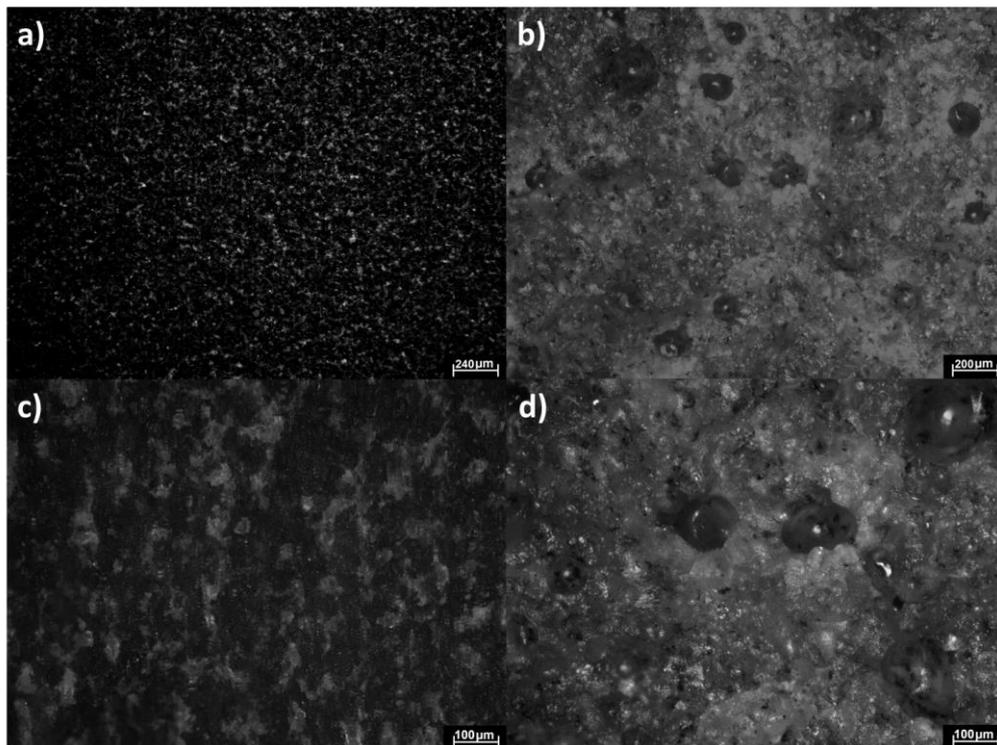


Figura 132. Micrografias de amostra orientada em $77^{\circ}/13^{\circ}$ para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes.

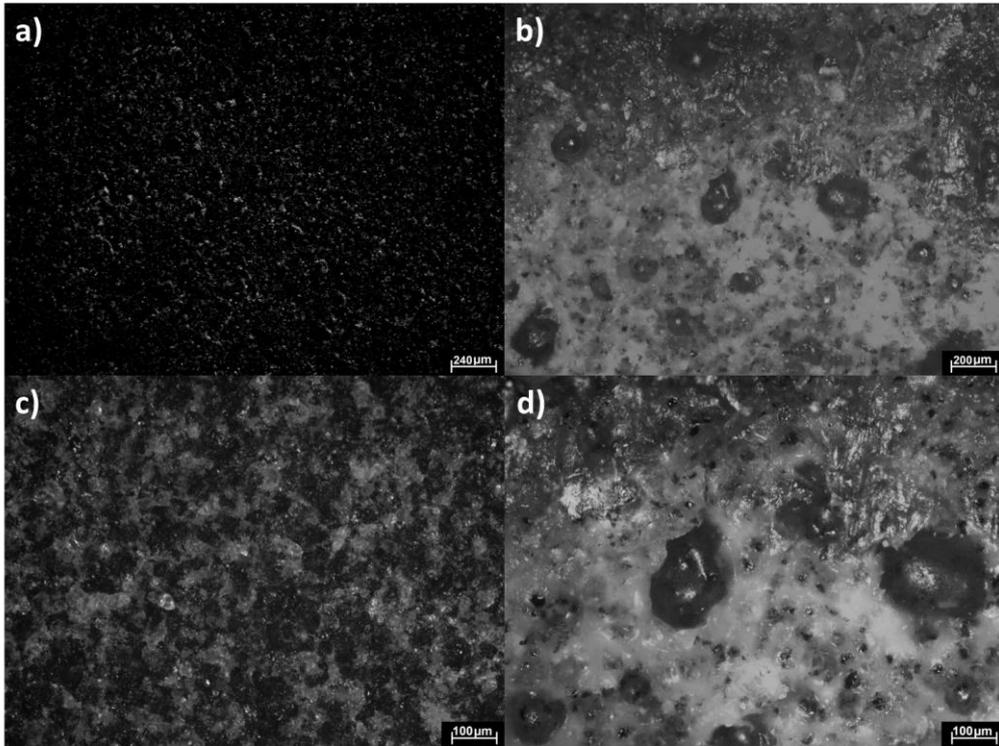


Figura 133. Micrografias de amostra orientada em $77^{\circ}/77^{\circ}$ para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes.

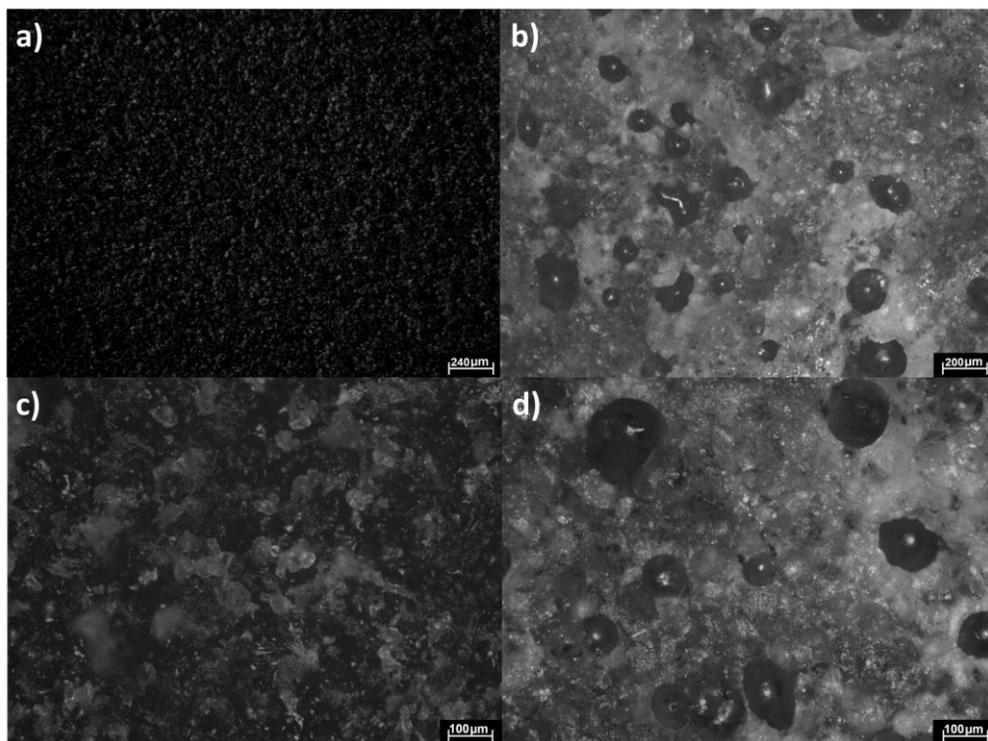


Figura 134. Micrografias de amostra orientada em $90^{\circ}/45^{\circ}$ para a) Superfície externa superior com aproximação de 40 vezes; b) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 50 vezes; c) Superfície externa superior com aproximação de 100 vezes; d) Superfície da face fraturada em tração com aproximação de 100 vezes.

Quanto as superfícies externas, referentes as superfícies na face superior na orientação de cada amostra, o efeito escada observado permite identificar o alinhamento das camadas de impressão. Esse efeito foi observado também por outros autores em estudos realizados com a tecnologia MJF, como os trabalhos de Yelamanchi et al. (2021) e de Nazir e Jeng (2019) quanto para impressão com PA12, conforme demonstrado na Figura 135.

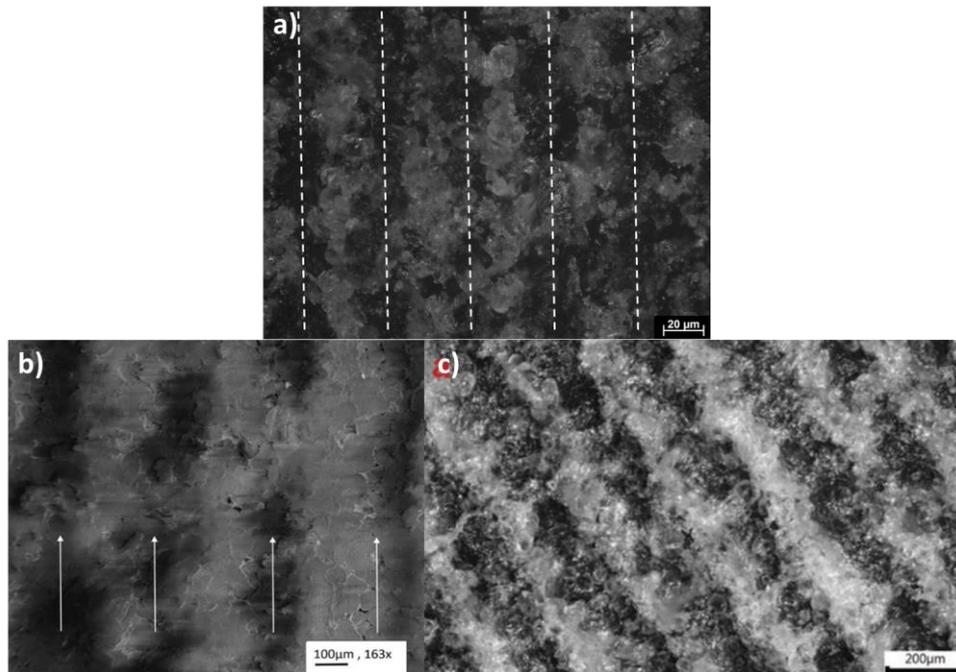


Figura 135. Efeitos de escada observados nas superfetes das peças impressas em MJF para a) o presente trabalho (orientação $45^{\circ}/0^{\circ}$ como exemplo), b) o trabalho de Yelamanchi et al. (2021) e c) o trabalho de Nazir e Jeng (2019).

Quanto as superfícies internas das faces fraturadas nos testes de tração, as peças mais orientadas para a horizontal (com ângulos em relação ao plano horizontal XY de 0° a 45°) possuem uma face fraturada mais suave e clara, permitindo uma visualização mais clara de detalhes como porosidades. A medida que o ângulo em relação ao plano horizontal é aumentado as faces fraturadas apresentam uma aparência mais rugosa e não uniforme, que pode ser associada ao arrancamento das camadas nestas regiões, que são perpendiculares a direção de aplicação da tensão nos ensaios de tração, assim as regiões intercaladas podem estar mais sujeitas a partir durante o teste. Em todas as superfícies das fraturas são visíveis cavidades ou regiões deformadas com diâmetros que variam na faixa de 10 a 200 microns. Estas cavidades podem ser poros ou deformações geradas em regiões com poros ou partículas mal fundidas que resultaram em regiões de concentração de tensões durante o alongamento no teste de tração, como mostrado na Figura 136. Esse comportamento foi demonstrado por simulação por Chen

et al. (2021), ao aplicar uma simulação de tensão de tração axial em um modelo escaneado e digitalizado de uma peça impressa em PA12 por MJF, conforme mostrado na Figura 137. Na Figura 136 ainda é possível verificar a presença de poros intercamadas, também identificados em outros trabalhos sobre impressão em MJF ou em HSS (High speed sintering), processo de mesmo funcionamento, como os trabalhos de Santonocito (2020), de Zu e Majewski (2020) e de Avanzini, Battini e Pandini (2022), para a impressão com PA12.

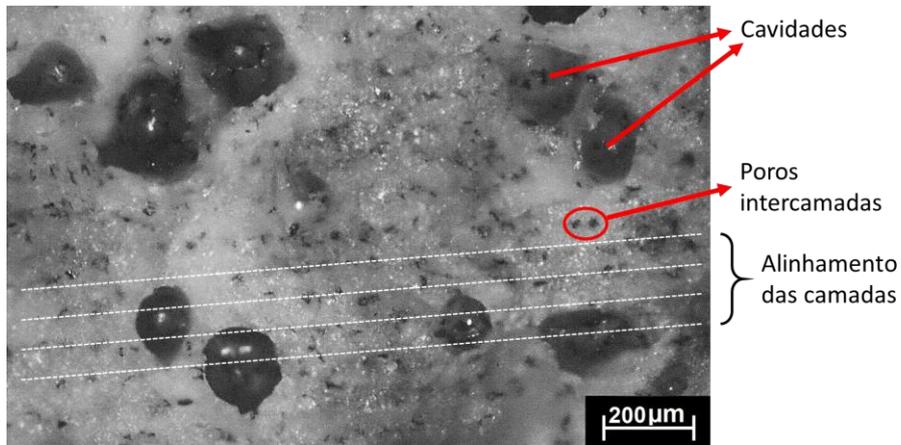


Figura 136. Indicações das cavidades e porosidades presentes nas micrografias analisadas, com a micrografia da amostra orientada em 0°/45° como referência.

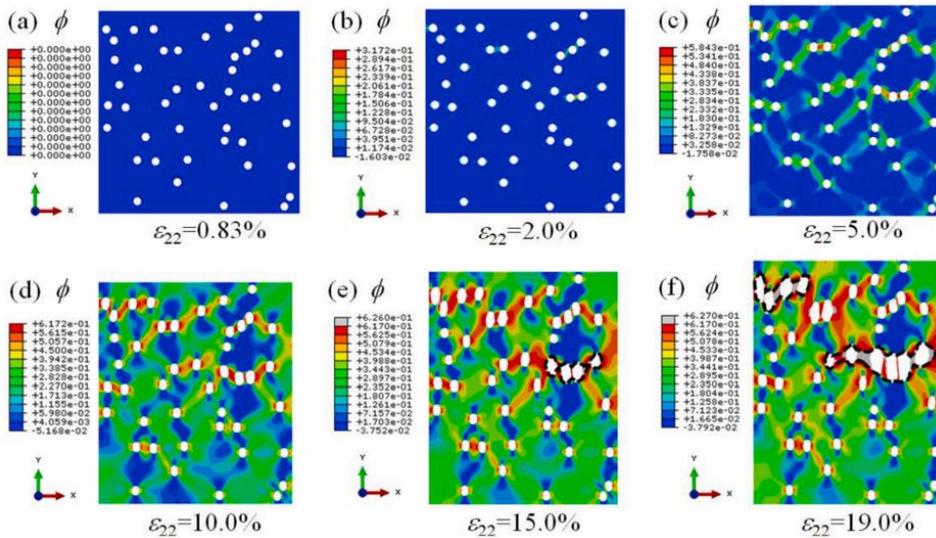


Figura 137. Distribuição de danos por métodos de elementos finitos em diferentes níveis de deformação axial: (a) 0,83%, (b) 2,0%, (c) 5,0%, (d) 10,0%, (e) 15,0% e (f) 19,0%. As regiões marcadas por curvas traço preto atingem o limite de dano. A modelagem dos poros nas peças de PA12 foram obtidas por medições reais de amostras de PA12 por microCT (CHEN et al., 2021).

4.6 Análises do processo por simulação de cubas

4.6.1 Distribuição de camada e análise de risco

A distribuição de camadas trata-se da primeira informação gerada no processo de otimização executado pelo Materialise Magics. Este parâmetro trata da distribuição de área de camada ao longo da altura da cuba de impressão, representado em um gráfico com a área de camada no eixo vertical e a altura da camada no eixo horizontal. As Figura 138, Figura 139 e Figura 140 apresentam os resultados de distribuição de camadas para as cubas com 20, 40 e 60 peças respectivamente, enquanto a Figura 141 apresenta os resultados das Área transversal média para cada cuba simulada, calculadas com base nos dados de distribuição de camadas. Pela análise dos gráficos pode-se identificar que em todas as orientações a distribuição a área transversal das camadas apresenta um pico máxima seguido de uma queda nos limites do topo da cuba. Esse tipo de comportamento é comum, mesmo com o uso de softwares de otimização como o Materialise Magics e está associado ao possível surgimento de alguns defeitos térmicos, pois regiões com grandes áreas superficiais em processos de fusão em leito de pó podem gerar maior acúmulo térmico que afeta o surgimento de problemas como efeito de capilaridade, distorções ou fusão irregular. Outra observação importante feita com os gráficos de distribuição de camadas seria quanto ao posicionamento médio da curva de área transversal ao longo da altura da cuba de impressão, pois uma cuba com área transversal melhor distribuída apresentará valores menores de área transversal em comparação com as outras, que tendem a melhorar a distribuição de calor no volume de impressão, o que pode prevenir a ocorrência de defeitos térmicos. Assim, é possível observar que as orientações que proporcionam maior altura de cuba, conseguem melhor distribuir a área transversal ao longo da cuba, contudo é importante que alturas de cuba maiores podem impactar aumentando o tempo de impressão e o custo de impressão como é avaliado a seguir.

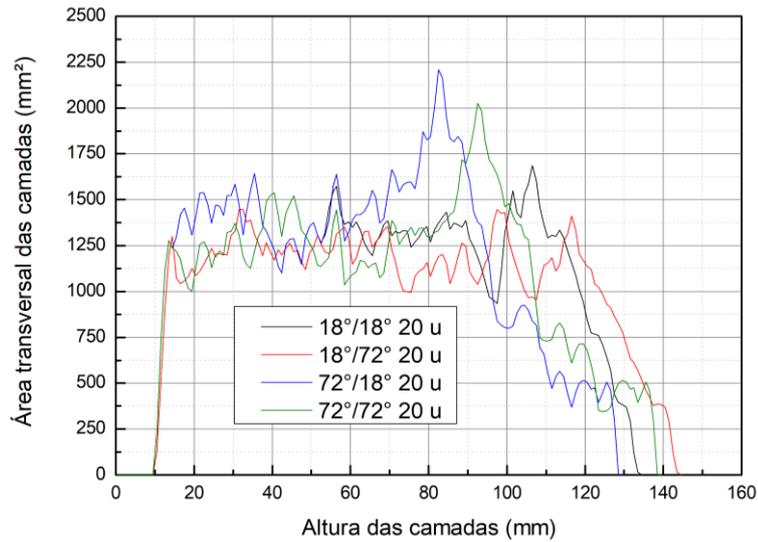


Figura 138. Gráfico de distribuição de camadas (Área transversal das camadas) para as cubas simuladas com 20 peças no modelo experimental de análise de processo.

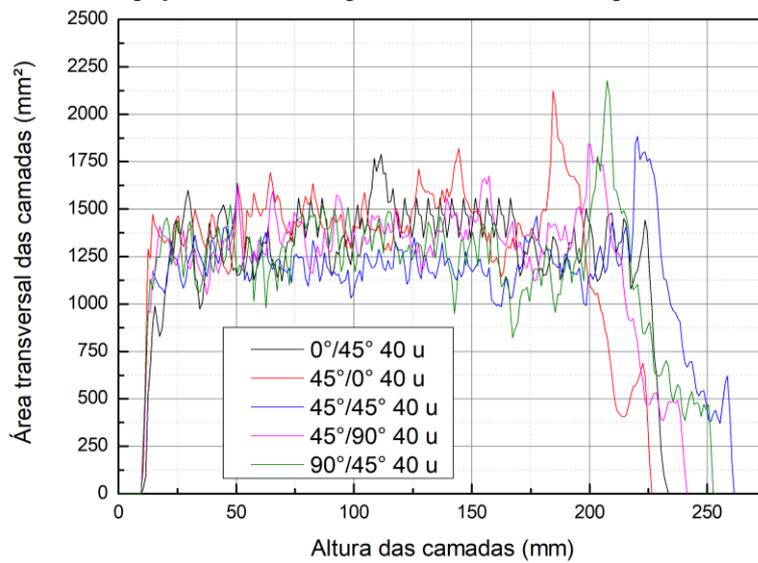


Figura 139. Gráfico de distribuição de camadas (Área transversal das camadas) para as cubas simuladas com 40 peças no modelo experimental de análise de processo.

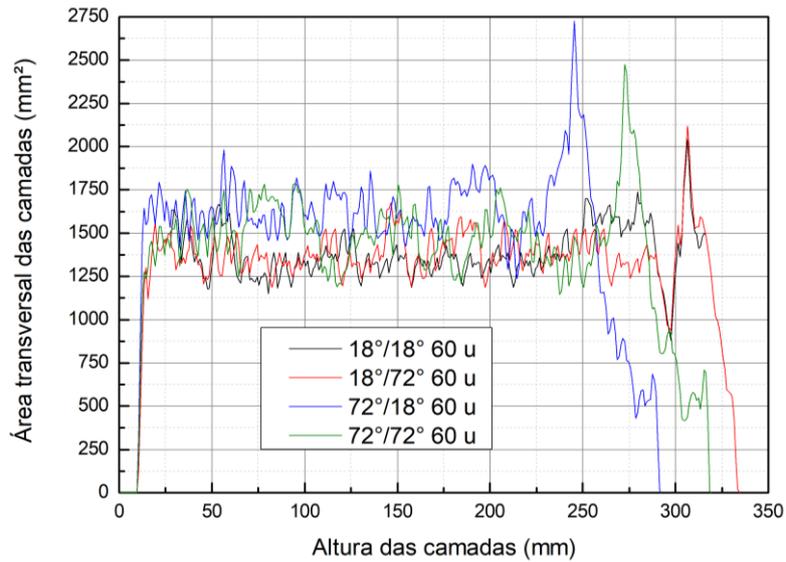


Figura 140. Gráfico de distribuição de camadas (Área transversal das camadas) para as cubas simuladas com 60 peças no modelo experimental de análise de processo.

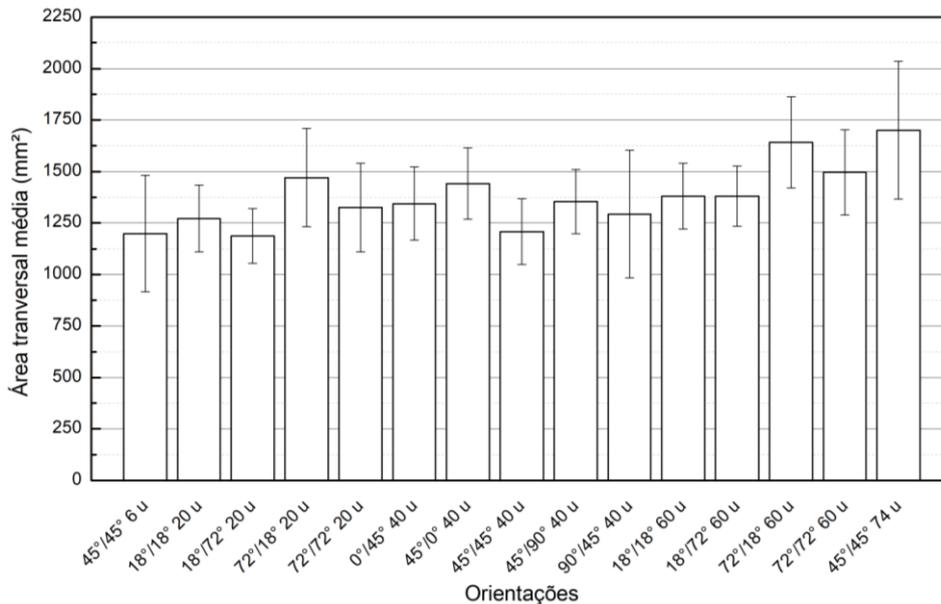


Figura 141. Gráfico para Área transversal média estimadas para as cubas simuladas.

A Figura 142 apresenta alguns resultados para a análise de risco que o software Materialise Magics pode executar para as simulações de cubas. Nesta análise são avaliadas regiões da peças que podem apresentar riscos de defeitos, majoritariamente associados a acúmulo térmico ou carência térmica. São apresentados 5 exemplos para cada quantidade de peças avaliadas no modelo aplicado. Pelas análises foi identificado que as regiões com riscos se concentram nos últimas camadas no topo das cubas, coerente com o que é observado nos gráficos de distribuição de camadas. As regiões em verde representam áreas sem risco, enquanto as regiões amarelas ou vermelhas representam regiões com médio ou alto risco de defeito respectivamente. As orientações de impressão não afetaram a quantidade de peças com

risco ou o tamanho das regiões afetadas, mas cubas com mais peças apresentaram mais peças com risco de defeitos, contudo a proporção unidades com defeito/total de unidades é reduzida significativamente com o aumento da quantidade de peças, tornando as cubas com mais peças melhores opções para aproveitamento do processo de impressão. Como exemplo na cuba de 6 peças 2 possuem risco de defeito, representando 33% do total, enquanto na cuba de 74 peças, 4 possuem risco de defeito, representando 5,4% do total. Assim produzir um grande lote de peças ou invés de diversos lotes menores proporcionaria menor descarte de peças.

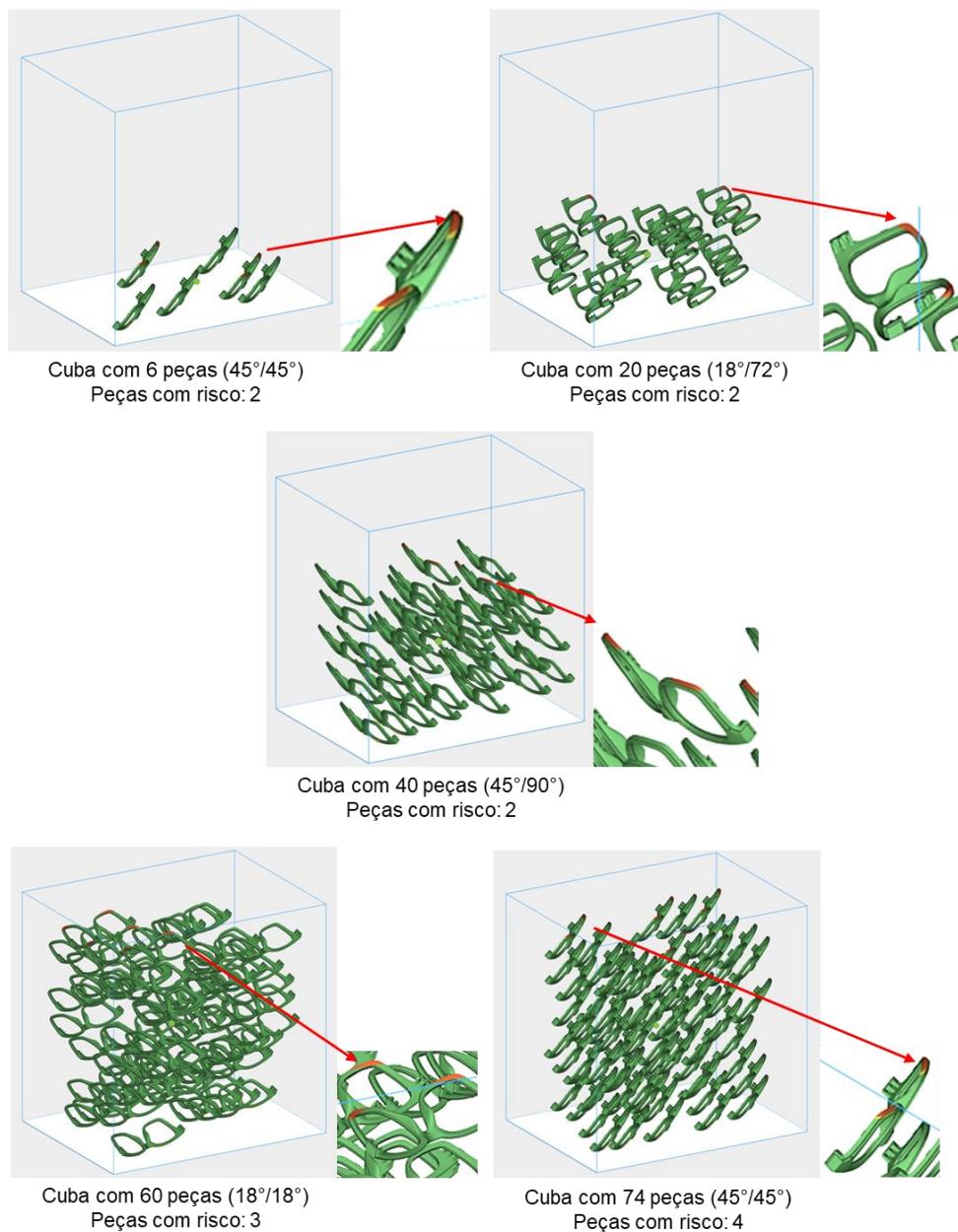


Figura 142. Exemplos para as análises de risco executadas, para cubas com 6, 20, 40, 60 e 74 peças.

A análise de variância da variável de resposta área transversal média no modelo central composto estudado é dada na Tabela 27. A ANOVA indica que o modelo obteve significância

estatística (Valor-P inferior a 0,05), validando que houve influência dos parâmetros avaliados nessa variável. Para análise de variância é possível identificar ainda significância para a influência de todas as 3 variáveis de entrada (ângulos XZ e XY e quantidade de peças), contudo não foi identificada entre os fatores para os resultados de área transversal média.

Tabela 27. Análise de variância da área transversal média.

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Modelo | 9 | 377976 | 41997 | 7,85 | 0,002 |
| Linear | 3 | 211547 | 70516 | 13,18 | 0,001 |
| XY | 1 | 29373 | 29373 | 5,49 | 0,041 |
| XZ | 1 | 19848 | 19848 | 3,71 | 0,083 |
| Quant. | 1 | 162325 | 162325 | 30,34 | 0,000 |
| Quadrado | 3 | 159968 | 53323 | 9,96 | 0,002 |
| XY*XY | 1 | 21035 | 21035 | 3,93 | 0,076 |
| XZ*XZ | 1 | 63208 | 63208 | 11,81 | 0,006 |
| Quant.*Quant. | 1 | 102060 | 102060 | 19,07 | 0,001 |
| Interação com 2 Fatores | 3 | 6460 | 2153 | 0,40 | 0,754 |
| XY*XZ | 1 | 5360 | 5360 | 1,00 | 0,341 |
| XY*Quant. | 1 | 216 | 216 | 0,04 | 0,845 |
| XZ*Quant. | 1 | 884 | 884 | 0,17 | 0,693 |
| Erro | 10 | 53511 | 5351 | | |
| Falta de ajuste | 5 | 53511 | 10702 | * | * |
| Erro puro | 5 | 0 | 0 | * | * |
| Total | 19 | 431486 | | | |

Com a validação do modelo estatístico é possível analisar os efeitos dos parâmetros de processo. O gráfico de efeitos padronizados na Figura 143 apresenta quão significativa foi a influência de cada parâmetro ou combinação de parâmetros nos resultados de área transversal média. Pelo gráfico é possível notar que a quantidade de peças teve maior influência, confirmando o que foi observado quanto a melhor capacidade de aproveitamento do espaço ocupado. O ângulo em relação ao plano horizontal (XY) demonstrou-se ser o segundo parâmetro de maior influência, contudo o ângulo em relação ao plano vertical (XZ) também apresentou significância no modelo quadrado. A Figura 144 apresenta o gráfico de superfície de resposta para a variável área transversal média para uma quantidade de peças fixada em 60 unidades e indica meios de otimizar esta característica. Pelo modelo estatístico aplicado e modelo de peça utilizado no estudo as indicações de otimização, para redução da área transversal média, seriam orientar as peças com ângulos entre 20° e 60°.

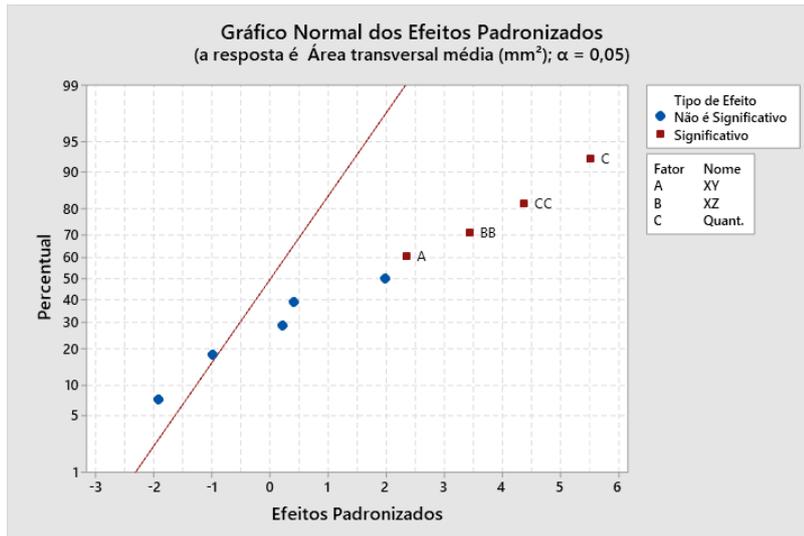


Figura 143. Gráfico normal de efeitos padronizados do modelo de superfície de resposta para a resposta de Área transversal média.

Gráfico de Superfície de Área transversal média (mm²) versus XZ; XY

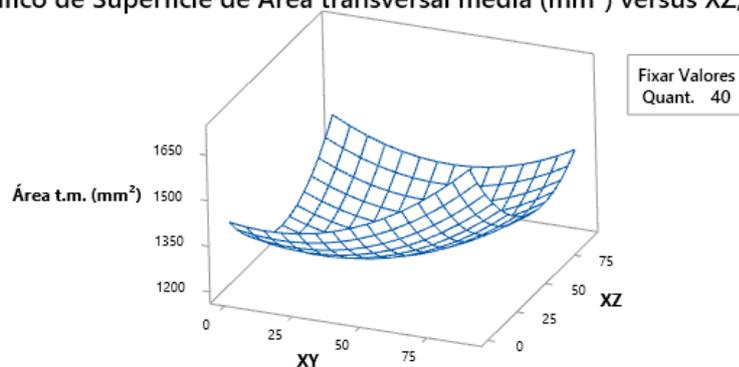


Figura 144. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para a Área transversal média, com quantidade de peças na cuba fixada em 40 unidades e para a peça selecionada.

4.6.2 Comparações de desempenho do processo

Como já comentado anteriormente a altura de cuba é um fator importante pois afeta as principais características na impressão com o processo MJF. A Figura 145 apresenta a comparação de altura de cuba para cada combinação de orientações de quantidade de peças avaliada, bem como o tempo estimado de impressão para cada combinação, calculado pelo software HP Build Manager, com base na altura de cuba, tipo de material e configuração de resfriamento (para este caso resfriamento lento natural). Os gráficos indicam que a altura de cuba é o fator que mais afeta o tempo de estimado de impressão, para uma mesma configuração de perfil de impressão e perfil de resfriamento. Os resultados indicam ainda que orientações com maior ângulo em relação ao plano horizontal (XY) e menor ângulo em relação ao plano

vertical (XZ) tendem a reduzir a altura de cuba, impactando na redução também do tempo total de impressão, algo observado para as diferentes quantidades de peças. Embora esta diferença entre valores não parece grande em lotes menores, em lotes maiores é possível notar uma diferença maior, como exemplo, ocorreu uma redução de cerca de 1,24 h entre as combinações 18°/72° 60 u e 72°/18° 60 u, o que representa um ganho significativo em produtividade pois agilizaria o processo de fabricação de um grande lote. Para uma mesma quantidade de peças, a melhor acomodação de peças geraria uma cuba de altura menor e consequentemente de volume menor, gerando uma porcentagem de densidade de empacotamento maior. Ainda, o material em pó na cuba que não é processado sofre um leve envelhecimento térmico e perde a categoria de “virgem” (embora possa ser reutilizado na taxa de mistura como material “usado”), assim uma cuba de menor altura também irá envelhecer uma quantidade menor de material, possibilitando um melhor aproveitamento do material disponível.

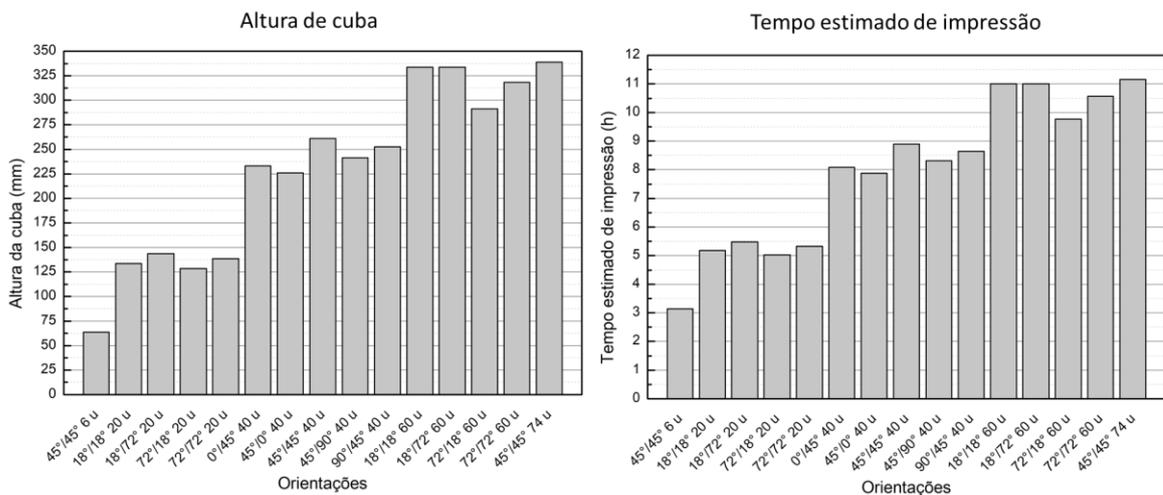


Figura 145. Gráficos de altura total de cuba e tempo estimado de impressão para as cubas simuladas.

A análise de variância da variável de resposta tempo estimado de impressão no modelo central composto estudado é dada na Tabela 28. A ANOVA indica que o modelo obteve significância estatística (Valor-P inferior a 0,05), validando que houve influência dos parâmetros avaliados nessa variável. Pela análise de variância é possível identificar que a quantidade de peças é o único fator com significância para modelo linear e quadrado e que não há interação entre fatores. Contudo para modelo quadrado o fator ângulo de orientação em relação ao plano vertical (XZ) apresentou significância. Estes dados indicam que a orientação de impressão não possui uma grande capacidade de influenciar essa variável.

Tabela 28. Análise de variância do tempo estimado de impressão.

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------|----|----------|----------|---------|---------|
|-------|----|----------|----------|---------|---------|

| | | | | | |
|-------------------------|----|---------|---------|--------|-------|
| Modelo | 9 | 94,4928 | 10,4992 | 80,51 | 0,000 |
| Linear | 3 | 89,1540 | 29,7180 | 227,88 | 0,000 |
| XY | 1 | 0,0801 | 0,0801 | 0,61 | 0,451 |
| XZ | 1 | 0,3292 | 0,3292 | 2,52 | 0,143 |
| Quant. | 1 | 88,7446 | 88,7446 | 680,50 | 0,000 |
| Quadrado | 3 | 5,0131 | 1,6710 | 12,81 | 0,001 |
| XY*XY | 1 | 0,2546 | 0,2546 | 1,95 | 0,193 |
| XZ*XZ | 1 | 0,7466 | 0,7466 | 5,73 | 0,038 |
| Quant.*Quant. | 1 | 4,5248 | 4,5248 | 34,70 | 0,000 |
| Interação com 2 Fatores | 3 | 0,3257 | 0,1086 | 0,83 | 0,506 |
| XY*XZ | 1 | 0,0803 | 0,0803 | 0,62 | 0,451 |
| XY*Quant. | 1 | 0,2395 | 0,2395 | 1,84 | 0,205 |
| XZ*Quant. | 1 | 0,0060 | 0,0060 | 0,05 | 0,835 |
| Erro | 10 | 1,3041 | 0,1304 | | |
| Falta de ajuste | 5 | 1,0208 | 0,2042 | 3,60 | 0,093 |
| Erro puro | 5 | 0,2833 | 0,0567 | * | * |
| Total | 19 | 95,7969 | | | |

Com a validação do modelo estatístico é possível analisar os efeitos dos parâmetros de processo. O gráfico de efeitos padronizados na Figura 146 apresenta quão significativa foi a influência de cada parâmetro ou combinação de parâmetros nos resultados de tempo de impressão estimado. O gráfico confirma que a influência significativa é quantidade de peças, mas indica também que o ângulo em relação ao plano vertical (XZ) demonstra influência nos resultados aferidas. A Figura 147 apresenta o gráfico de superfície de resposta para a variável tempo estimado de impressão para uma quantidade de peças fixada em 60 unidades trazendo diretrizes de otimização para o tempo de impressão. Conforme o modelo estatístico aplicado e modelo de peça utilizado neste estudo, as indicações de otimização para redução do tempo de impressão são a orientação das peças em 0° em relação a XZ (plano vertical) e 90° em relação a XY (plano horizontal).

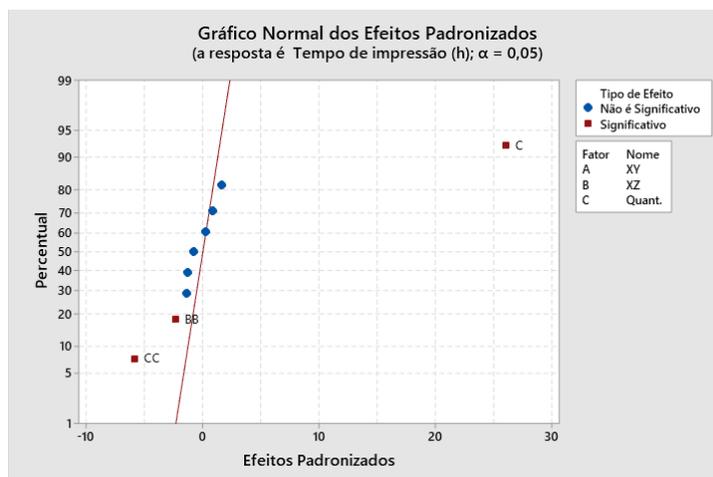


Figura 146. Gráfico normal de efeitos padronizados do modelo de superfície de resposta para a resposta de Tempo estimado de impressão.

Gráfico de Superfície de Tempo de impressão (h) versus XZ; XY

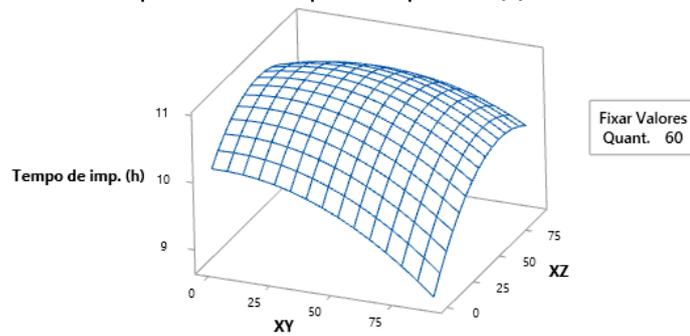


Figura 147. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para o Tempo estimado de impressão, com quantidade de peças na cuba fixada em 60 unidades e para a peça selecionada.

O custo estimado calculado com base nas cubas simuladas é dado na Figura 148. É possível que a influência da orientação de impressão é mínima no custo final das cubas, isso pode ser relacionado ao fato de que este custo depende realmente mais da quantidade de peças e de fatores operacionais ou econômicos para ser definido, contudo é possível identificar o mesmo efeito notado para a altura de cuba, com orientações de maior ângulo em relação ao plano horizontal (XY) e menor ângulo em relação ao plano vertical (XZ) tendendo a reduzir um pouco do custo. Em cubas de 20 unidades foi aferida uma diferença de até R\$ 9,00 com a variação de orientação de impressão, enquanto para cubas de 60 unidades foi aferida uma diferença de até R\$ 22,00 com a variação de orientação de impressão, que representam variações não muito significativas para o custo total (máximo de R\$ 596,00 para cubas com 20 peças e de R\$ 1733,00 para cubas de 60 peças), representando cerca de 1,5 % do custo total. Porém, em projeções a longo prazo, como demonstrado na Tabela 29, em um cenário com a fabricação de 10 lotes por mês em um ano, é possível alcançar uma economia de até R\$ 1080,00, R\$ 2400,00 e R\$ 2640,00 no custo total anual, para cubas com 20, 40 e 60 peças respectivamente, a depender da orientação de impressão aplicada. Como referência, a impressão de uma única parte frontal desta armação de óculos na horizontal ($0^\circ/45^\circ$) custaria RS 53,00, além disso a matéria-prima, para este caso o polipropileno particulado para MJF tem como custo cerca de R\$ 33.266,00 para um lote fechado de 100 Kg / 300 L, com custo aproximado de R\$ 332,66 / Kg.

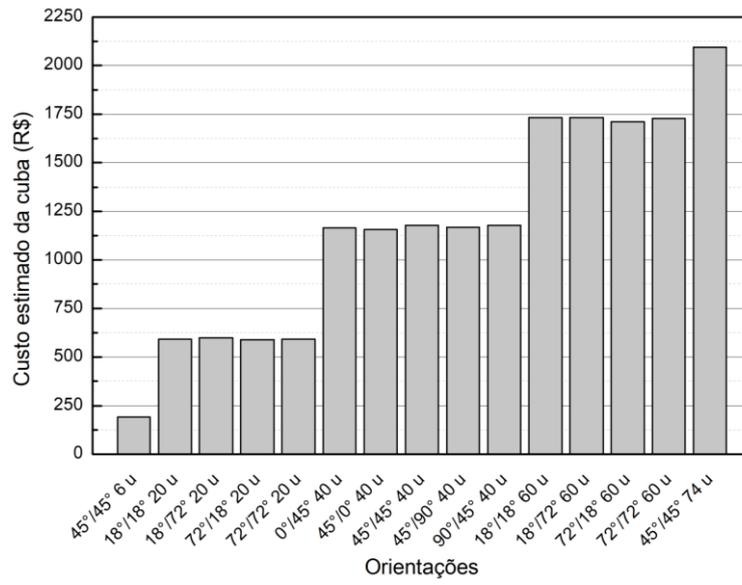


Figura 148. Gráfico para custo estimado de impressão das cubas simuladas.

Tabela 29. Comparações de projeções de custo acumulado para um cenário com 10 lotes por mês em um período de um ano.

| Condições | | Comparações de projeções de custo acumulado para um cenário com 10 lotes por mês no período de um ano | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--------------------|--|------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Quantidade de peças | Orientações | Janeiro | Fevereiro | Março | Abril | Maiο | Junho | Julho | Agosto | Setembro | Outubro | Novembro | Dezembro |
| 20 peças | 18°/18° | R\$5.920,00 | R\$11.840,00 | R\$17.760,00 | R\$23.680,00 | R\$29.600,00 | R\$35.520,00 | R\$41.440,00 | R\$47.360,00 | R\$53.280,00 | R\$59.200,00 | R\$65.120,00 | R\$71.040,00 |
| | 18°/72° | R\$5.980,00 | R\$11.960,00 | R\$17.940,00 | R\$23.920,00 | R\$29.900,00 | R\$35.880,00 | R\$41.860,00 | R\$47.840,00 | R\$53.820,00 | R\$59.800,00 | R\$65.780,00 | R\$71.760,00 |
| | 72°/18° | R\$5.890,00 | R\$11.780,00 | R\$17.670,00 | R\$23.560,00 | R\$29.450,00 | R\$35.340,00 | R\$41.230,00 | R\$47.120,00 | R\$53.010,00 | R\$58.900,00 | R\$64.790,00 | R\$70.680,00 |
| | 72°/72° | R\$5.920,00 | R\$11.840,00 | R\$17.760,00 | R\$23.680,00 | R\$29.600,00 | R\$35.520,00 | R\$41.440,00 | R\$47.360,00 | R\$53.280,00 | R\$59.200,00 | R\$65.120,00 | R\$71.040,00 |
| Diferença máxima no custo | | R\$90,00 | R\$180,00 | R\$270,00 | R\$360,00 | R\$450,00 | R\$540,00 | R\$630,00 | R\$720,00 | R\$810,00 | R\$900,00 | R\$990,00 | R\$1.080,00 |
| 40 peças | 0°/45° | R\$11.660,00 | R\$23.320,00 | R\$34.980,00 | R\$46.640,00 | R\$58.300,00 | R\$69.960,00 | R\$81.620,00 | R\$93.280,00 | R\$104.940,00 | R\$116.600,00 | R\$128.260,00 | R\$139.920,00 |
| | 45°/0° | R\$11.570,00 | R\$23.140,00 | R\$34.710,00 | R\$46.280,00 | R\$57.850,00 | R\$69.420,00 | R\$80.990,00 | R\$92.560,00 | R\$104.130,00 | R\$115.700,00 | R\$127.270,00 | R\$138.840,00 |
| | 45°/45° | R\$11.770,00 | R\$23.540,00 | R\$35.310,00 | R\$47.080,00 | R\$58.850,00 | R\$70.620,00 | R\$82.390,00 | R\$94.160,00 | R\$105.930,00 | R\$117.700,00 | R\$129.470,00 | R\$141.240,00 |
| | 45°/90° | R\$11.690,00 | R\$23.380,00 | R\$35.070,00 | R\$46.760,00 | R\$58.450,00 | R\$70.140,00 | R\$81.830,00 | R\$93.520,00 | R\$105.210,00 | R\$116.900,00 | R\$128.590,00 | R\$140.280,00 |
| | 90°/45° | R\$11.770,00 | R\$23.540,00 | R\$35.310,00 | R\$47.080,00 | R\$58.850,00 | R\$70.620,00 | R\$82.390,00 | R\$94.160,00 | R\$105.930,00 | R\$117.700,00 | R\$129.470,00 | R\$141.240,00 |
| Diferença máxima no custo | | R\$200,00 | R\$400,00 | R\$600,00 | R\$800,00 | R\$1.000,00 | R\$1.200,00 | R\$1.400,00 | R\$1.600,00 | R\$1.800,00 | R\$2.000,00 | R\$2.200,00 | R\$2.400,00 |
| 60 peças | 18°/18° | R\$17.330,00 | R\$34.660,00 | R\$51.990,00 | R\$69.320,00 | R\$86.650,00 | R\$103.980,00 | R\$121.310,00 | R\$138.640,00 | R\$155.970,00 | R\$173.300,00 | R\$190.630,00 | R\$207.960,00 |
| | 18°/72° | R\$17.330,00 | R\$34.660,00 | R\$51.990,00 | R\$69.320,00 | R\$86.650,00 | R\$103.980,00 | R\$121.310,00 | R\$138.640,00 | R\$155.970,00 | R\$173.300,00 | R\$190.630,00 | R\$207.960,00 |
| | 72°/18° | R\$17.110,00 | R\$34.220,00 | R\$51.330,00 | R\$68.440,00 | R\$85.550,00 | R\$102.660,00 | R\$119.770,00 | R\$136.880,00 | R\$153.990,00 | R\$171.100,00 | R\$188.210,00 | R\$205.320,00 |
| | 72°/72° | R\$17.270,00 | R\$34.540,00 | R\$51.810,00 | R\$69.080,00 | R\$86.350,00 | R\$103.620,00 | R\$120.890,00 | R\$138.160,00 | R\$155.430,00 | R\$172.700,00 | R\$189.970,00 | R\$207.240,00 |
| Diferença máxima no custo | | R\$220,00 | R\$440,00 | R\$660,00 | R\$880,00 | R\$1.100,00 | R\$1.320,00 | R\$1.540,00 | R\$1.760,00 | R\$1.980,00 | R\$2.200,00 | R\$2.420,00 | R\$2.640,00 |

A análise de variância da variável de resposta custo de impressão no modelo central composto estudado é dada na Tabela 30. A ANOVA indica que o modelo obteve significância estatística (Valor-P inferior a 0,05), validando que houve influência dos parâmetros avaliados nessa variável. Identificou-se um efeito similar com o de tempo de impressão, com a quantidade de peças sendo único fator com significância para ambos modelos linear e quadrado e ausência interação entre fatores. Observa-se aqui também significância para o fator ângulo de orientação em relação ao plano vertical (XZ) no modelo quadrado. Estes dados indicam que a orientação de impressão possui baixa capacidade de influenciar essa variável.

Tabela 30. Análise de variância do custo estimado de impressão.

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------------------------|----|----------|----------|-----------|---------|
| Modelo | 9 | 4379556 | 486617 | 11299,72 | 0,000 |
| Linear | 3 | 4377314 | 1459105 | 33881,79 | 0,000 |
| XY | 1 | 26 | 26 | 0,60 | 0,458 |
| XZ | 1 | 149 | 149 | 3,47 | 0,092 |
| Quant. | 1 | 4377139 | 4377139 | 101641,31 | 0,000 |
| Quadrado | 3 | 2170 | 723 | 16,80 | 0,000 |
| XY*XY | 1 | 42 | 42 | 0,97 | 0,348 |
| XZ*XZ | 1 | 321 | 321 | 7,45 | 0,021 |
| Quant.*Quant. | 1 | 1986 | 1986 | 46,11 | 0,000 |
| Interação com 2 Fatores | 3 | 72 | 24 | 0,56 | 0,653 |
| XY*XZ | 1 | 21 | 21 | 0,49 | 0,500 |
| XY*Quant. | 1 | 45 | 45 | 1,05 | 0,330 |
| XZ*Quant. | 1 | 6 | 6 | 0,14 | 0,714 |
| Erro | 10 | 431 | 43 | | |
| Falta de ajuste | 5 | 431 | 86 | * | * |
| Erro puro | 5 | 0 | 0 | * | * |
| Total | 19 | 4379987 | | | |

Com a validação do modelo estatístico é possível analisar os efeitos dos parâmetros de processo. O gráfico de efeitos padronizados na Figura 149 apresenta quão significativa foi a influência de cada parâmetro ou combinação de parâmetros nos resultados de custo de impressão. O gráfico confirma que a influência significativa é quantidade de peças, mas indica também que o ângulo em relação ao plano vertical (XZ) apresenta influência nos resultados obtidos. A Figura 150 apresenta o gráfico de superfície de resposta para a variável custo de impressão para uma quantidade de peças fixada em 60 unidades trazendo diretrizes de otimização. Conforme o modelo estatístico aplicado e modelo de peça utilizado neste estudo, as indicações de otimização para redução do custo de impressão são a orientação das peças em 0° em relação a XZ (plano vertical) e 90° em relação a XY (plano horizontal).

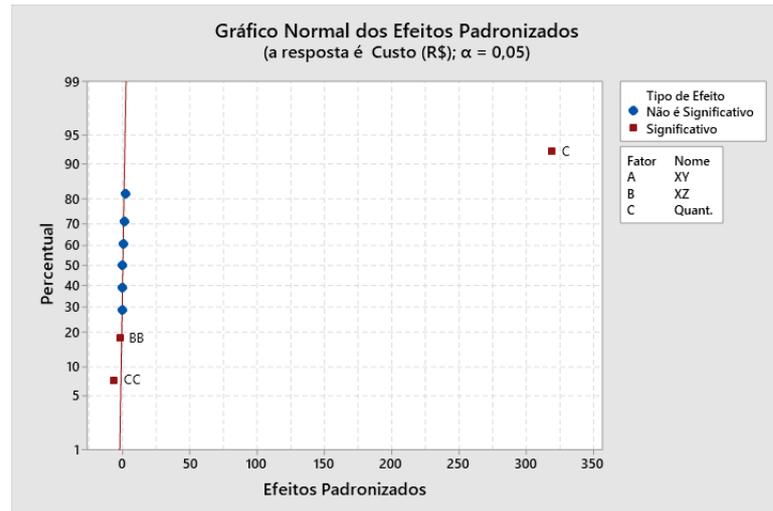


Figura 149. Gráfico normal de efeitos padronizados do modelo de superfície de resposta para a resposta de Custo estimado de impressão.

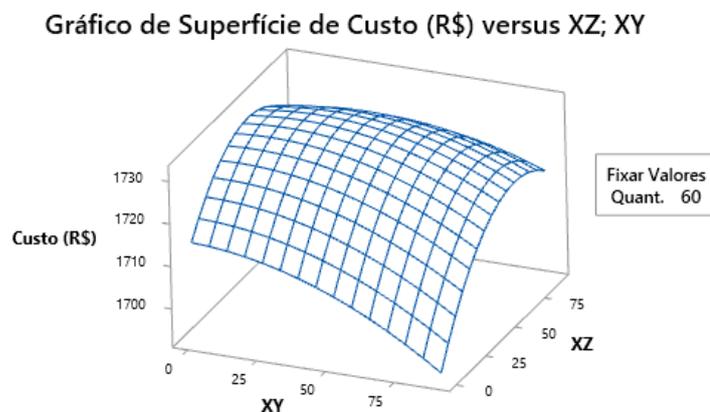


Figura 150. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para o Custo estimado de impressão, para uma quantidade peças fixada em 60 unidades e para a peça selecionada.

Outro parâmetro importante para avaliar o efeito das orientações de impressão no desempenho do processo MJF é a densidade de empacotamento, que representa a porcentagem do volume da cuba que é ocupado pelas peças (volume de material que será processado e consumido do total depositado na cuba). Para melhor distribuição térmica é recomendável obter uma densidade de empacotamento o maior possível, o que se traduz em um melhor aproveitamento do volume de material depositado na cuba. A Figura 151 apresenta os resultados de densidade de empacotamento para as cubas simuladas. As barras em cinza escuro representam a porcentagem de material descartado, que é associado a espessura externa das peças impressas em MJF que contém agente de detalhamento e são retiradas durante o pós-processamento, como é demonstrado na Figura 152, segundo o fabricante das impressoras MJF esta porção de material representa cerca de 10% do total do volume de material processado ou

empacotado. Os resultados no gráfico indicam que aumentar a quantidade de peças na cuba proporciona um melhor aproveitamento do volume ocupado para a altura de cuba gerada, mas não possível identificar uma influência dos ângulos de orientação.

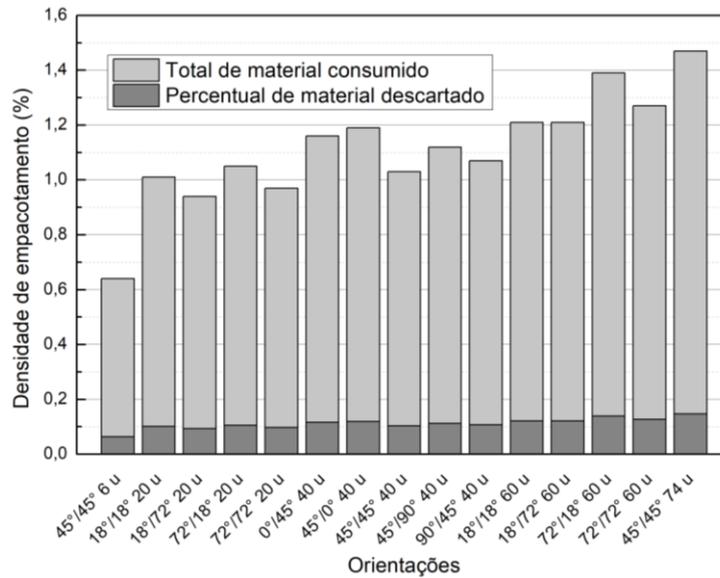


Figura 151. Gráfico para densidade de empacotamento das cubas simuladas em %. A porcentagem total representa também o total de material consumido na impressão, enquanto 10% desse material consumido é descartado no pós-processamento.



Figura 152. Representação da região afetada pelo agente de detalhamento no processo MJF, que é descartada durante o pós-processamento.

A análise de variância da variável de resposta densidade de empacotamento no modelo central composto estudado é dada na Tabela 31. A ANOVA indica que o modelo obteve significância estatística (Valor-P inferior a 0,05), validando que houve influência dos parâmetros avaliado nessa variável. A densidade de empacotamento apresentou comportamento similar ao de tempo de impressão e custo de impressão, com a quantidade de peças sendo único fator com significância para ambos modelos linear e quadrado e ausência interação entre

fatores, ainda com significância para o fator ângulo de orientação em relação ao plano vertical (XZ) no modelo quadrado, indicando também que a orientação de impressão possa ter baixa capacidade de influenciar essa variável.

Tabela 31. Análise de variância para a densidade de empacotamento.

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Modelo | 9 | 0,527392 | 0,058599 | 10,72 | 0,000 |
| Linear | 3 | 0,474126 | 0,158042 | 28,91 | 0,000 |
| XY | 1 | 0,001889 | 0,001889 | 0,35 | 0,570 |
| XZ | 1 | 0,011030 | 0,011030 | 2,02 | 0,186 |
| Quant. | 1 | 0,461208 | 0,461208 | 84,37 | 0,000 |
| Quadrado | 3 | 0,047429 | 0,015810 | 2,89 | 0,088 |
| XY*XY | 1 | 0,017044 | 0,017044 | 3,12 | 0,108 |
| XZ*XZ | 1 | 0,034019 | 0,034019 | 6,22 | 0,032 |
| Quant.*Quant. | 1 | 0,002386 | 0,002386 | 0,44 | 0,524 |
| Interação com 2 Fatores | 3 | 0,005838 | 0,001946 | 0,36 | 0,786 |
| XY*XZ | 1 | 0,002113 | 0,002113 | 0,39 | 0,548 |
| XY*Quant. | 1 | 0,003612 | 0,003612 | 0,66 | 0,435 |
| XZ*Quant. | 1 | 0,000113 | 0,000113 | 0,02 | 0,889 |
| Erro | 10 | 0,054663 | 0,005466 | | |
| Falta de ajuste | 5 | 0,054379 | 0,010876 | 191,93 | 0,000 |
| Erro puro | 5 | 0,000283 | 0,000057 | * | * |
| Total | 19 | 0,582055 | | | |

Com a validação do modelo estatístico é possível analisar os efeitos dos parâmetros de processo. O gráfico de efeitos padronizados é mostrado na Figura 153 e indica quão significativa foi a influência de cada parâmetro ou combinação de parâmetros nos resultados de densidade de empacotamento. O gráfico confirma que a influência significativa é quantidade de peças, mas indica também que o ângulo em relação ao plano vertical (XZ) demonstra influência nos resultados. Já a Figura 154 apresenta o gráfico de superfície de resposta para a variável densidade de empacotamento para uma quantidade de peças fixada em 60 unidades trazendo diretrizes de otimização para o tempo de impressão. Conforme o modelo estatístico aplicado e modelo de peça utilizado neste estudo, as indicações de otimização para aumento da densidade de empacotamento são a orientação das peças em 0° em relação a XZ (plano vertical) e 90° em relação a XY (plano horizontal).

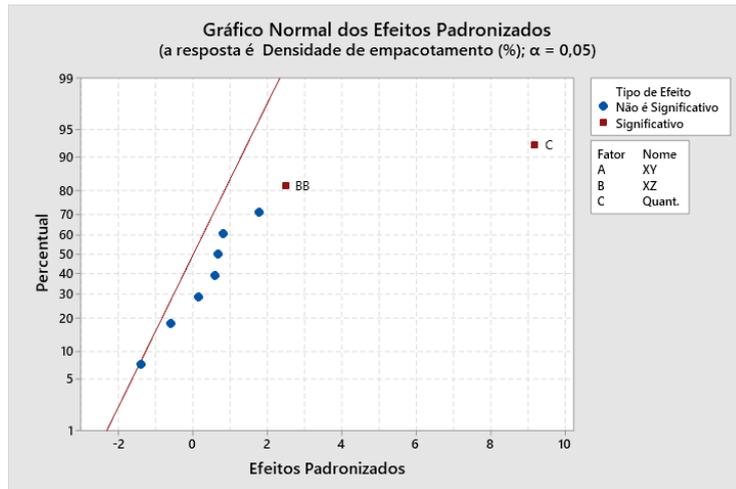


Figura 153. Gráfico normal de efeitos padronizados do modelo de superfície de resposta para a resposta de Densidade de empacotamento.

Gráfico de Superfície de Densidade de empacotamento (%) versus XZ; XY

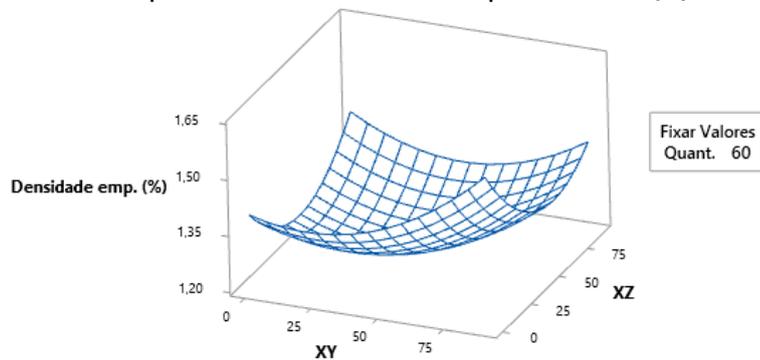


Figura 154. Gráfico de superfície gerado pelo modelo de superfície de resposta para a Densidade de empacotamento, para uma quantidade peças fixada em 60 unidades e para a peça selecionada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi possível obter uma compreensão dos parâmetros de processo da tecnologia de manufatura aditiva Multi Jet Fusion (MJF) da HP características do Polipropileno impresso. Este estudo foi realizado por meio de observações práticas deste processo e de suas características e pela validação dos efeitos dos parâmetros nas respostas das peças impressas por MJF, aplicando métodos de engenharia, tais quais avaliações mecânicas de materiais e análises computacionais em softwares de simulação, modelagem e análise e métodos estatísticos, como o de planejamento experimental (*Design of experiments*).

Em relação a avaliação do desempenho das peças de polipropileno impressas por MJF, este estudo possibilitou identificar de forma geral que neste processo de manufatura aditiva as propriedades das peças podem ser de fato influenciadas pela orientação de impressão, como se esperava, e como é comum para os processos de MA. Contudo, uma observação positiva quanto ao MJF é que de fato as variações geradas pela orientação de impressão são de pequena escala para a maioria das propriedades e características avaliadas, sendo justo afirmar que possui menos problemas de anisotropia quando comparado a outros processos de MA, principalmente outros processos de fusão em leito, comparações que já foram validadas por alguns autores como comento ao longo do trabalho.

Quanto a avaliação das amostras de polipropileno impressas em MJF é possível concluir, que:

- Os parâmetros de orientação de impressão afetam com significância estatística as propriedades mecânicas de resistência a tração (tensão máxima até ruptura a tração, em MPa) e de alongamento até ruptura (deformação máxima até ruptura, em %). Essa influência está associada à disposição/direção das camadas de impressão em cada orientação, e como estas camadas interagem com a direção de aplicação da força de tração e como as áreas das camadas impressas são afetadas pela direção de deposição de energia no processo de MJF;
- Essas propriedades podem ser afetadas pela porosidade nas peças. A porosidade também obteve significância estatística quanto a influência da orientação de impressão. Esta variação na porosidade pode ser correlacionada com as variações nas propriedades mecânicas, visto que os poros presentes nas peças afetam as propriedades mecânicas das peças;

- A orientação de impressão pode afetar ainda a cristalinidade ao longo das peças, como foi observado neste trabalho nos testes de DSC. Diferentes orientações geram distribuições de área de camada diferentes nas peças e a depender de como estas peças estejam posicionadas na cuba essa diferença será vista também na taxa de cristalinidade. Para mitigar possíveis efeitos prejudiciais desta variação de cristalinidade nas propriedades das peças o recomendado seria melhorar a distribuição de camadas da peça reduzindo as áreas transversais;
- As propriedades mecânicas de módulo elástico (em MPa) e de resistência ao impacto (em KJ/m²) não são afetadas com significância estatística pelos parâmetros de orientação de impressão no processo de MJF, de acordo com o modelo estatístico aplicado neste estudo;

Este trabalho possibilitou as seguintes indicações de otimização para melhoria do desempenho das peças de polipropileno impressas por Multi Jet Fusion, apresentadas na Tabela 32. Estas otimizações de resposta são resultado dos dados obtidos pelos testes processados pelo modelo de superfície de resposta e são calculadas e geradas pelo software de análise estatística Minitab no processamento do modelo estatístico. Estas indicações dão de forma individual diretrizes para maximização ou minimização da propriedade alvo. A depender da aplicação do produto e dos requisitos que esta aplicação demanda, pode-se selecionar uma ou mais otimização de resposta para possivelmente melhorar o desempenho do produto no aspecto desejado, seja um produto que demande maior resistência mecânica, maior deformação ou até que pretenda induzir porosidade para atender uma necessidade específica. Um exemplo desse tipo de análise é dado na Figura 155, considerando uma aplicação que demande menor porosidade aparente e maior resistência mecânica, a otimização de resposta gerada pelo modelo estatístico aplicado neste estudo indicou uma solução de orientação em 90°/90° para equilibrar os dois requisitos com tensão máxima de 23,65 MPa e porosidade aparente de 0,025%. O gráfico de contorno sobreposto com limites de porosidade entre 0,2 a 0,6 % e limites de tensão máxima entre 23 e 24 MPa exemplifica de forma visual onde esta faixa de melhor condição é localização (correspondente a região branca no gráfico de contorno sobreposto).

Tabela 32. Indicações de otimização obtidas no trabalho pelo modelo experimental de análise das peças.

| Propriedade alvo da peça | Maior condição obtida no trabalho | Menor condição obtida no trabalho | Apresentou significância | Indicações de otimização de resposta gerada |
|---------------------------------|--|--|---------------------------------|--|
|---------------------------------|--|--|---------------------------------|--|

| | | | estatística no modelo aplicado? | pelo método de superfície de resposta |
|--|---|---|--|---|
| Resistência a tração (Tensão máxima a tração em MPa) | Orientação 90°/45° (23,69 ±0,10 MPa) | Orientação 13°/13° (21,30 ±0,50 MPa) | Sim | Para maximização: Orientar em 90°/89° |
| Modulo elástico (MPa) | Orientação 77°/77° (964,62 ±48,31 MPa) | Orientação 77°/13° (843,42 ±30,22 MPa) | Não | Não aplicável |
| Alongamento (Deformação até ruptura em %) | Orientação 0°/45° (50,93 ±2,14 %) | Orientação 77°/77° (16,15 ±1,60 %) | Sim | Para maximização: Orientar em 0°/90° Para minimização: Orientar em 76°/17° |
| Resistência ao impacto (KJ/m²) | Orientação 13°/13° (6,14 ±0,60 KJ/m²) | Orientação 77°/13° (4,47 ±0,33 KJ/m²) | Não | Não aplicável |
| Porosidade aparente (%) | Orientação 13°/77° (0,27 ±0,01 %) | Orientação 13°/13° (0,07 ±0,01 %) | Sim | Para maximização: Orientar em 8°/90° Para minimização: Orientar em 0°/0° |

Otimização da Resposta: Porosidade aparente (%V/V); Tensão máx (MPa)

Parâmetros

| Resposta | Meta | Inferior | Alvo | Superior | Peso | Importância |
|----------------------------|--------|----------|---------|----------|------|-------------|
| Porosidade aparente (%V/V) | Mínimo | | 0,0697 | 0,269395 | 1 | 1 |
| Tensão máx (MPa) | Máximo | 21,65 | 23,4700 | | 1 | 1 |

Solução

| Solução | XY | XZ | Porosidade aparente (%V/V) | Tensão máx (MPa) | Desirability Composta |
|---------|----|----|----------------------------|------------------|-----------------------|
| | | | Ajuste | Ajuste | |
| 1 | 90 | 90 | 0,0249161 | 23,6524 | 1 |

Gráfico de Contorno de Porosidade aparente (%V/V); Tensão máx (MPa)

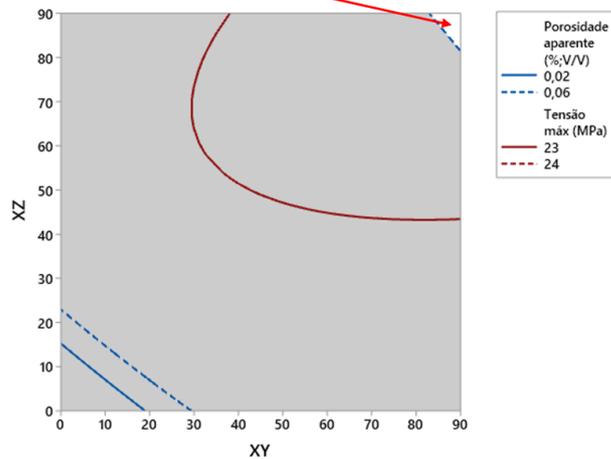


Figura 155. Exemplo de otimização de resposta combinada para minimização da porosidade e maximização da resistência a tração, possível por meio dos resultados obtidos no trabalho.

Quanto a avaliação do desempenho do processo, por meio do modelo estatístico aplicado e pela peça selecionada para análise não foi identificada uma relação forte entre as orientações de impressão e as características de produtividade, custo e consumo de material. A quantidade peças na cuba tem maior influência nestes fatores, com poucas janelas de otimização por meio do ajuste da orientação de impressão, que podem gerar poucas melhorias quanto a densidade de empacotamento (compactação das peças na cuba) no tempo de processo e no custo da cuba, embora possam ter maior influência quanto a distribuição de camadas. As seguintes conclusões foram observadas com essa análise:

- A orientação espacial de impressão possui pouca influência nas características de densidade de empacotamento, tempo estimado de impressão e custo estimado da cuba;
- Contudo, alguns aspectos valem a atenção, como o efeito de redução de custos a longo prazo e a possibilidade de redução do tempo de impressão em cerca de 2h, como foi observado neste trabalho. Assim, a realização deste tipo de análise para projetos de cuba de impressão pode ser importante para identificar esses tipos de benefícios com alguns ajustes de orientação de impressão;

- A influência mais significativa da orientação de impressão foi observada nas medições de área transversal média, com influência dos dois ângulos avaliados. As orientações que geram altura de cuba maiores, possibilitam uma acomodação de peças reduz a área transversal no geral.

Desta forma, por meio deste trabalho as indicações de otimização de resposta que puderam ser obtidas pela aplicação do método de superfície de resposta são apresentadas na Tabela 33, considerando uma cuba com quantidade peças fixada em 60 unidades. Outros exemplos da aplicação destas indicações de otimização são mostrados nas Figura 156 e Figura 157, considerando otimização de impressões em MJF que demandem redução de área transversal média e de tempo de impressão, ou redução de área transversal média e aumento de densidade de empacotamento respectivamente. A otimização de resposta gerada pelo modelo estatístico no primeiro caso indica uma solução de orientação em $58^\circ/29^\circ$ para equilibrar os dois requisitos, enquanto para o segundo caso a solução indica seria uma orientação de aproximadamente $44^\circ/45^\circ$. Aqui, os gráficos de contorno sobreposto também ajudam a visualizar a região de otimização na análise das características combinadas.

Tabela 33. Indicações de otimização obtidas no trabalho pelo modelo experimental de análise do processo.

| Característica alvo do processo | Maior condição obtida no trabalho | Menor condição obtida no trabalho | Apresentou significância estatística no modelo aplicado? | Indicações de otimização de resposta gerada pelo método de superfície de resposta |
|---|--|--|---|--|
| Área transversal média (mm ²) | Orientação $72^\circ/18^\circ$ (1641,86 ±222,20 mm ²) | Orientação $18^\circ/18^\circ$ (1379,91 ±159,01 mm ²) | Sim | Para minimização: Orientar em $28^\circ/47^\circ$ |
| Tempo estimado de impressão (h) | Orientação $18^\circ/18^\circ$ e $18^\circ/72^\circ$ (11,00 h) | Orientação $72^\circ/18^\circ$ (9,76 h) | Sim | Para minimização: Orientar em $90^\circ/0^\circ$ |
| Custo estimado da cuba (R\$) | Orientação $18^\circ/18^\circ$ e $18^\circ/72^\circ$ (R\$ 1733,00) | Orientação $72^\circ/18^\circ$ (R\$ 1711,00) | Sim | Para minimização: Orientar em $90^\circ/0^\circ$ |

| | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|---|-----|---|
| Densidade de empacotamento (%) | Orientação 72°/18° (1,39 %) | Orientação 18°/18° e 18°/72° (1,21 %) | Sim | Para maximização: Orientar em 90°/0° |
|--------------------------------|--------------------------------|---|-----|---|

Otimização da Resposta: Área transversal média (mm²); Tempo de impressão (h)

Parâmetros

| Resposta | Meta | Inferior | Alvo | Superior | Peso | Importância |
|---|--------|----------|---------|----------|------|-------------|
| Área transversal média (mm ²) | Mínimo | | 1187,74 | 1701,10 | 1 | 1 |
| Tempo de impressão (h) | Mínimo | | 3,14 | 11,15 | 1 | 1 |

Amplitudes de Variável

| Variável | Valores |
|----------|---------|
| XY | (0; 90) |
| XZ | (0; 90) |
| Quant. | 60 |

Solução

| Solução | XY | XZ | Quant. | Área transversal média (mm ²) | | Tempo de impressão (h) | | Desirability Composta |
|---------|---------|---------|--------|---|--|------------------------|--|-----------------------|
| | | | | Ajuste | | Ajuste | | |
| 1 | 61,8182 | 28,1818 | 60 | 1499,82 | | 10,3307 | | 0,200584 |

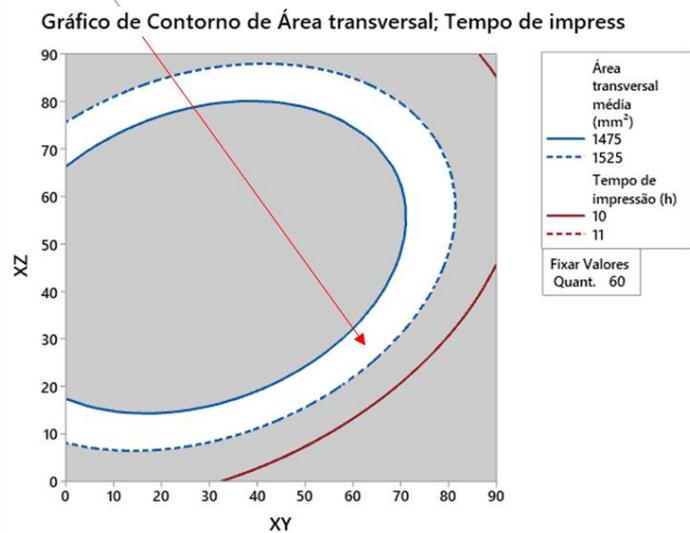


Figura 156. Exemplo de otimização de resposta combinada para minimização da área transversal média e minimização do tempo estimado de impressão, possível por meio dos resultados obtidos no trabalho. Considerando uma quantidade de peças fixada em 60 unidades, para a peça testada.

Otimização da Resposta: Área transversal média (mm²); Densidade de empacotamento (%)

Parâmetros

| Resposta | Meta | Inferior | Alvo | Superior | Peso | Importância |
|---|--------|----------|---------|----------|------|-------------|
| Área transversal média (mm ²) | Mínimo | | 1187,74 | 1701,10 | 1 | 1 |
| Densidade de empacotamento (%) | Máximo | 0,64 | 1,47 | | 1 | 1 |

Amplitudes de Variável

| Variável | Valores |
|----------|---------|
| XY | (0; 90) |
| XZ | (0; 90) |
| Quant. | 60 |

Solução

| Solução | XY | XZ | Quant. | Área transversal média (mm ²) | Densidade de empacotamento (%) | Desirability Composta |
|---------|---------|---------|--------|---|--------------------------------|-----------------------|
| | | | | Ajuste | Ajuste | |
| 1 | 21,8182 | 44,5455 | 60 | 1383,41 | 1,22086 | 0,658095 |

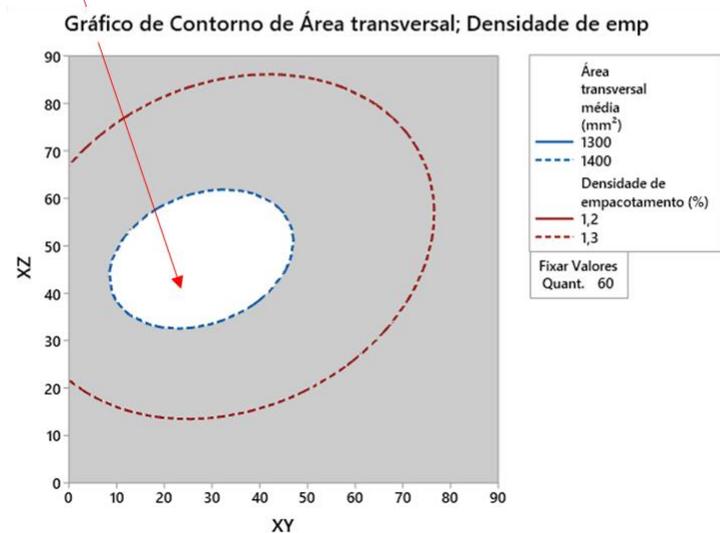


Figura 157. Exemplo de otimização de resposta combinada para minimização da área transversal média e maximização da densidade de empacotamento, possível por meio dos resultados obtidos no trabalho. Considerando uma quantidade de peças fixada em 60 unidades, para a peça testada.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, a seguintes observações são levantadas:

- Para uma investigação mais aprofundada dos efeitos da orientação de impressão na resistência a tração pode ser interessante à aplicação de um novo modelo estatístico de Planejamento experimental para validar se a variável de ângulo em relação ao plano horizontal (XY) afeta esta propriedade, visto que este comportamento foi levantado por outros trabalhos para outros materiais de MJF, mas não neste estudo para o PP. Para isso poderia ser aplicado um modelo estatístico com maior amostragem ou níveis ou maior quantidade de variáveis analisadas, como um modelo Taguchi;

- Aplicação de outros métodos de análises como testes de micro tomografia computadorizada (Micro CT) para uma melhor avaliação da porosidade. Este método permite um mapeamento tridimensional dos poros na peça, identificando com maior precisão taxa de porosidade, distribuição de tamanho de porosidade e sua localização precisa ao longo do volume da peça, o que permitiria análises mais aprofundadas acerca da influência da orientação de impressão nesta propriedade e como ela afeta as propriedades mecânicas. Outras técnicas poderiam ser o método de FTIR para verificação da composição das peças impressas em polipropileno ou escaneamento digitalizado para medição precisa do dimensional das peças impressas;
- Seria importante ainda realizar estudos mais aprofundados da influência da orientação de impressão também na precisão dimensional das peças de PP impressas por MJF, visto que foram identificadas algumas deformações como o efeito de capilaridade. Essa análise demandaria utilização de técnicas metrológicas precisas, como o uso de escanadores digitais certificados;
- Como não foi possível identificar uma relação entre as propriedades de resistência ao impacto e módulo elástico com a orientação de impressão, seria interessante ainda o desenvolvimento de uma nova análise com maior amostragem e considerando um modelo estatístico diferente estruturado para avaliar estes fatores. Desta forma seria possível validar se realmente não há influência, ou se há influência e qual seu comportamento.
- Quanto a avaliação do desempenho do processo MJF, este trabalhou focou a análise em uma peça específica selecionada e um conjunto de parâmetros fixados (como perfil de impressão e perfil de resfriamento). Para estudos futuros seria interessante o desenvolvimento de planejamentos experimentais que considerassem mais variações de parâmetros no intuito de buscar aprofundamento quanto a otimização do processo, além da aplicação de outros métodos estatísticos.
- Embora este trabalho indique condições de otimização para a peça selecionada, para outras impressões, com diferentes peças reais, as mesmas análises de processo podem ser validas para identificar otimizações de acordo com o comportamento da cuba com estas peças, seguindo os mesmos princípios aplicados aqui.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3D EXPERIENCE - MAKERS. **3D Printing - Additiva Manufacturing**. Disponível em: <<https://make.3dexperience.3ds.com/processes/introduction-to-additive-processes>>. Último acesso em 10 de dezembro de 2021.
- ADBALLAH, S.; ALI, S.; PERVAIZ, S. **Performance optimization of 3D printed polyamide 12 via Multi Jet Fusion: A Taguchi grey relational analysis (TGRA)**. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, v. 6, p. 72–81, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.05.004>
- ALGHAMDI, S. S.; JOHN, S.; CHOUDHURY, N. R.; DUTTA, N. K. **Additive manufacturing of polymer materials: Progress, promise and challenges**. *Polymers*, v. 13, n. 5, p. 1–39, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13050753>
- AMPOWER. **Metal Additive Manufacturing technology**. Disponível em: <<https://additive-manufacturing-report.com/additive-manufacturing-metal-technology/>> Último acesso em 13 de dezembro de 2021.
- ANGELO, L. D.; STEFANO, P. D.; GUARDIANI, E. **Search for the optimal build direction in additive manufacturing technologies: A review**. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, v. 4, n. 3, 2020. <https://doi.org/10.3390/jmmp4030071>
- ANTONY, J. **Design of Experiments for Engineers and Scientists: Second Edition**. Elsevier. 2014.
- ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook V. 24: Additiva Manufacturing**. ASM International, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16798 - Terminologia-padrão para manufatura aditiva - Sistemas de coordenadas e metodologias de ensaio**. ABNT. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/ASTM 52900: Manufatura aditiva - Princípios gerais - Terminologias**. ABNT. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 17296-2: Manufatura aditiva - Princípios gerais Parte 2: Visão geral de categorias de processo e de matéria-prima**. ABNT. 2019.
- AVANZINI, A.; BATTINI, D.; PANDINI, S. **Static and fatigue behavior in presence of notches for polyamide 12 (PA12) additively manufactured via Multi Jet Fusion™ process**. *International Journal of Fatigue*, v. 101, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106912>
- AWAD, A.; FINA, F.; GOYANES, A.; GAISFORD, S.; BASIT, A. W. **Advances in powder bed fusion 3D printing in drug delivery and healthcare**. *Advanced Drug Delivery Reviews*, v. 174, n. 1, p. 406–424, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.04.025>
- BHUVANESH KUMAR, M.; SATHIYA, P. **Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges**. *Thin-Walled Structures*, v. 159, n. 1. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107228>
- BOURELL, D.; KRUTH, J. P.; LEU, M.; LEVY, G.; ROSEN, D.; BEESE, A. M.; CLARE, A. **Materials for additive manufacturing**. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 66, n. 2, p. 659–681, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>
- BROMBERGER, J.; KELLY, R. **Additive manufacturing: A long-term game changer for manufacturers**. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com.br/business->

functions/operations/our-insights/additive-manufacturing-a-long-term-game-changer-for-manufacturers>. Último acesso em 10 de dezembro de 2021.

- CADER, M.; KÍŃSKI, W. **Effect of Changing the Parameters of the Multi Jet Fusion (MJF) Process on the Spatial Objects Produced.** *Problems of Mechatronics Armament Aviation Safety Engineering*, v. 11, n. 4, p. 61–72, 2020.
<http://dx.doi.org/10.5604/01.3001.0014.5644>
- CAI, C.; TEY, W. S.; CHEN, J.; ZHU, W.; LIU, X.; LIU, T.; ZHAO, L.; ZHOU, K. **Comparative study on 3D printing of polyamide 12 by selective laser sintering and Multi Jet Fusion.** *Journal of Materials Processing Technology*, v. 288. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116882>
- CALIGNANO, F.; GIUFFRIDA, F.; GALATI, M. **Effect of the build orientation on the mechanical performance of polymeric parts produced by Multi Jet Fusion and selective laser sintering.** *Journal of Manufacturing Processes*. v. 65, p, 271-282. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.018>
- CANEVAROLO, S.V. **Técnicas de caracterização de polímeros.** *Artliber*. São Paulo. 2004.
- CHEN, K.; KOH, Z. H.; LE, K. Q.; TEO, H. W. B.; ZHENG, H.; ZENG, J.; ZHOU, K.; DU, H. **Effects of build positions on the thermal history, crystallization, and mechanical properties of polyamide 12 parts printed by Multi Jet Fusion.** *Virtual and Physical Prototyping*, v. 17, n. 3, p. 631-648. 2022.
<https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2046478>
- CHEN, K.; TEO, H. W. B.; RAO, W.; KANG, G.; ZHU, K.; ZENG, J.; DU, H. **Experimental and modeling investigation on the viscoelastic-viscoplastic deformation of polyamide 12 printed by Multi Jet Fusion.** *International Journal of Plasticity*, v. 143. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2021.103029>
- CHESINI, L. C. **Conheça os nove pilares da Indústria 4.0 e sua relevância para a atividade industrial.** Disponível em: < <https://www.luizchesini.com.br/tag/nove-pilares/> > Último acesso em 10 de dezembro de 2021.
- FORMNEXT. **AM Field Guide 2021.** *Formnext*. 2021.
- GIBSON, I.; DAVID, R.; STRUCKER, B.; MAHYAR, K. **Additive Manufacturing Technologies.** *Springer*. 2021.
- GISARIO, A.; KAZARIAN, M.; MARTINA, F.; MEHRPOUYA, M. **Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review.** *Journal of Manufacturing Systems*, v. 53, p. 124–149, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.08.005>
- GUO, B.; XU, Z.; LUO, X.; BAI, J. **A detailed evaluation of surface, thermal, and flammable properties of polyamide 12/glass beads composites fabricated by Multi Jet Fusion.** *Virtual and Physical Prototyping*, v. 16, n. 1, p. 39–52, 2021.
<https://doi.org/10.1080/17452759.2021.1899463>
- HALEEM, A.; JAVAID, M. **Additive Manufacturing Applications in Industry 4.0: A Review.** *Journal of Industrial Integration and Management*, v. 4, n. 4, 2019.
<https://doi.org/10.1142/S2424862219300011>
- HP. **HP Jet Fusion 580 Color 3D Printer.** *HP*. p. 1–4, 2019.
- HP. **HP Multi Jet Fusion technology.** *HP White Paper*, 2018.
- HP. **HP JetFusion 3D Printing Handbook.** *HP*. 2019a.
- HP. **General recommendations for printing processes: Tuning your HP MJF to the design,** *HP*. 2019b.
- HP. **HP 3D Printing materials: 3D Printing Solution for the HP Jet Fusion 5200 Series Mechanical Properties.** *HP*. 2020a.
- HP. **HP 3D Printing materials portfolio selection guide.** *HP*. 2020b.
- HP. **HP Jet Fusion 3D Printing Solution 4200.** *HP*. 2017.

- I.MATERIALISE. **Preparing Files for 3D Printing: File-Fixing Terminology Explanation and Checklist**. Disponível: <<https://i.materialise.com/blog/en/preparing-files-for-3d-printing/>> Publicado em 2018. Último acesso em 10 de dezembro de 2021.
- KING, W.; ANDERSON, A. T.; FERENCZ, R. M.; HODGE, N. E.; KAMATH, C.; KHAIRALLAH, S. A. **Overview of modelling and simulation of metal powder bed fusion process at Lawrence Livermore National Laboratory**. *Materials Science and Technology*, v. 31, n. 8, p. 957–968, 2015.
<https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000728>
- KOLTZENBURG, S.; MASKOS, M.; NUYKEN, O. **Polymer Chemistry**. Springer. 2017.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-49279-6>
- LEE, K. P. M.; PANDELIDI, C.; KAJTAZ, M. **Build orientation effects on mechanical properties and porosity of polyamide-11 fabricated via Multi Jet Fusion**. *Additive Manufacturing*, v. 36, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101533>
- LIGON, S. C.; LISKA, R.; STAMPFL, J.; GURR, M.; MÜLHAUPT, R. **Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing**. *Chemical Reviews*, v. 117, n. 15, p. 10212–10290, 2017.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074>
- LONDON, M.B. **Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Multi-Jet Fusion 3D Printing**. Tese (Mestrado em Meio Ambiente e Sustentabilidade). Universidade de Michigan. 2020.
- MATERIALISE. **Materialise Magics 24: User Manual**. Materialise. 2020.
- MATOS, M. A.; ROCHA, A. M. A. C.; PEREIRA, A. I. **Improving additive manufacturing performance by build orientation optimization**. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 107, n. 5–6, p. 1993–2005, 2020.
<https://doi.org/10.1007/s00170-020-04942-6>
- MEHRPOUYA, M.; DEGHANGHADIKOLAEI, A.; FOTOVVATI, B.; VOSOOGHNIYA, A.; EMAMIAN, S. S.; GISARIO, A. **The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: A review**. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 9, n. 18, 2019.
<http://dx.doi.org/10.3390/app9183865>
- MELE, M.; CAMPANA, G.; MONTI, G. L. **Intelligent orientation of parts based on defect prediction in Multi Jet Fusion process**. *Progress in Additive Manufacturing*. v. 6, p.841–858. 2021.
<https://doi.org/10.1007/s40964-021-00199-x>
- MELE, M.; CAMPANA, G.; MONTI, G. L. **Modelling of the capillarity effect for cylindrical shapes in Multi Jet Fusion technology**. *Progress in Additive Manufacturing*, v. 30, 2019.
<https://doi.org/10.1007/s40964-021-00200-7>
- MELE, M.; CAMPANA, G.; PISANESCHI, G.; MONTI, G. L. **Investigation into effects of cooling rate on properties of polyamide 12 parts in the Multi Jet Fusion process**. *Rapid Prototyping Journal*, v. 26, n. 10, p. 1789–1795, 2020.
<https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2020-0080>
- MINITAB. **DOE - Superfície de resposta**. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18>>. Último acesso em 13 de outubro de 2021.
- MONTGOMERY, C. D. **Design and Analysis of Experiments**. 9ª ed. Wiley. Estados Unidos da America. 2017.
- MOURA, E. **Tecnologia Multi Jet Fusion**. Disponível em: <<https://www.ska.com.br/blog/tecnologia-multi-jet-fusion/>>. Último acesso em 5 de novembro de 2021.
- NAZIR, A.; JENG, J.Y. **A high-speed additive manufacturing approach for achieving high printing speed and accuracy**. *Journal of Mechanical Engineering Science*. v. 234. n.14. 2019.

- <https://doi.org/10.1177/0954406219861664>
NGO, T. D.; KASHANI, A.; IMBALZANO, G.; NGUYEN, K. T. Q.; HUI, D. **Additive manufacturing (3D printing): A review of materials , methods , applications and challenges.** *Composites Part B: Engineering*, v. 143, p. 172–196, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- O' CONNOR, H. J.; DICKSON, A.N.; DOWLING, D. P. **Evaluation of the mechanical performance of polymer parts fabricated using a production scale Multi Jet Fusion printing process.** *Additive Manufacturing*, v. 22, p. 381-387, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.035>
- OSSWALD, P. V.; OBST, P.; MAZZEI CAPOTE, G. A.; FRIEDRICH, M.; RIETZEL, D.; WITT, G. **Failure criterion for PA 12 multi-jet fusion additive manufactured parts.** *Additive Manufacturing*, v. 37, p. 101668, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101668>
- PANDELIDI, C.; LEE, K. P. M.; KAJTAZ, M. **Effects of polyamide-11 powder refresh ratios in multi-jet fusion: A comparison of new and used powder.** *Additive Manufacturing*, v. 40. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101933>
- RIEDELBAUCH, J.; RIETZEL, D.; WITT, G. **Analysis of material aging and the influence on the mechanical properties of polyamide 12 in the Multi Jet Fusion process.** *Additive Manufacturing*, v. 27, p. 259–266, 2019.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.002>
- ŠAFKA, J.; ACKERMANN, M.; VÉLE, F.; MACHÁČEK, J.; HENYŠ, P. **Mechanical properties of polypropylene: Additive manufacturing by Multi Jet Fusion technology.** *Materials*, v. 14, n. 9, p. 23–25, 2021.
<https://doi.org/10.3390/ma14092165>
- SAĞBAŞ, B. **Effect of Orientation Angle on Surface Quality and Dimensional Accuracy of Functional Parts Manufactured by Multi Jet Fusion Technology.** *European Mechanical Science*, v. 4, n. 2, p. 47–52, 2020.
<http://dx.doi.org/10.26701/ems.678901>
- SANTONOCITO, D. **Evaluation of fatigue properties of 3D-printed Polyamide-12 by means of energy approach during tensile tests.** *Procedia Structural Integrity*, v. 25, p. 355–363, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.04.040>
- SCHERER, B.; KOTTENSTEDDE, I. L.; MATYSIK, F. M. **Material characterization of polyamide 12 and related agents used in the multi-jet fusion process: complementary application of high-resolution mass spectrometry and other advanced instrumental techniques.** *Monatshefte fur Chemie*, v. 151, n. 8, p. 1203–1215, 2020.
<https://doi.org/10.1007/s00706-020-02646-x>
- SILVA, B. C. DOS S.; OLIVEIRA, A. S.; OLIVEIRA, L. S.; FOLLE, L. F.; LIMA, T. N.; SEIXAS, L. F.; COSTA, A. S. DA; COELHO, R. S. **Analysis Of Technological Maturity Of Additive Manufacturing Based On S-Curve.** *COBEM - International Congress of Mechanical Engineering - 2021*, 2021.
- SINGH, R.; DAVIM, J. P. **Additive Manufacturing: Applications and Innovations.** *CRC Press*. 2019.
- SINGH, R.; GUPTA, A.; TRIPATHI, O.; SRIVASTAVA, S.; SINGH, B.; AWASTHI, A.; RAJPUT, S. K.; SONIA, P.; SINGHAL, P.; SAXENA, K. K. **Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview.** *Materials Today: Proceedings*, v. 26, p. 3058–3070, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.635>
- SINGH, S.; RAMAKRISHNA, S.; SINGH, R. **Material issues in additive manufacturing: A**

- review.** *Journal of Manufacturing Processes*, v. 25, p. 185–200, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.006>
- SMARTECH. **2019 Additive Manufacturing Market Growth Surpassed \$10B Worldwide.** Disponível em: <<https://www.smartechanalysis.com/news/2019-additive-manufacturing-market-growth/>> Último acesso em 12 de novembro de 2021.
- SMARTECH. **Polymer Additive Manufacturing Market Shows Multidisciplinary \$16B Opportunity.** Disponível em < <https://www.smartechanalysis.com/news/polymer-additive-manufacturing-market/>>. Publicado em 2018. Último acesso em 12 de novembro de 2021.
- SOTOMAYOR, N. A. S.; CAIAZZO, F.; ALFIERI, V. **Enhancing design for additive manufacturing workflow: Optimization, design and simulation tools.** *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 11, n. 14, 2021.
<https://doi.org/10.3390/app11146628>
- TAN, L. J.; ZHU, W.; ZHOU, K. **Recent Progress on Polymer Materials for Additive Manufacturing.** *Advanced Functional Materials*, v. 30, n. 43, p. 1–54, 2020.
<https://doi.org/10.1002/adfm.202003062>
- TOFAIL, S. A. M.; KOUMOULOS, E. P.; BANDYOPADHYAY, A.; BOSE, S.; O'DONOGHUE, L.; CHARITIDIS, C. **Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities.** *Materials Today*, v. 21, n. 1, p. 22–37, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>
- WEI, S. T.; ZHOU, K.; CHAO, C. **A Comprehensive Investigation on 3D Printing of Polyamide 11 and Thermoplastic Polyurethane via Multi Jet Fusion.** *Polymers*, v. 13, n.13. 2021.
<https://doi.org/10.3390/polym13132139>
- XU, V.; LANGEFELD, A.; ERHARTER, B.; KOURKEIAN, M. **Polymer Additive Manufacturing – Market Today And In The Future.** Disponível em: < <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Polymer-additive-manufacturing-Market-today-and-in-the-future.html>>Publicado em 2020. Último acesso em 12 de novembro de 2021.
- XU, Z.; WANG, Y.; WU, D.; ANANTH, K. P.; BAI, J. **The process and performance comparison of polyamide 12 manufactured by Multi Jet Fusion and selective laser sintering.** *Journal of Manufacturing Processes*, v. 47, p. 419–426, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.07.014>
- YELAMANCHI, B.; MUMAREDDY, B. SANTIAGO, C.C.; OJOAWO, B.; METSGER, K.; HELFFERICH, B.; ZAPKA, J.; SILLANI, F.; MACDONALD, E.; CORTES, P. **Mechanical and fatigue performance of pressurized vessels fabricated with Multi Jet Fusion™ for automotive applications.** *Additive Manufacturing*. v. 44. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102048>
- ZHANG, L.; CHEN, X.; ZHOU, W.; CHENG, T.; CHEN, L.; GUO, Z.; HAN, B.; LU, L. **Digital twins for additive manufacturing: A state-of-the-art review.** *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 10, n. 23, p. 1–10, 2020.
<http://dx.doi.org/10.3390/app10238350>
- ZHU, Z.; MAJEWSKI, C. **Understanding pore formation and the effect on mechanical properties of High Speed Sintered polyamide-12 parts: A focus on energy input.** *Materials and Design*, v. 194. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108937>

PRODUÇÃO TÉCNICA E CIENTÍFICA

SEIXAS, L.F. LIMA, T.N. SILVA, B.C.S. FOLLE, L.F. COELHO, R.S. **Avaliação dos efeitos da orientação de fabricação na precisão dimensional e na resistência ao impacto de amostras de Polipropileno manufaturadas aditivamente utilizando a tecnologia HP Multi Jet Fusion.** *CONEM 22 – Congresso nacional de engenharia mecânica.* Teresina. 2022.