

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
RENATO DA CUNHA ARAUJO

**ANISOTROPIA DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE POLIAMIDA 12
PROCESSADA POR MANUFATURA ADITIVA EM TECNOLOGIA MJF**

São Bernardo do Campo

2022

RENATO DA CUNHA ARAUJO

**ANISOTROPIA DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE POLIAMIDA 12
PROCESSADA POR MANUFATURA ADITIVA EM TECNOLOGIA MJF**

Exame de Qualificação apresentado ao Centro
Universitário FEI, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de Mestre
em Engenharia de Mecânica. Orientado pelo
Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco.

São Bernardo do Campo

2022

Aos meus pais, Rosana e José Carlos, por me apoiarem e serem minha sustentação.

Ao meu irmão Rafael pela motivação e incentivo.

A minha namorada Karla por todo apoio e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela vida e pela força, determinação e condição por ele imposta para execução deste trabalho.

A Volkswagen do Brasil pela disponibilização de todos os recursos para produção dos corpos de prova.

Aos meus gestores Valdomiro Cerqueira, Jorge Eloi e Robson Freire pela disponibilização do equipamento, matéria prima e mão de obra para execução do trabalho.

Aos meus colegas César Rebelato e Felipe Lino por todo suporte com o equipamento.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco pela atenção, paciência e ensinamentos.

Aos meus pais, Rosana e José Carlos, por todo apoio antes e durante a execução do trabalho.

Ao meu irmão, Rafael, pelo apoio e motivação.

A minha namorada Karla por todo apoio e compreensão.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem vitória, nem derrota.”

Theodore Roosevelt

RESUMO

O processo Multi Jet Fusion (MJF) é uma tecnologia de manufatura aditiva pertencente ao sub-grupo PBF (Fusão em Leito de Pó), cuja patente, ainda ativa, pertence a Hewlett-Packard (HP); a empresa declara que o equipamento pode produzir peças isotrópicas até 10 vezes mais rapidamente que outras tecnologias. Por se tratar de uma tecnologia relativamente nova, há poucos estudos relacionados ao comportamento mecânico, principalmente em relação ao módulo de elasticidade e às tensões limites de escoamento, em tração e flexão, de peças obtidas pela mesma, e em nenhum deles há amostras produzidas com angulações entre o plano de deposição e a mesa de trabalho, lacuna de conhecimento que este estudo visa preencher. Outra análise que este estudo trará é se há gradiente de temperatura em diferentes posições da mesa de impressão e em que intensidade este gradiente influencia nas propriedades mecânicas. Em estudos preliminares para validação dos procedimentos de ensaio em PA 12, verificou-se distribuição de temperatura não uniforme sobre a plataforma, fato que pode ter influenciado nas diferenças consideráveis obtidas nas propriedades mecânicas e variações dimensionais de peças produzidas nas mesmas angulações, porém em posições diferentes da plataforma. Os métodos de ensaio, criados seguindo as normas ASTM D638 (Tração) e ASTM D790 (Flexão), são viáveis, levando a propriedades semelhantes às observadas na literatura. Para complementar a análise e relacionar as orientações dos corpos de prova com possíveis fatores que influenciam nas propriedades, como grau de cristalinidade, ensaios de difração de raio X serão realizados. Posteriormente aos ensaios de tração, as superfícies de fratura serão observadas em lupas estereoscópica com objetivo de relacionar o mecanismo de falha com o comportamento mecânico.

Palavras-chave: Multi Jet Fusion, comportamento mecânico, manufatura aditiva, impressão 3D, poliamida 12, PA12

ABSTRACT

The Multi Jet Fusion (MJF) process is an additive manufacturing process belonging to the Powder Bed Fusion (PBF) subgroup. MJF patent, still active, belongs to Hewlett-Packard (HP). The company declares that the equipment can produce isotropic parts ten times faster than other technologies. Considering MJF as relatively new technology, only a few studies can be found in the literature concerning mechanical behaviour, mainly related to the Young's modulus and yield strength in tension and flexural tests. There are not samples positioned in angles other than the parallel or orthogonal to the build plate in none of them. This study aims to fill in this knowledge gap. Another analysis that this study will carry on is if there is a temperature gradient in different positions of the build plate and in which intensity it influences the mechanical properties. The non-uniform temperature on the build plate has been verified during preliminary studies to validate tests procedures in PA 12. The temperature inhomogeneity could have influenced the considerable differences in mechanical properties and dimensional variations in produced parts with the same building angle, but different positions on the build plate. The tests' methods, which were created following the standards ASTM D638 (Tension) and ASTM D790 (Flexural tests), are viable, obtaining similar properties to the literature review. X-ray diffraction tests will be performed to complete the analysis and correlate the samples' orientations with factors that influence the properties, like crystallinity. After tension tests, the fracture surface will be observed in stereoscopic magnifying device to correlate the failure mechanism with the mechanical behaviour.

Keywords: Multi Jet Fusion, Mechanical Behaviour, Additive manufacturing, 3D print, polyamide 12, PA12.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Crescimento de vendas dos sistemas de manufatura aditiva entre os anos 1990 e 2000.	12
Figura 2 – Número de documentos patenteados de tecnologia FDM antes e depois da queda da patente.....	13
Figura 3 – Número de documentos patenteados de tecnologia SLS antes e depois da queda da patente.....	13
Figura 4 – Divisão do mercado da manufatura aditiva em 2017.....	17
Figura 5 – Produto de alta complexidade produzido por manufatura aditiva	18
Figura 6 – Exemplo de produto modelado em software CAD	20
Figura 7 – Diferenças de acabamento obtidos em função do número de elementos triangulares gerados em arquivos STL.....	20
Figura 8 – Tamanho do arquivo em função do número de elementos triangulares do arquivo STL	21
Figura 9 – Modelo 3D em sua forma original (esq.), dividido em camadas (centro) e processo de impressão de uma camada (dir.)	21
Figura 10 – Impressora Jet Fusion da HP e suas diversas estações.....	23
Figura 11 – Interface do software da HP mostrando peças inseridas no volume de construção (Volume azul) e alguns parâmetros a serem fixados nesta fase (lado direito da imagem).....	24
Figura 12 - Estação de construção: local onde é inserida a matéria prima e serve como base para a impressão	24
Figura 13 - Regimes de impressão e seus respectivos aportes de calor	25
Figura 14 - Comparação de requisitos dos produtos em PA12 de cada regime de impressão em relação ao balanced.....	26
Figura 15 - Estação de processamento da HP 4200 Jet Fusion	27
Figura 16 - Impressora 3D HP 4200 Jet Fusion	28
Figura 17 - Processo MJF mostrado passo a passo	29
Figura 18 - Cabeçote integrado: aplicação dos agentes e fornecimento de energia infravermelho.....	29
Figura 19 – Sistemas de lâmpadas do processo MJF	30
Figura 20 – Fase de aquecimento – Luzes sobre a plataforma de impressão (esq.) e controle do processo no computador da impressora (dir.).....	31
Figura 21 - Formação de frentes de pó opostas	32
Figura 22 – Porção de agentes depositada sobre o leito de pó antes do início da impressão...	32

Figura 23 – Bolacha formada em todo início de impressão do processo MJF	33
Figura 24 - Agentes aplicados sobre camada de pó durante processo de impressão.....	34
Figura 25 – Superfície onde é despejado o excesso de agentes limpa (a). Superfície onde é despejada o excesso de agentes após aplicação de uma camada (b). Tecido de limpeza dos cartuchos na extremidade direita da máquina (c)	34
Figura 26 - Processo de recozimento após a impressão	35
Figura 27 - Sistema de aspiração de pó não utilizado para formação de peças.....	36
Figura 28 - Estação de pós processamento por jateamento de esferas de vidro.....	37
Figura 29 - Produto impresso antes (esq.) e depois (dir.) do pós processamento	37
Figura 30 - Aplicação dos agentes e sua penetração na camada de pó (matéria prima) anteriormente aplicada.....	39
Figura 31 – Cromatograma de íons totais dos agentes de fusão e detalhamento	39
Figura 32 – Espectro infravermelho agente de fusão x agente de detalhamento	42
Figura 33 – Comparação das Poliamidas 12: (a) – SLS, (b) MJF Nova e (c) MJF reutilizada	44
Figura 34 - Comparação espectro infravermelho da PA12 virgem e reciclada do processo MJF	44
Figura 35 – Difratoograma de raios-X – PA 12 nova x PA 12 reutilizada (Processo MJF)	45
Figura 36 – Difratoogramas de raios-X – Pó virgem x Peça impressa.....	46
Figura 37 - Rugosidade antes (à esquerda) e depois (à direita) do pós processamento por jateamento de esferas de vidro.....	47
Figura 38 – Posições de impressão nos cantos e no centro da plataforma de impressão	48
Figura 39 - Gradiente de temperatura na plataforma de impressão.....	50
Figura 40 – Imagem de SEM para análise da existência de poros nas amostras impressas nas diferentes posições.....	51
Figura 41 – Índice de cristalinidade obtido para cada amostra	52
Figura 42 – Quantidade de poros com diâmetro d em diferentes direções impressas em tecnologia MJF e SLS	53
Figura 43 - Espectro infravermelho da PA12 obtido.....	54
Figura 44 - Termograma de aquecimento e resfriamento da PA 12.....	55
Figura 45 - Termograma DSC da PA 12 e PA12 com reforço de esferas de vidro.....	56
Figura 46 – Componente industrial impresso do qual foram retiradas amostras para ensaio de tração	57
Figura 47 - Direções de impressão estudadas pela fabricante e nos artigos de O’Connor.....	59
Figura 48 – Posicionamento dos corpos de prova no estudo de Calignano et. al. (2021).....	60

Figura 49 – Comparação de módulos de elasticidade obtidos em diferentes estudos e diferentes direções de impressão	61
Figura 50 - Comparação de tensões limite de resistência obtidos em diferentes estudos e diferentes direções de impressão	63
Figura 51 - Comparação dos alongamentos obtidos em diferentes estudos e diferentes direções de impressão	64
Figura 52 - Área máxima a ser sinterizada em cada direção de impressão por passe	66
Figura 53 - Posicionamento dos corpos de prova em relação aos eixos X, Y e Z.....	66
Figura 54 - Direções de impressão em processo SLS	67
Figura 55 – Direções mais e menos resistentes em ensaios de peças produzidas por processo SLS	68
Figura 56 - Tensão verdadeira na ruptura em cada direção impressa	69
Figura 57 – Relação da Porosidade (%) com a Tensão de resistência a flexão.....	71
Figura 58 - Análise da superfície de fratura em corpos de prova produzidos por MJF	71
Figura 59 - Comparação da superfície de fratura de peças produzidas por SLS (a e b) x MJF (c e d).....	72
Figura 60 - Corpo de prova de tração modelado	74
Figura 61 – Corpo de prova de flexão modelado	74
Figura 62 – Corpos de prova de tração (esq.) e flexão (dir.) usados como referência e eixos de rotação para criação de direções de impressão	75
Figura 63 - Distribuição dos corpos de prova do subgrupo A para tração e flexão	76
Figura 64 - Distribuição dos corpos de prova do subgrupo B para tração e flexão	76
Figura 65 - Distribuição dos corpos de prova do subgrupo C para tração e flexão	77
Figura 66 - Posicionamento dos grupos de impressão em relação a estação de construção (cuba) – Vista superior	78
Figura 67 – Corpo de prova teste com variação de profundidades de marcação	82
Figura 68 – Corpo de prova no magic's com exemplo de marcação de identificação	83
Figura 69 - Distribuição de todos os corpos de prova de tração na cuba de impressão	83
Figura 70 – Distribuição de todos os corpos de prova de flexão na cuba de impressão	84
Figura 71 – Análise de espessuras realizada automaticamente pelo software sem erros identificados (a). Parâmetros de impressão (b)	85
Figura 72 – Posições das medições dos corpos de prova	87
Figura 73 – Processo de zeragem da carga no software	88
Figura 74 - Processo de ajuste fino da carga	89

Figura 75 - Extensômetro utilizado no ensaio de tração - 50 mm com deformação máxima de 100%	90
Figura 76- Processo de zeragem da deformação no software	90
Figura 77 - Condição extrema em flexão não ocorrendo ruptura da amostra	92
Figura 78 - Final do ensaio de flexão com 10 mm de flecha	92
Figura 79 – Distribuição de temperaturas em diferentes momentos do processo e visualização do leito de impressão no mesmo momento - Tração	95
Figura 80 - Distribuição de temperaturas em diferentes momentos do processo e visualização do leito de impressão no mesmo momento - Flexão	95
Figura 81 – Corpos de prova de tração extraídos da cuba antes da fase de pós processamento	96
Figura 82 – Corpos de prova de flexão extraídos da cuba antes da fase de pós processamento	97
Figura 83 – Diferença na quantidade de pó segregado sobre as superfícies das peças impressas próximas a parede fronta e traseira.....	98
Figura 84– Amostras do grupo 1 antes e depois da fase de pós processamento	99
Figura 85 – Variação de comprimento x Posição de impressão para os CP's de tração	100
Figura 86 - Variação de comprimento x Posição de impressão para os CP's de flexão	100
Figura 87 - Variação de Largura x Posição de impressão para CP's de tração.....	101
Figura 88 - Variação de Largura x Posição de impressão para CP's de flexão.....	102
Figura 89 - Variação de Espessura x Posição de impressão para CP's de tração.....	103
Figura 90 - Variação de Espessura x Posição de impressão para CP's de flexão	103
Figura 91 – Comparação de comprimentos obtidos entre as paredes frontal e traseira para cuba de tração	104
Figura 92 - Comparação de comprimentos obtidos entre as paredes frontal e traseira para cuba de flexão	105
Figura 93 - Comparação de larguras obtidos entre as paredes frontal e traseira para tração .	106
Figura 94 - Comparação de larguras obtidos entre as paredes frontal e traseira para flexão .	106
Figura 95 - Comparação de espessuras obtidos entre as paredes frontal e traseira para tração	107
Figura 96 - Comparação de espessuras obtidos entre as paredes frontal e traseira para flexão	108
Figura 97 - Curvas tensão x deformação dos ensaios testes de tração	109

Figura 98 - Falta de aderência entre reta do módulo de elasticidade e curva do ensaio de tração	112
Figura 99 – Curvas tensão x deformação dos ensaios testes de flexão	113
Figura 100 - Aderência entre reta do módulo de elasticidade e curva do ensaio de flexão ...	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação das composições do agente de detalhamento obtidas na literatura com fabricante.	41
Tabela 2 - Comparação das composições do agente de fusão obtidas na literatura com fabricante.	41
Tabela 3 - Comparação de rugosidades entre processos (MJF e SLS) e faces (superiores e inferiores).....	48
Tabela 4 – Rugosidades obtidas nas faces dos cubos impressos em 5 posições diferentes	49
Tabela 5 – Porosidade das peças produzidas em cada uma das 3 direções	50
Tabela 6 – Picos do ensaio infravermelho e respectivas descrições.....	54
Tabela 7 – Comparação das propriedades térmicas obtidas nos estudos de 2018 e 2019	56
Tabela 8 - Propriedades mecânicas de peças de poliamida 12 produzidas por MJF. Variações de medidas são calculadas comparando-as com as medidas dos corpos XY extraídos do componente.....	58
Tabela 9 – Comparação dos módulos de elasticidade obtidos em diferentes estudos.....	62
Tabela 10 – Comparação das tensões limite de resistência obtidos em diferentes estudos.....	63
Tabela 11 - Comparação dos alongamentos na ruptura em diferentes estudos	64
Tabela 12 – Propriedades obtidas por ensaio de tração em diferentes posições de impressão com resfriamento natural	65
Tabela 13 – Propriedades mecânicas obtidas por ensaio de flexão em peças produzidas por MJF.....	70
Tabela 14 - Comparação de propriedades mecânicas obtidas por processos SLS e MJF	72
Tabela 15 – Nomenclatura dos corpos de prova do grupo 1	79
Tabela 16 - Nomenclatura dos corpos de prova do grupo 2.....	79
Tabela 17 - Nomenclatura dos corpos de prova do grupo 3.....	80
Tabela 18 - Nomenclatura dos corpos de prova do grupo 4.....	80
Tabela 19 - Nomenclatura dos corpos de prova do grupo 5	81
Tabela 20 - Nomenclatura dos corpos de prova do grupo 6.....	81
Tabela 21 - Propriedades obtidas em tração para as amostras teste	110
Tabela 22 - Propriedades obtidas em flexão para as amostras teste	113
Tabela 23 – Cronograma de próximas etapas.....	118

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 MANUFATURA ADITIVA	11
2 OBJETIVOS	15
3 REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1 MANUFATURA ADITIVA	16
3.1.1 Processamento.....	19
3.1.2 Processo Multi Jet Fusion	22
3.1.3 Conceito de Voxel	38
3.1.4 Agente de fusão e detalhamento	38
3.1.5 Propriedades obtidas em peças de Poliamida 12 produzidas por MJF.....	42
4 METODOLOGIA.....	74
4.1 CORPOS DE PROVA, POSICIONAMENTO E NOMENCLATURA	74
4.2 IMPRESSÃO, PÓS PROCESSAMENTO, MEDIÇÃO E ENSAIO DOS CORPOS DE PROVA.....	84
5 RESULTADOS PARCIAIS E DISCUSSÃO	94
5.1 TEMPERATURA NO LEITO DE IMPRESSÃO.....	94
5.2 AVALIAÇÃO VISUAL – ANTES E DEPOIS DO PÓS PROCESSAMENTO.....	96
5.3 MEDIÇÃO DE COMPRIMENTO, LARGURA E ESPESSURA.....	99
5.4 ENSAIOS DE TRAÇÃO – TESTE.....	109
5.5 ENSAIOS DE FLEXÃO - TESTE.....	112
6 CONCLUSÕES PARCIAIS	116
7 Próximas etapas	118
REFERÊNCIAS	119

1 INTRODUÇÃO

Desde os seus primórdios, os seres humanos vêm buscando e conseguindo aprimorar a forma de viver buscando alternativas que possam melhorar a sobrevivência ou até mesmo garantir mais conforto. Tal logro se deve ao fato de possuírem os materiais necessários para converter todas as ideias de melhoria em realidade. Para confirmar a importância dos materiais, pode-se verificar que a evolução humana é datada cronologicamente através dos materiais disponíveis na época: idade da pedra, idade do bronze, idade do ferro, entre outros (HAGE, 1998).

Os materiais poliméricos ganharam força neste século e revolucionaram os setores automotivos, aéreo, de embalagens e na medicina. Além disso, pode-se dizer que foram responsáveis por grande parte das mudanças tecnológicas, visto que surgiram como materiais alternativos e ganharam muito espaço no mundo (HAGE, 1998).

Para acompanhar os avanços dos materiais, os processos de produção também devem evoluir e ser cada vez mais versáteis e personalizáveis para atender as expectativas dos clientes quanto ao nível de qualidade, volume de produção e tempo.

Nesse contexto observa-se que as empresas buscam cada vez mais aderir aos conceitos da indústria 4.0, que possui como um de seus pilares o processo de manufatura aditiva.

1.1 MANUFATURA ADITIVA

Mais conhecido como impressão 3D, a manufatura aditiva é um processo controlado por computador extremamente versátil e inovador que permite produzir modelos de geometrias muito complexas, e por isso, é muito utilizado para produção de protótipos.

O processo consiste em gerar um modelo físico a partir de um modelo digital que pode ser desenhado em software de CAD ou até mesmo gerado a partir de um escaneamento 3D. Este modelo digital é enviado a um software chamado *slicer*, que traduzido ao português seria um fatiador. Este software tem como objetivo dividir o modelo matemático em várias camadas e o transformar em linhas de programa com coordenadas, por exemplo no formato *G-code*.

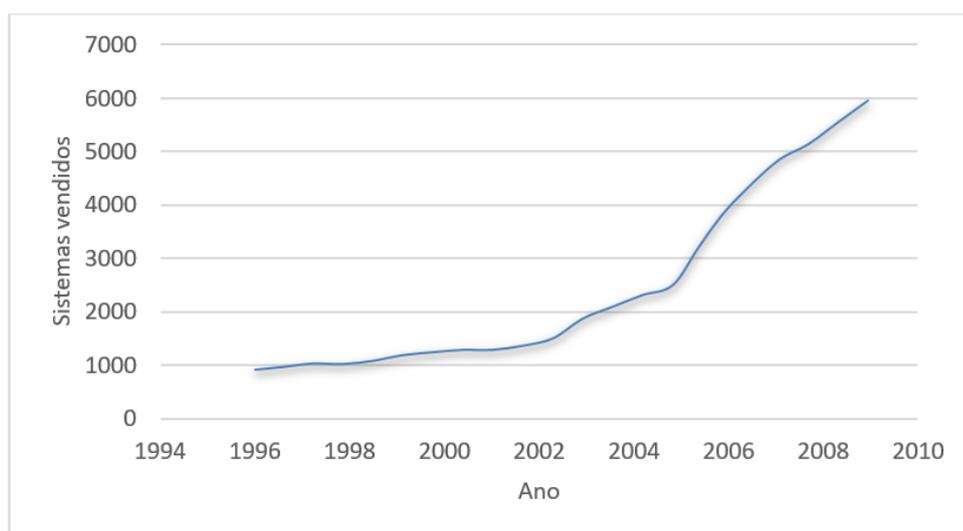
Este programa é enviado ao equipamento de manufatura aditiva, ou impressora 3D, que movimenta seus eixos conforme as coordenadas definidas no programa e forma o produto adicionando material (daí a nomenclatura manufatura aditiva) camada a camada até obtê-lo em sua forma final (WISHBOX, 2015).

O fato de o produto ser formado a partir de várias camadas pode levar à obtenção de propriedades diferentes ao ensaiar o material produzido em diferentes direções de deposição com relação a eixos principais do produto, ou seja, as diferentes direções de impressão podem gerar anisotropia de propriedades.

A manufatura aditiva está em alta atualmente devido ao fato de as empresas buscarem constantemente a atualização e inserção no mundo da indústria 4.0. Entretanto, esse processo não é tão atual assim. A impressão 3D foi criada em 1984 por Charles (Chuck) Hull e patenteada em 1986. Charles Hull patenteou a ideia com o nome de estereolitografia, mais conhecida como SLA. Ainda em 1986 surgiu uma nova tecnologia de manufatura aditiva criada por Carl Deckard, a sinterização seletiva a laser, mais conhecida como SLS. No ano de 1989, Scott Crump criou a tecnologia FFF, fabricação por fusão de filamento, que atualmente é a mais difundida de todas. Apesar da criação na década de 1980, nesta época o processo de impressão 3D não era muito utilizado dada a dificuldade de aplicação e por apresentar à época alto custo (WISHBOX, 2015).

Em meados dos anos 2000 começou a ser mais utilizado, como pode ser verificado na Figura 1, momento esse em que algumas empresas produtoras de impressoras 3D começaram a surgir expandindo assim o conhecimento de tal tecnologia (3DLAB, 2021) (WONG; HERNANDEZ, 2012).

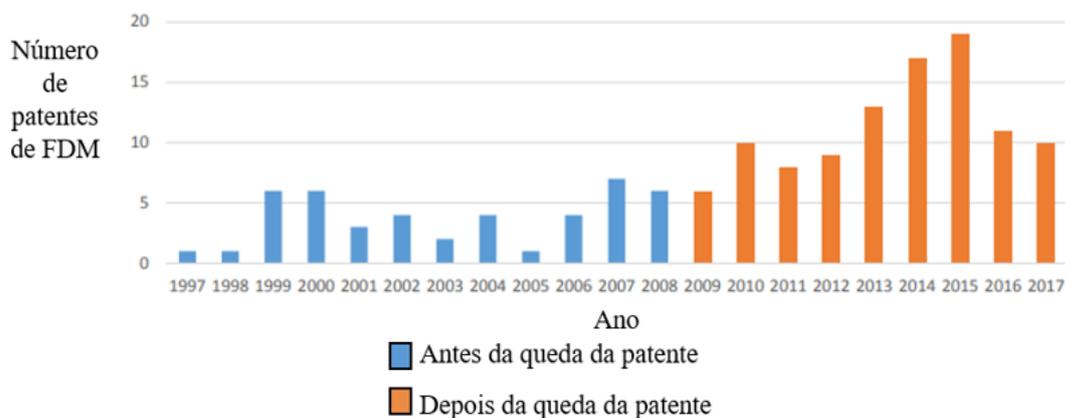
Figura 1 – Crescimento de vendas dos sistemas de manufatura aditiva entre os anos 1990 e 2000.



Fonte: WONG; HERNANDEZ, 2012

Um dos motivos desse crescimento foi a queda da patente da tecnologia de impressão 3D mais difundida no mercado chamada de modelagem por fusão e deposição a fio, conhecida como FDM (Fused Deposition Manufacturing, na nomenclatura da então detentora da patente, a empresa Stratasys) ou FFF (Fused Filament Fabrication), no ano de 2009. Tal patente protegia a tecnologia desde o seu surgimento nos anos 1980. Dessa forma, observa-se pela Figura 2 o aumento dos documentos patenteados após a perda do monopólio (PITÁGORA; ARAÚJO, 2017).

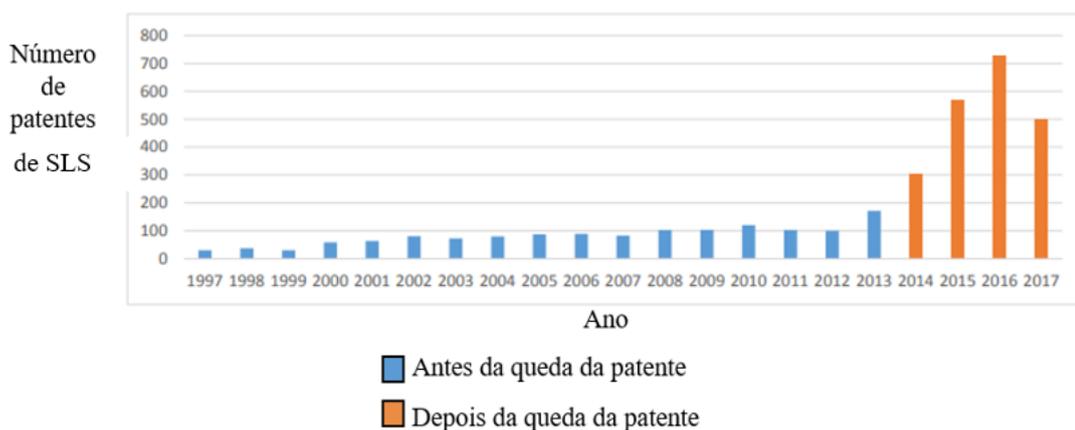
Figura 2 – Número de documentos patenteados de tecnologia FDM antes e depois da queda da patente.



Fonte: PITÁGORA; ARAÚJO, 2017

O mesmo ocorreu em 2014 com a queda da patente da tecnologia de sinterização seletiva a laser, mais conhecida como SLS, como pode-se verificar no gráfico da Figura 3.

Figura 3 – Número de documentos patenteados de tecnologia SLS antes e depois da queda da patente



Fonte: PITÁGORA; ARAÚJO, 2017

Atualmente, os processos SLA, SLS e FFF representam cerca de 95% do mercado da impressão (WISHBOX, 2015), sendo o último o mais difundido. Dentro dos 5% restantes, está o processo ao qual este estudo se refere, o Multi Jet Fusion (MJF), cuja patente pertence à HP (Hewlett-Packard), depositada em 2014 (ADACH; SOKOLOWSKI; PIWOWARCZYK; NOWAK, 2021).

A aplicação da manufatura aditiva vem crescendo muito no que diz respeito às aplicações e na quantidade de tecnologia difundida nos últimos anos devido aos avanços tecnológicos e à necessidade das empresas em personalizar seus produtos e atender uma gama cada vez maior de clientes. Entretanto, ainda é considerado um processo lento se comparado a outros de processamento, especialmente de materiais poliméricos, como por exemplo injeção e, por isso, inviável para produção seriada de alto volume.

Observando, porém, outros setores (como por exemplo os de desenvolvimento), pode-se verificar muita utilidade no uso da impressão 3D, já que utilizam a prototipagem rápida a fim de evitar erros desnecessários e acelerar o processo de desenvolvimento.

Apesar do fator velocidade ainda prejudicar a utilização da manufatura aditiva para produção em maiores volumes de partes de uso final, essa forma de uso da tecnologia vem crescendo cada vez mais devido aos estudos e avanços com objetivo de eliminar operações subsequentes, melhorias de propriedades mecânicas, capacidade de customização e estudos para utilização de mais materiais, inclusive metálicos.

2 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo produzir, pelo processo MJF, corpos de provas para ensaios mecânicos de poliamida 12 em diferentes direções em relação ao plano de trabalho da mesa de impressão, com 100% de preenchimento, e realizar ensaios de tração e flexão para verificar se há anisotropia de propriedades e em qual intensidade, visando otimizar do ponto de vista de propriedades mecânicas o projeto de partes produzidas por este processo.

Como objetivos específicos, busca-se avaliar a influência dos posicionamentos de deposição com relação ao eixo de solicitação mecânica, avaliando também as propriedades mecânicas dos corpos de provas produzidos em regiões próximas das paredes frontal e traseira da cuba de impressão, o que pode ocasionar diferenças nas taxas de resfriamento impostas às partes impressas, visando avaliar se há influência também desta variável na anisotropia de propriedades.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos teóricos sobre manufatura aditiva, seus avanços e tendências, a forma de processamento, apresentação da tecnologia de impressão multi jet fusion (MJF), conceito de voxel, conceitos dos agentes de fusão e detalhamento e resultados obtidos com estudos até então realizados no processo MJF.

3.1 MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva, como já dito anteriormente, transforma um modelo desenhado em software de CAD em modelo físico com adição de material camada a camada, que são geradas por um software que tem a função de fatiar o modelo computacional e gerar coordenadas para o deslocamento dos eixos da máquina nas posições de deposição de material.

Essa tecnologia vem sendo cada vez mais utilizada pelas indústrias com o objetivo de aprimorar seus processos e buscar a inserção no conceito da digitalização e indústria 4.0, visto que tal tecnologia é considerada característica básica para tal objetivo. Em outras palavras, a impressão 3D é utilizada cada vez mais para vencer o desafio da competitividade do mercado, dada a possibilidade de manufaturar produtos que atendam a personalização solicitada pelo cliente ou aplicação. Na maioria dos casos, é aplicada nas fases de desenvolvimento do produto (prototipagem rápida) com objetivo de produzir protótipos funcionais e, dessa forma, reduzir o tempo e o custo de tal fase, já que há pouco desperdício de material e praticamente nenhum custo com ferramental específico (BHUVANESH; SATHIYA, 2021).

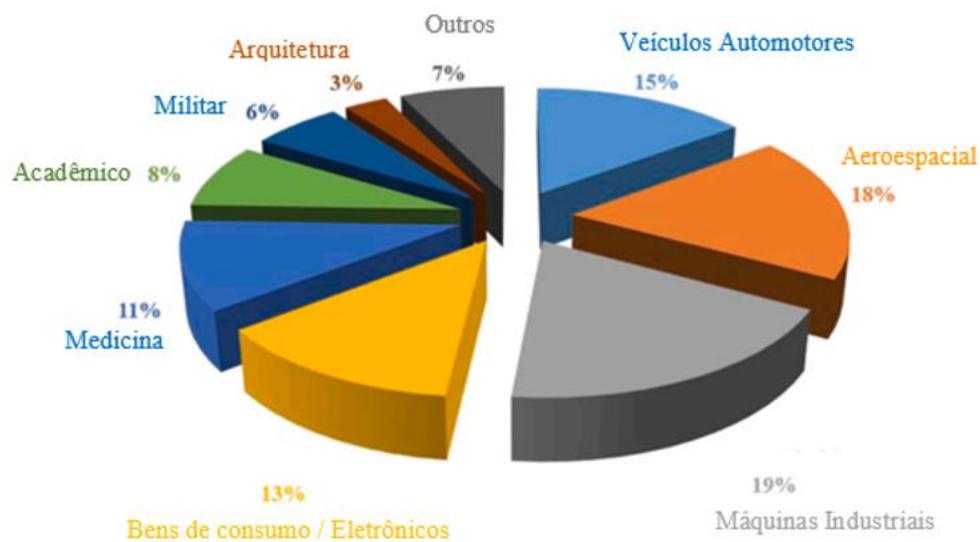
Observando a manufatura aditiva da perspectiva da produção de peças para uso final, sua utilização é muito interessante do ponto de vista da personalização, e pelo fato de apresentar pouco desperdício de material. Entretanto, se comparado a outros processos de produção, como por exemplo injeção, extrusão ou estampagem, tem como desvantagem menor volume de produção por unidade de tempo disponível.

A impressão 3D vem sendo cada vez mais utilizada nas mais diversas aplicações, inclusive em protótipos e componentes nas indústrias aeroespacial e automobilística. Neste estudo serão tratadas com mais ênfase as aplicações no ramo industrial.

Tanto na indústria aeroespacial como na indústria automobilística, a redução de peso dos componentes é tida como meta, visto que afeta diretamente o consumo do veículo ou da aeronave. Isso pode ser evidenciado no estudo da companhia de defesa aeronáutica e espaço (EADS) que utilizou a sinterização a laser de metais para produzir os suportes de uma dobradiça

e atingiu uma redução de 64% de massa sem modificar o desempenho e a resistência (ALTIPARMAK; XIAO 2021). Dessa forma, o uso da impressão 3D torna-se interessante dada a possibilidade de produzir peças leves, com geometrias complexas e bem estruturadas (WONG; HERNANDEZ, 2012). Devido a isso, como pode ser visto na Figura 4, os setores aeroespacial e automobilístico representam grande parte do mercado da manufatura aditiva, com 18% e 15% de participação, respectivamente.

Figura 4 – Divisão do mercado da manufatura aditiva em 2017



Fonte: ALTIPARMAK; XIAO, 2021

Um caso interessante de se apresentar é o do desenvolvimento de um protótipo de motor a jato realizado pelo instituto de pesquisa de turbinas a gás utilizando uma máquina de deposição a fio (FDM) da Stratasys. Em uma turbina fabricada por métodos convencionais, há mais de 2500 peças na montagem e por tal complexidade o desenvolvimento do protótipo poderia demorar até 1 ano e com um custo aproximado de US\$ 60 mil. Utilizando a tecnologia de manufatura aditiva, o tempo foi reduzido para 6 semanas e o custo reduzido para um terço, chegando a US\$ 20 mil (LIU et.al, 2017).

A manufatura aditiva é o processo de manufatura mais comentado nos últimos anos, o que vem crescendo mais rápido e o que possibilita maior possibilidade de projetos geométricos mais arrojados e complexos (HERDERICK, 2015).

O fato de existirem vários processos diferentes de impressão 3D faz com que existam particularidades provenientes de cada um deles relacionadas às propriedades mecânicas,

térmicas e químicas dos materiais. Ou seja, os avanços de tal tecnologia não se devem somente a evolução do processo de manufatura, mas também a sinergia existente entre o processo e os materiais (HERDERICK, 2015). Como já citado, a impressão 3D ainda é mais aplicada na fase de concepção do produto do que na produção propriamente dita. Entretanto, pouco a pouco vai se modificando o paradigma, de prototipagem rápida para manufatura rápida, sendo capaz de produzir peças complexas que outros processos não são capazes de produzir, e com pouco desperdício de material, possibilitando assim maior poder de inovação das empresas com custos de matéria-prima menores. Dessa forma, observa-se a contribuição que este processo tem com o conceito de indústria 4.0, buscando a personalização dos produtos, reduzindo custos, reduzindo tempo de desenvolvimento e produção, e assim aumentando a competitividade do negócio (HALEEM; JAVAID, 2019).

Um exemplo de produto produzido por manufatura aditiva é o solado do tênis esportivo apresentado na Figura 5. Devido a complexidade de forma é impossível obtê-lo por outro processo, confirmando a capacidade de customização e de produção de formas extremamente complexas da impressão 3D.

Figura 5 – Produto de alta complexidade produzido por manufatura aditiva



Fonte – Autor

Apesar dos inúmeros benefícios, a manufatura aditiva não garante amplitude de propriedades para a indústria 4.0 devido a limitações com as opções de materiais e a necessária otimização em caso de produção em massa. Além disso, o elevado custo das máquinas atuais é outro empecilho da indústria 4.0. (HALEEM; JAVAID, 2019).

Apesar da gama de aplicações que motivam o desenvolvimento da manufatura aditiva, muitos avanços são necessários para evolução do processo, como por exemplo, os materiais, o custo, produtividade e conceitos das tecnologias de impressão.

Com os avanços e o surgimento de novas tecnologias de manufatura aditiva surgiu também, para os pesquisadores, dificuldades de se criar padrões de testes, projeto de partes e métodos experimentais devido as diferenças entre cada um dos processos.

Outro ponto que seguramente será alvo de muitas pesquisas é o balanço entre a velocidade de produção e a resolução visto que hoje tem-se tecnologias muito precisas que tem sua aplicação limitada devido à baixa velocidade de execução, como é o caso da técnica FFF. Por outro lado, há outras com altas taxas de deposição, porém necessitam de grandes trabalhos de finalização devido à baixa resolução geométrica.

Além desses desafios já citados, tem-se um problema muito comum na manufatura aditiva: a formação de vazios durante a formação do produto. Essa situação faz com que a interface entre as camadas subsequentes seja reduzida, e após a impressão, ocorra delaminação das camadas. Somado a isso, há o fato de que há notórias diferenças entre a parte interna e a borda do material, fato esse que leva a formação de uma microestrutura anisotrópica. Tais problemas fazem com que o material tenha respostas diferentes quando recebe carregamentos em direções diferentes daquelas pertencentes ao plano de deposição principal (BHUVANESH; SATHIYA, 2021).

3.1.1 Processamento

No universo da impressão 3D existem várias tecnologias diferentes para construção das peças. O processo que as diferencia é a fase de adição de material propriamente dita. Dessa forma, pode-se entender que há fases que são comuns para todos os processos. Neste capítulo, tais fases serão listadas e explicadas de forma a esclarecer as semelhanças entre os processos de manufatura aditiva.

A primeira etapa do processo é a de concepção do produto, na qual a peça será modelada em software de CAD com as especificações, dimensões entre outros requisitos de engenharia que devem ser atendidos de acordo com a aplicação do produto (ENGINEERING PRODUCT DESIGN, 2017). A Figura 6 exemplifica um produto modelado em CAD, com coordenadas tridimensionais.

Figura 6 – Exemplo de produto modelado em software CAD

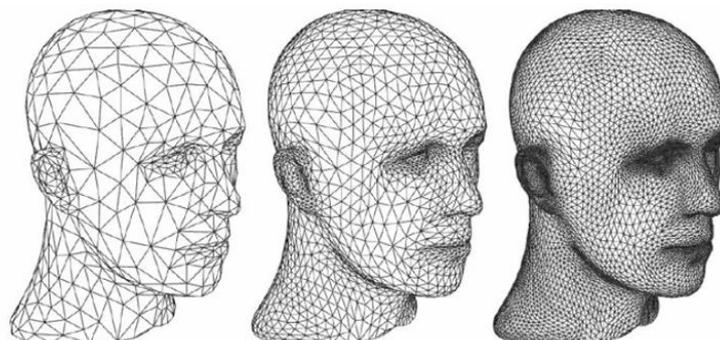


Fonte: Engineering Product Design, 2017

Como já citado anteriormente, o princípio básico da manufatura aditiva é a impressão do produto camada a camada até a sua forma final. Dessa forma, é necessário que o modelo 3D gerado seja fatiado e dividido nas tais camadas. Para tanto, o projeto CAD é enviado a um software que possui essa finalidade, o fatiador. (ENGINEERING PRODUCT DESIGN, 2017).

Entretanto, anteriormente a inserção no software fatiador, o modelo é convertido em uma extensão chamada *standard tessellation language*, mais conhecida como STL. A ideia central de tal extensão é dividir as superfícies desenhadas em pequenos triângulos e gerar uma programação específica onde cada vértice de cada triângulo possui uma coordenada específica (ALL3DP, 2021) (WONG; HERNANDEZ, 2012). Entretanto, como a superfície é aproximada e formada por uma quantidade de triângulos a mesma pode ficar com pequenas facetadas que podem ser alisadas quanto maior for a quantidade de triângulos criados, como mostra a Figura 7, ou seja, o arquivo STL pode ser otimizado aumentando a quantidade de triângulos que formam as superfícies.

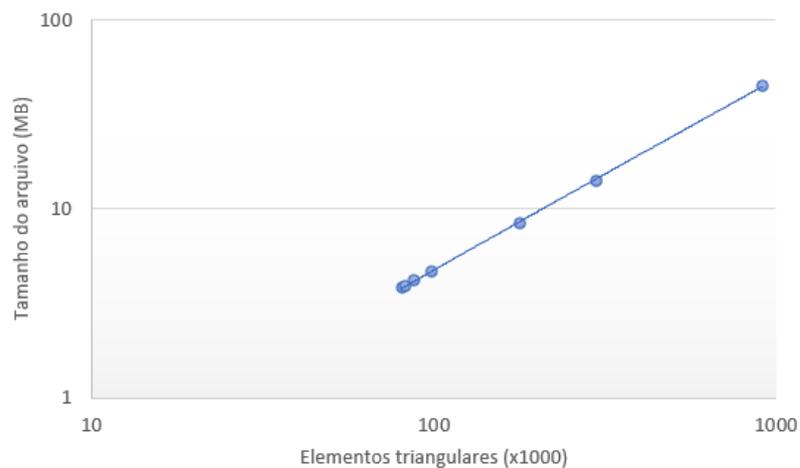
Figura 7 – Diferenças de acabamento obtidos em função do número de elementos triangulares gerados em arquivos STL



Fonte: 3DLAB

Obviamente, quanto maior a quantidade de formas, maior o tamanho do arquivo, como mostrado na Figura 8, e em determinado momento isso pode se tornar um fator limitante para o processamento.

Figura 8 – Tamanho do arquivo em função do número de elementos triangulares do arquivo STL



Fonte: HP MJF Handbook, 2019

Após a conversão em STL o arquivo é transferido ao fatiador, que é responsável por dividi-lo em camadas para o processamento na impressora. Neste software, além do modelo fatiado, como exemplificado na Figura 9, alguns parâmetros como espessura da camada e parâmetros de deposição do material são definidos.

Figura 9 – Modelo 3D em sua forma original (esq.), dividido em camadas (centro) e processo de impressão de uma camada (dir.)



Fonte: ALL3DP

Posterior a fase de produção, tem-se a fase de remoção da cuba de impressão ou da mesa de impressão (a depender de cada tecnologia). Nessa fase do processo a peça passa pelo resfriamento que também depende de cada tecnologia aplicada.

Após a remoção, deve-se realizar o pós-processamento, fase na qual objetiva-se eliminar qualquer parte ou resíduo gerado no processo de impressão e que não faz parte do produto final. Tal fase seria a última e, portanto, após finalizada, obtém-se o produto final.

3.1.2 Processo Multi Jet Fusion

O processo Multi Jet Fusion (MJF) é uma tecnologia criada e patenteada pela Hewlett – Packard (HP). Tal tecnologia foi inserida no mercado em 2016 (KAUPPILA, 2021). O processo MJF, dentro do grande grupo da manufatura aditiva, pertence ao sub-grupo de impressão em leito de pó, mais conhecido como PBF (*Power Bed Fusion*), dentro do qual também se encontram as tecnologias *binder jetting* e SLS. Alta produtividade (até 10 vezes mais rápido) e menor custo por unidade de volume em termos de consumo de energia e material, são vantagens que o processo MJF apresenta sobre os seus concorrentes do sub-grupo PBF. Além disso, a precisão dimensional em MJF é maior do que nos outros processos correspondentes. (SAGBAS et. al., 2021).

Os processos PBF tem uma característica importante e apresentada como vantagem que é o fato de ocorrerem sobre um leito de pó, o que torna desnecessário a produção de suportes que podem prejudicar a qualidade superficial, a precisão dimensional, além de consumir material (SAGBAS et. al., 2021).

Essa tecnologia é capaz de produzir peças funcionais, declaradamente isotrópicas e com baixo custo por peça e de forma rápida (até 10 vezes mais rápido que os correspondentes do sub-grupo PBF) quando comparada com os outros processos de manufatura aditiva existentes. Entretanto, por ser um processo relativamente novo sua gama de materiais ainda é pequena.

Segundo a fabricante, tal tecnologia é capaz de produzir peças de forma muito precisa e controlada. Porém, para isso, algumas recomendações devem ser seguidas, e a primeira delas é controle de temperatura do ambiente onde se encontra o equipamento, o qual deve estar entre 20°C e 30°C para que sejam evitadas flutuações térmicas que prejudiquem o dimensional das peças. Além da temperatura, a umidade relativa do ambiente também deve ser controlada e estar no intervalo de 30% a 70%. Entretanto, a depender do material e suas propriedades, este intervalo pode variar, como é caso da poliamida 12, para a qual a fabricante indica deixar o ambiente com 50% a 70% de umidade relativa (HP, 2019).

Como pode-se verificar na Figura 10, a impressora HP jet fusion 4200 é bem robusta e composta por diferentes estações, que serão detalhadas na sequência. São elas: a impressora, estação de construção e estação de processamento com resfriamento acelerado.

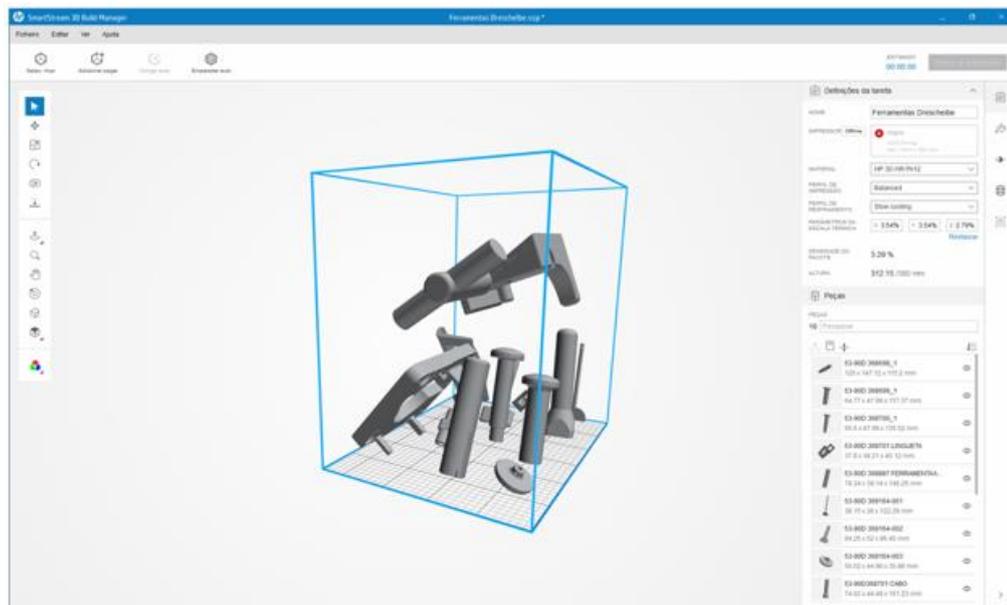
Figura 10 – Impressora Jet Fusion da HP e suas diversas estações



Fonte: HP

O primeiro passo do processo de impressão utilizando a tecnologia MJF da HP é a preparação do projeto a ser impresso utilizando o software da própria fabricante, cuja interface é mostrada na Figura 11, e que permite inclusive checar erros e problemas de espessuras de paredes das peças além de posicionar as peças a serem produzidas no volume de impressão, o qual é a parte interna da estação de construção (ou cuba de impressão), que pode ser vista na Figura 12.

Figura 11 – Interface do software da HP mostrando peças inseridas no volume de construção (Volume azul) e alguns parâmetros a serem fixados nesta fase (lado direito da imagem)



Fonte: Autor

Figura 12 - Estação de construção: local onde é inserida a matéria prima e serve como base para a impressão

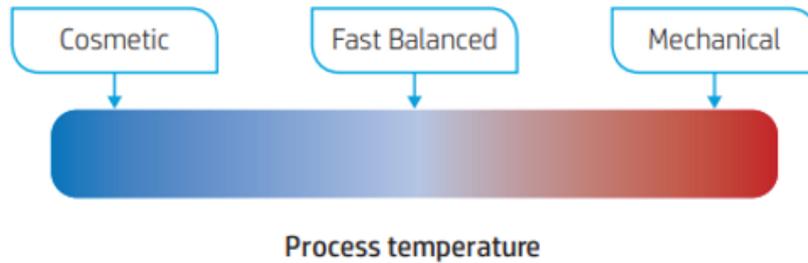


Fonte: HP

Além da verificação de erros e posicionamento, é nesta fase que se seleciona o regime utilizado no processo de impressão e o material a ser utilizado. O regime de impressão é composto por combinações de parâmetros de processo que ditam o tempo de impressão, a qualidade da peça impressa e as propriedades obtidas. Na HP MJF 4200 existem 4 regimes: *cosmetic*, *fast*, *balanced* e *mechanical*. A diferença, basicamente, está na temperatura imposta

ao material, de forma que a temperatura cresce conforme a ordem acima apresentada, como pode se observar na Figura 13 (HP, 2019).

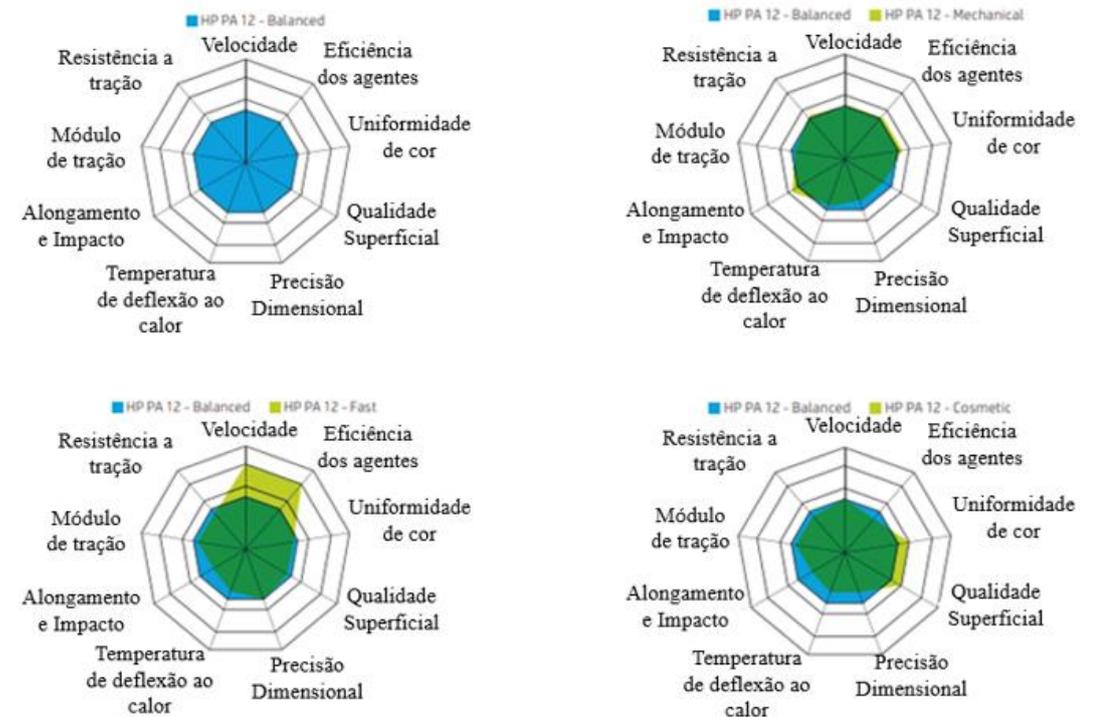
Figura 13 - Regimes de impressão e seus respectivos aportes de calor



Fonte: HP MJF Handbook, 2019

Dessa forma, como pode-se observar, o regime *cosmetic* recebe uma menor temperatura durante o processo o que faz com que o mesmo possua uma sinterização menos eficiente e, por consequência, propriedades mecânicas inferiores. Entretanto, com este regime é possível se obter uma coloração mais uniforme da peça. Já o regime *mechanical* recebe uma temperatura mais alta e com isso obtém-se uma sinterização mais eficiente que proporciona propriedades mecânicas mais elevadas comparadas ao regime *cosmetic*. Porém, o fato de receber aportes térmicos maiores cria a possibilidade de pó sobressalente ficar segregado na superfície além de aumentar a chance de ocorrer empenamento nas peças. Os regimes *fast* e *balanced* se colocam em uma posição intermediária de aportes de calor. O regime *balanced* proporciona peças com boa harmonia entre propriedades mecânicas e acabamento. Seu tempo de processamento, entretanto, é mais elevado. Esse detalhamento pode ser observado na Figura 14 na qual são comparados os regimes de impressão (HP, 2019).

Figura 14 - Comparação de requisitos dos produtos em PA12 de cada regime de impressão em relação ao balanced.



Fonte: HP MJF Handbook, 2019

Com o trabalho no software realizado, a estação de construção é inserida na estação de processamento mostrada na Figura 15, local onde a mesma é abastecida com a matéria prima em pó. Porém, para que tal operação seja realizada, é necessário que a cuba esteja limpa e sem resquícios de pó de processos anteriores. Além disso, a estação de processamento conta com um sistema de peneira que serve como um filtro evitando que impurezas passem para a matéria prima no momento da aspiração do pó que será reutilizado, e portanto, esta peneira deve ser limpa e o processo de carregamento da cuba só se dá após este processo ser finalizado.

Figura 15 - Estação de processamento da HP 4200 Jet Fusion



Fonte: Autor

Neste momento, é interessante apresentar que a tecnologia MJF da HP trabalha com uma matéria-prima misturada, isto é, a matéria prima utilizada é composta em parte por pó virgem e em parte por pó reutilizado de processos anteriores de impressão, cujo sistema e processo de aspiração serão apresentados posteriormente.

Com a unidade de construção inserida na unidade de processamento seleciona-se a opção de *mix* de matéria prima, sendo a mais indicada pelo fabricante a mistura 80:20, ou seja, 80% pó reutilizado e 20% pó virgem, e o processo de transferência do pó se dá de forma limpa e automática. É importante ressaltar que essa proporção é apenas indicada pela fabricante e pode ser alterada. Entretanto, o próprio sistema da máquina não permite que a quantidade de pó virgem seja inferior a 20%, sendo esta a quantidade mínima para garantir boa funcionalidade aliada a viabilidade econômica do processo. O processo de transferência do pó ocorre em porções, ou seja, o equipamento vai aspirando matéria prima (nova e reutilizada) pouco a pouco e na devida proporção, misturando e depositando na estação de processamento.

Após abastecida, a unidade de construção é transferida para a impressora, a qual é apresentada na Figura 16 e é responsável pela produção propriamente dita.

Figura 16 - Impressora 3D HP 4200 Jet Fusion



Fonte: Autor

A tecnologia MJF também é conhecida por impressão multi agentes, esses capazes de controlar o dimensional de cada volume pontual formado, ou voxel (o conceito de voxel será apresentado no próximo capítulo).

A Figura 17 demonstra passo a passo como ocorre o processo de impressão da tecnologia MJF e cada um deles será apresentado em detalhes.

Figura 17 - Processo MJF mostrado passo a passo



Fonte: HP MJF Handbook, 2019

O processo de impressão é iniciado com aplicação de uma camada de pó pré-aquecido (a) que é levado da parte interna da unidade de construção para o seu topo, sendo espalhado uniformemente por uma espécie de rolo. Após aplicação do pó, aplica-se os agentes de fusão (b) e de detalhamento (c), sendo esses os responsáveis pelo nome da tecnologia: multi agentes. O agente de fusão é responsável por absorver mais a energia fornecida pelas lâmpadas infravermelho que se movem sobre a superfície de impressão com objetivo de fundir o material (d) e é posicionada no mesmo cabeçote integrado que aplica os agentes de forma que o processo de aquecimento seja subsequente, como mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Cabeçote integrado: aplicação dos agentes e fornecimento de energia infravermelho



Fonte: WIESE et. al., 2021

Dessa forma, a região onde o agente de fusão está presente se funde. Onde há a presença do agente de detalhamento, a matéria prima permanece em pó, o que permite que tal tecnologia

possa reproduzir geometrias tão complexas. Além disso, cada aplicação de camada é feita sobre uma já aplicada, ou seja, essa tecnologia dispensa a necessidade dos suportes de impressão.

A fabricante (HP) afirma que o fato de uma nova camada de material e agentes ser aplicada quando a camada anterior ainda se encontra na fase fundida permite uma melhor fusão e uma maior possibilidade de imprimir detalhes complexos.

Após imprimir uma camada, que pode ser de até 80 μm , um bom valor se comparado aos processos de sinterização a laser que possuem em geral 100 μm (CHATHAM; LONG; WILLIAMS, 2019), um mecanismo extremamente preciso se desloca para aplicação da próxima camada de pó e agentes de fusão e detalhamento. Esse processo se repete até a formação completa da peça.

O processo MJF deve possuir um preciso controle térmico para que a fusão ocorra de forma uniforme, e a própria máquina o realiza medindo a temperatura de centenas de pontos na superfície de trabalho verificando quais áreas estão mais quentes e quais estão mais frias.

Para isso, a impressora conta com dois sistemas de lâmpadas mostrados na Figura 19: o sistema de lâmpadas superiores e o sistema de lâmpadas de fusão.

Figura 19 – Sistemas de lâmpadas do processo MJF

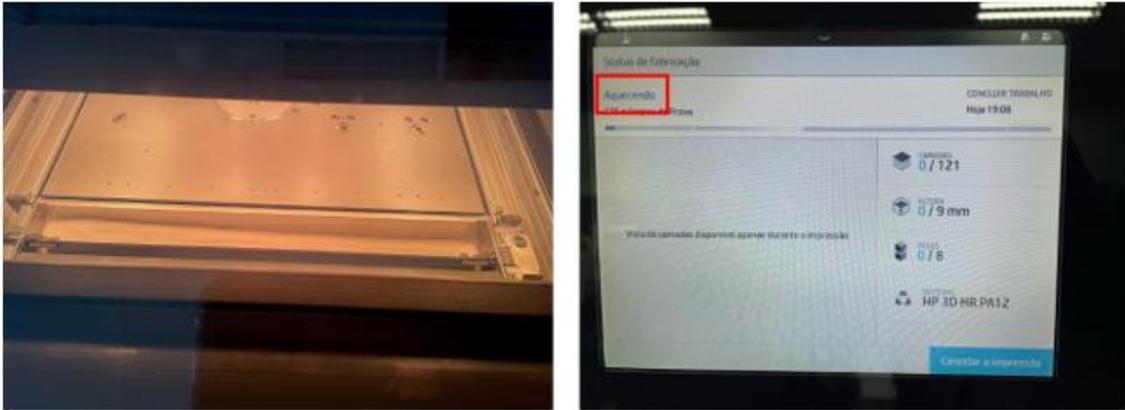


Fonte – SKA, 2020

O sistema de lâmpadas superiores fornece a energia em toda a área de impressão e funcionam através de termocâmeras instaladas no topo da região de impressão. Baseado na leitura das câmeras, as lâmpadas entregam mais ou menos energia mantendo assim a temperatura do leito homogênea (SKA, 2020). Além disso, é importante destacar que são essas

as lâmpadas que realizam o aquecimento do equipamento antes do início do processo de forma que só ocorre o início da aplicação de pó quando se finaliza a fase de aquecimento. Tal processo bem como sua visualização no computador da impressora pode ser visualizados na Figura 20.

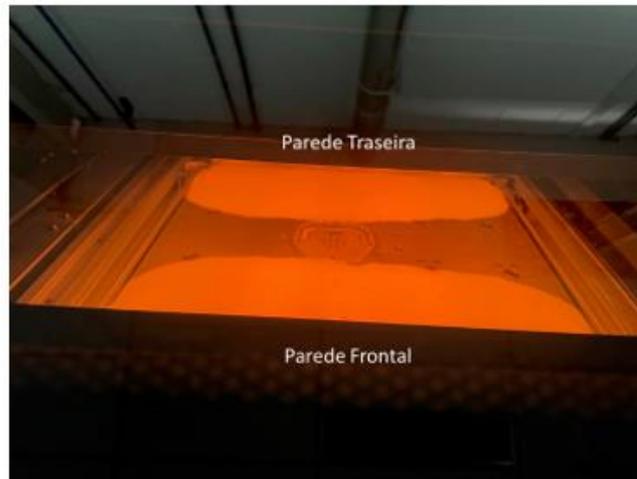
Figura 20 – Fase de aquecimento – Luzes sobre a plataforma de impressão (esq.) e controle do processo no computador da impressora (dir.)



Fonte - Autor

Ao finalizar o processo de aquecimento, o próprio sistema inicia automaticamente a aplicação de pó sobre a plataforma. Essa aplicação ocorre da seguinte forma: o rolo se movimenta na direção já mostrada na Figura 19. Partindo da parede frontal, identificada na Figura 21, um sistema de palhetas eleva o pó e o sustenta na mesma altura da plataforma. O rolo, por sua vez se desloca em direção ao outro lado espalhando essa quantidade de pó sobre a plataforma. Ao chegar na outra extremidade, a parede traseira, o processo se repete com o sistema de palhetas do lado oposto. Esse processo ocorre diversas vezes até as duas frentes de pó se encontrarem e formarem uma camada uniforme. Esse processo é mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Formação de frentes de pó opostas



Fonte: Autor

Após a formação da camada de pó, o equipamento lança sobre o leito uma porção dos agentes que pode ser vista na Figura 22.

Figura 22 – Porção de agentes depositada sobre o leito de pó antes do início da impressão



Fonte: Autor

O calor aplicado funde os agentes junto com o pó da região e forma uma espécie de bolacha que é fabricada em todo início de impressão, mostrada na Figura 23.

Figura 23 – Bolacha formada em todo início de impressão do processo MJF



Fonte – Autor

Feito isso, novas camadas de pó são aplicadas de forma a cobrir a bolacha formada, e após realizar o recobrimento completo e uniforme o processo de impressão se inicia e ocorre como a sequência mostrada na Figura 17.

O cabeçote integrado inicia sua movimentação segundo a direção já apresentada na Figura 19 (partindo do lado direito para o esquerdo do equipamento), aplicando os agentes e fornecendo a energia no espectro do infravermelho necessária para a fundir o material e formar a camada do produto. Após depositar os agentes e atingir o final de curso do lado esquerdo da máquina, o cabeçote despeja um excesso de agentes sobre uma superfície (chamada de recipiente). Feito isso o cabeçote se desloca novamente ao ponto de início do processo (lado direito) onde entra em contato com um tecido e limpa os cartuchos (esse processo se repete durante toda a impressão)

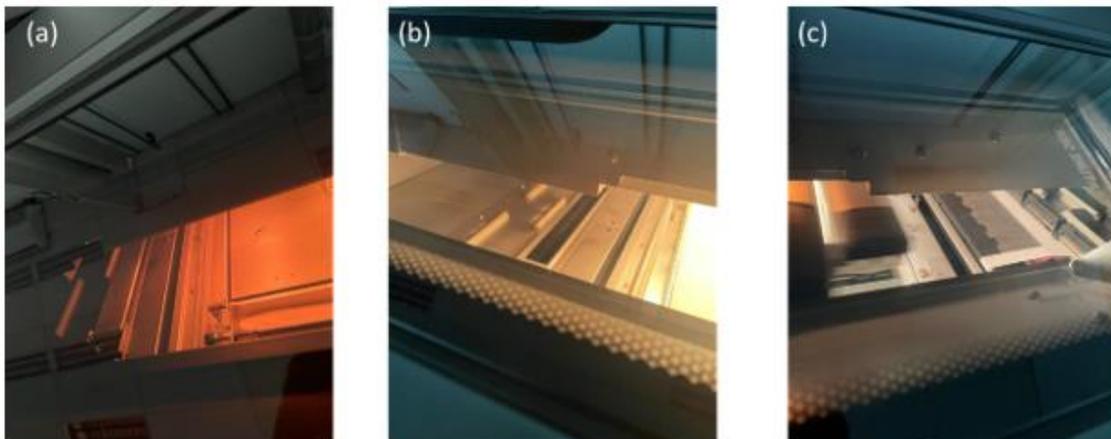
Na Figura 24 mostra-se um exemplo de camada de agentes aplicados sobre a camada de pó pré aquecido e a Figura 25 mostra a superfície onde é depositada o excesso de tinta (antes e depois de depositar os agentes) e o tecido onde o cartucho é limpo.

Figura 24 - Agentes aplicados sobre camada de pó durante processo de impressão



Fonte - Autor

Figura 25 – Superfície onde é despejado o excesso de agentes limpa (a). Superfície onde é despejada o excesso de agentes após aplicação de uma camada (b). Tecido de limpeza dos cartuchos na extremidade direita da máquina (c)



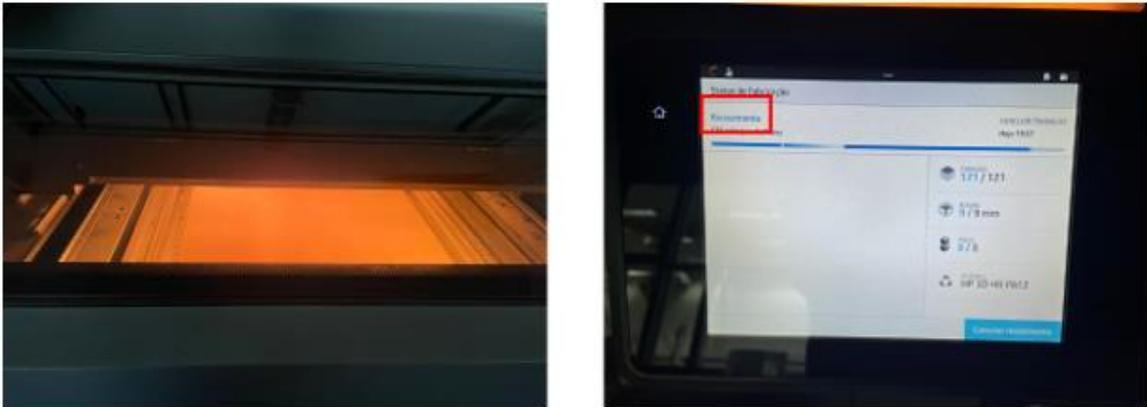
Fonte - Autor

É interessante destacar que o cabeçote integrado no processo MJF se desloca com velocidade constante, o que o difere do processo de sinterização a laser (SLS) no qual o tempo de permanência do laser na peça depende da geometria (GALATI. et. al, 2020).

Dessa forma, garantindo a fusão apropriada, pode-se obter um produto com propriedades mecânicas controladas, boa precisão dimensional e repetibilidade (SKA, 2020).

Finalizada a impressão a unidade de construção permanece por um tempo dentro da impressora passando pelo processo de recozimento, o qual pode ser visto na Figura 26, juntamente com sua visualização no computador da impressora.

Figura 26 - Processo de recozimento após a impressão



Fonte – Autor

Finalizado o processo de recozimento a unidade de construção é retirada da impressora e direcionada novamente para a unidade de processamento onde passa pelo processo de resfriamento que pode ser natural ou forçado, sendo que a fabricante indica como boa prática que o tempo de resfriamento natural seja de 3 vezes o tempo de impressão.

Finalizado o resfriamento, as peças devem ser extraídas da unidade de construção, e como se trata de um processo que ocorre em leito de pó, as peças ficam todas submersas no pó que não foi fundido no processo. Esse material não fundido é a parte da matéria prima que pode ser reutilizada quando misturada com a matéria prima virgem como explicado anteriormente, ou seja, o mesmo deve ser aspirado para que possa ser reutilizado. Para isso, a impressora possui um sistema que permite aspirar o pó não utilizado para dentro do tambor de armazenamento de matéria prima reutilizada apresentado na Figura 15, onde será armazenado até ser reutilizado em uma próxima impressão. O sistema de aspiração ocorre sob fluxo de ar laminar e é apresentado na Figura 27.

A taxa de reaproveitamento do pó não fundido pode chegar a 85%, o que torna o processo MJF melhor nesse quesito quando comparado com a sinterização a laser, no qual apenas cerca de 50 a 60% do pó pode ser aproveitado (BAIN, 2019).

Figura 27 - Sistema de aspiração de pó não utilizado para formação de peças



Fonte: Autor

Apesar de o sistema aspirar grande parte do pó sobressalente, parte do material não fundido fica grudado na superfície das peças, e por esse motivo se faz necessário a execução de um pós processamento que pode ser dividido em primário e secundário, sendo que o primário se refere ao processo de limpeza, e secundário processos que possam alterar propriedades mecânicas e morfológicas, como por exemplo a rugosidade. O secundário é opcional e depende da aplicação para a qual o produto será utilizado.

O pós-processamento primário se faz necessário em todas as peças produzidas pelo processo MJF para eliminar o pó não fundido da peça e garantir a precisão dimensional. Para a realização desta operação há algumas técnicas, como por exemplo: jateamento de esferas de vidro, jateamento de ar ou jateamento de água. Como exemplo, pode-se observar na Figura 28 a estação de jateamento de esferas de vidro disponível para este projeto na Volkswagen do Brasil.

Figura 28 - Estação de pós processamento por jateamento de esferas de vidro



Fonte: Autor

O princípio de funcionamento do jateamento usa pressão para retirar o excesso de pó, o que difere um processo do outro é o material de abrasão usado. Nota-se a diferença na superfície das peças antes e depois do pós-processamento no exemplo da Figura 29.

Figura 29 - Produto impresso antes (esq.) e depois (dir.) do pós processamento



Fonte: HP MJF Handbook, 2019

Apesar de ter um custo de aquisição de equipamento superior em relação aos concorrentes da linha industrial, é perceptível que o processo MJF apresenta inúmeras vantagens como a precisão para pequenos detalhes proporcionada pelo uso do agente de

detalhamento, a possibilidade de produção sem suportes de impressão e a grande taxa de reaproveitamento do pó (KAUPPILA, 2021).

3.1.3 Conceito de Voxel

Voxel não é um termo muito difundido, e por isso se iniciará a introdução desse conceito explicando sobre o pixel. Pixel, dentro de um gráfico digital, representa a menor unidade formadora. É representado no espaço bidimensional por um quadrado ou um ponto. A qualidade da imagem e uma boa definição de cores são proporcionadas pela quantidade de pixels de uma imagem e sua densidade, de forma que quanto maior o número de pixels, maior a qualidade. Além disso é importante ressaltar que pixels têm seu posicionamento definido por coordenadas absolutas.

Explicado pixel, pode-se introduzir o conceito de voxel, que dentro do conceito de impressão 3D representa a menor unidade tridimensional de uma rede regular, que pode ser representada pela região preta na posição (5) da Figura 30. Em outras palavras um voxel é um pixel volumétrico. Cada um deles pode ter suas propriedades controladas devido ao uso dos agentes, e por isso, o processo multi jet fusion pode produzir peças que outros processos não são capazes.

Diferentemente dos pixels, os voxels não possuem coordenadas absolutas e seu posicionamento é definido pela posição dos voxels vizinhos (MANUFACTUR3D, 2018).

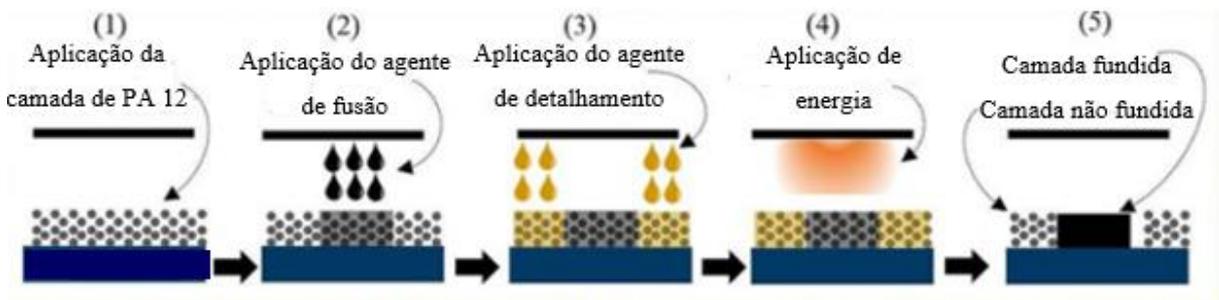
3.1.4 Agente de fusão e detalhamento

Para atingir um bom nível de qualidade e velocidade nos processos de manufatura aditiva, como já citado, a HP inventou o processo de impressão Multi Jet Fusion (MJF), que também é conhecido como multi agente, no qual uma camada de um agente de fusão é aplicada sobre uma fina camada de matéria prima (neste caso polímero) em pó. O fato de ser líquido faz com que tenha permeabilidade na camada de pó polimérico e isso faz com que as partículas tendam a se fundir juntas, como mostrado na Figura 30. Feito isso, aplica-se o agente de detalhamento para modificar as propriedades de fusão visando melhorar a precisão dos detalhes das peças e superfícies suavizadas (ALOMARAH et. al., 2019).

Dessa forma, pode-se observar que o agente de fusão tem a função de facilitar a absorção da energia infravermelho e fundir as partes seletivamente nas regiões onde foi aplicado. Já o agente de detalhamento funciona como um limitante já que é aplicado no limite da região de

fusão, ou seja, delimita o que deve ser fundido e o que não deve, inibindo a transferência de calor para os arredores, expondo o pó não fundido na operação a aportes de calor menores, evitando assim a degradação térmica, o que permite uma maior taxa de reutilização de pó pelo processo MJF se comparado ao processo SLS. Além disso, melhora a precisão dos detalhes (GALATI et. al, 2020).

Figura 30 - Aplicação dos agentes e sua penetração na camada de pó (matéria prima) anteriormente aplicada.

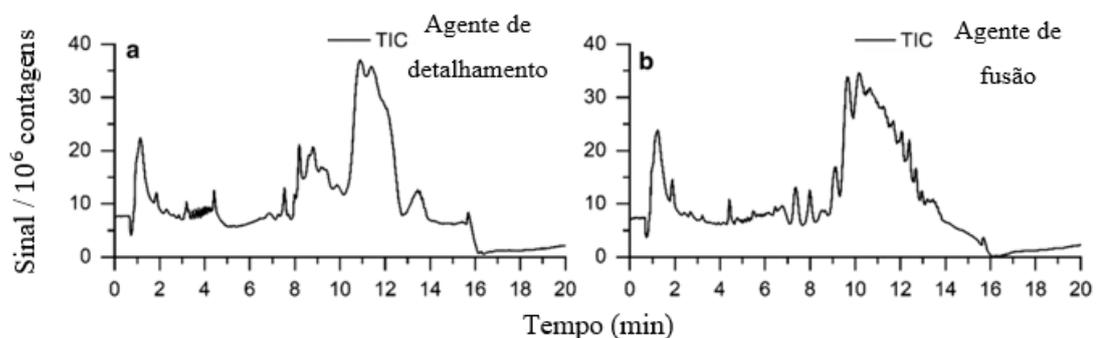


Fonte: ALOMARAH et. al., 2019

Segundo o estudo de Scherer, Kottenstedde e Matysik (2020) não há muita informação analítica de caracterização dos agentes utilizados para o processo de impressão MJF, e por isso, os autores realizaram um estudo com objetivo de investigar os agentes de fusão e detalhamento.

Para verificar a composição dos agentes foi realizado uma cromatografia de íons-completos (TIC) de ambos os materiais e verificou-se que até o tempo de retenção de 2,5 minutos o formato das curvas era bem parecido, como pode-se observar na Figura 31.

Figura 31 – Cromatograma de íons totais dos agentes de fusão e detalhamento



Fonte - SCHERER; KOTTENSTEDDE; MATYSIK, 2020

Integrando o primeiro pico, que ocorre em 1,1 minuto, encontrou-se duas (2) massas e utilizando as bibliotecas disponíveis foram identificados dois materiais, sendo eles: 2-pirolidona e trietileno glicol como solvente orgânico nos dois agentes (SCHERER; KOTTENSTEDDE; MATYSIK, 2020)

A pirolidona bem como o trietileno glicol possuem altos pontos de ebulição (251°C e 288°C, respectivamente), o que justifica a sua utilização visto que o processo de impressão não atinge tais temperaturas e, portanto, a liberação de gases é baixa (SCHERER; KOTTENSTEDDE; MATYSIK, 2020).

Para fazer a quantificação das massas dos componentes nos agentes utilizou-se a cromatografia gasosa com detector de ionização de chama, mais conhecida como GC FID, e foi encontrado no agente de detalhamento 3,7 % de pirolidona e 11,1% de trietileno glicol. Já no agente de fusão foram encontrados 18,7% de pirolidona e 8,4% de etilenoglicol (SCHERER; KOTTENSTEDDE; MATYSIK, 2020).

Além dessas substâncias, apesar de serem solventes orgânicos, ambos agentes possuem água na composição medidas por titulação: 83% no agente de detalhamento e 65% no agente de fusão. O alto conteúdo de água do agente de detalhamento ajuda no resfriamento local baseado na energia removida pela evaporação e no controle de temperatura, por isso os contornos ficam mais nítidos. Além disso ajuda no controle de temperatura e por essa razão aplica-se junto com agente de fusão. Repara-se que o agente de fusão possui menos água na composição e isso se deve a necessidade de absorver mais energia das lâmpadas infravermelho para fundir o polímero. Além disso, para garantir uma boa fusão, tal agente possui natureza aquosa o que ajuda na penetração da camada de polímero (SCHERER; KOTTENSTEDDE; MATYSIK, 2020).

Os valores obtidos no estudo de Scherer, Kottenstedde e Matysik (2020) podem ser comparados aos valores fornecido pela HP no *safety data sheet* dos seus materiais (HP Branded 3D Materials and Consumables MSDS's, 2016). Essa comparação é realizada nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Comparação das composições do agente de detalhamento obtidas na literatura com fabricante.

Comparação da composição obtida: Agente de detalhamento		
	SCHERER; KOTTENSTEDDE; MATYSIK 2020	HP Data Sheet 2016
Água	83%	80 – 90%
2-Pirolidona	3,7%	< 5%
Trietileno glicol	11,1%	< 15%

Fonte: SCHERER; KOTTENSTEDDE; MATYSIK, 2020 / HP Safety Data Sheet.

Verifica-se, portanto, que os valores obtidos no estudo de Scherer, Kottenstedde e Matysik (2020) estão nas mesmas proporções dos valores fornecidos na ficha de segurança do agente de detalhamento fornecida pela fabricante.

Tabela 2 - Comparação das composições do agente de fusão obtidas na literatura com fabricante.

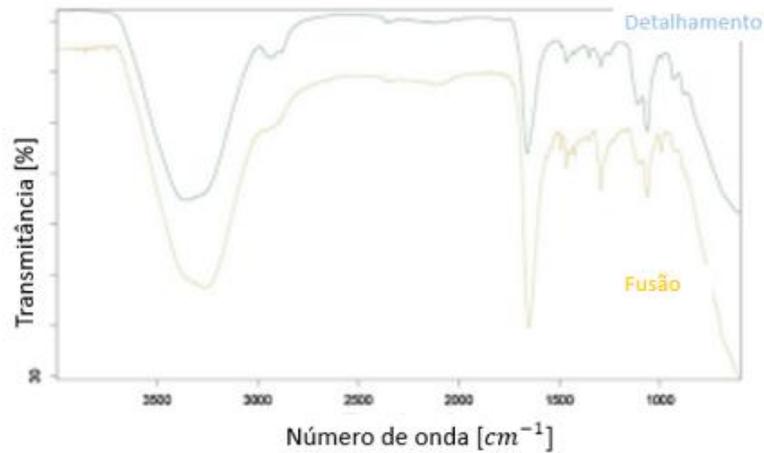
Comparação da composição obtida: Agente de fusão		
	SCHERER; KOTTENSTEDDE; MATYSIK 2020	HP Data Sheet 2016
Água	65%	70 – 80%
2-Pirolidona	18,7%	< 20%
Trietileno glicol	8,4%	-
Pigmento preto	5,2 %	<7,5%

Fonte: SCHERER; KOTTENSTEDDE; MATYSIK, 2020 / HP Safety Data Sheet.

Analisando a Tabela 2, verifica-se que os valores obtidos no estudo de Scherer, Kottenstedde e Matysik (2020) estão nas mesmas proporções dos valores fornecidos na ficha de segurança do agente de fusão fornecida pela fabricante, com exceção da concentração de trietileno glicol, a qual a fabricante não forneceu na ficha do material. Além disso, observa-se que no agente de fusão há a presença de um pigmento preto, sendo este o responsável por dar a coloração acinzentada dos produtos finais, como pode ser visto na Figura 29 já apresentada.

Observando as Tabelas 1 e 2, verifica-se que ambos os agentes possuem os mesmos componentes, porém em quantidades diferentes, o que também foi evidenciado no ensaio infravermelho realizado por Galati et. al. (2020) e mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Espectro infravermelho agente de fusão x agente de detalhamento



Fonte – GALATI et. al., 2020

3.1.5 Propriedades obtidas em peças de Poliamida 12 produzidas por MJF

Pelo fato de não ser tão difundida, a tecnologia MJF apresenta poucos estudos a respeito das propriedades mecânicas. Entretanto, há alguns artigos publicados com estudos em aplicações no ramo automobilístico. Tais aplicações, em sua grande maioria, utilizam a poliamida 12 (PA 12) como material, visto que possui uma temperatura de fusão muito mais alta em relação a temperatura de cristalização, ou seja, possui um grande intervalo de super resfriamento, o que atrasa o processo de cristalização (não deixa que ocorra prematuramente) reduzindo tensões residuais e distorções (O'CONNOR; DICKSON; DOWLING, 2018) (O'CONNOR; DOWLING, 2019). Esse conceito será discutido com mais detalhes ao apresentar o termograma obtido no estudo de 2018 de O'Connor, Dickson e Dowling na sequência.

O processo MJF pode ser comparada ao terceiro processo mais utilizado da manufatura aditiva, a sinterização seletiva a laser (SLS), devido a similaridade do princípio de processamento, ou seja, ambos são baseados em produções de fusão em leito de pó (PBF). Por ocorrerem sobre um leito de pó, os processos PBF não requerem produção de suportes de sustentação do produto, o que é uma grande vantagem sobre os outros processos da manufatura aditiva (GALATI et. al, 2020).

Um primeiro ponto importante de se analisar é a morfologia da matéria prima, e em Galati et. al. (2020) realizou-se tal análise em Poliamida 12, utilizando microscopia eletrônica de varredura (SEM) e difração de raios-X. Do ponto de vista químico, realizou-se ensaios de

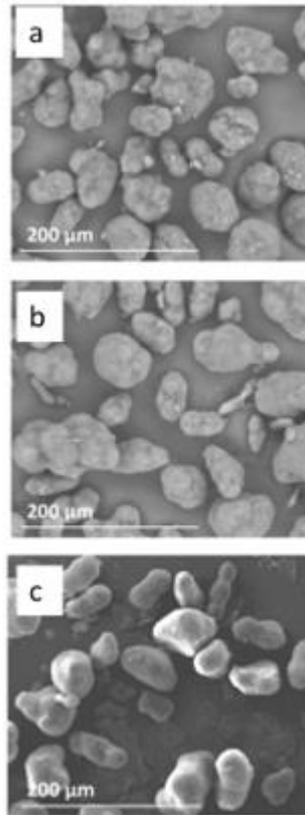
espectroscopia de infravermelho (FT-IR). Além dessas análises, realizou-se ensaios térmicos (Calorimetria exploratória diferencial – DSC) a fim de verificar a influência do processo sobre a matéria prima e verificar se a mesma foi alterada após processamento.

Como citado na secção 3.1.2, o processo MJF trabalha com matéria prima misturada (virgem e reutilizada), e por isso, em Galati et. al. (2020) foram realizados estudos e comparações entre as matérias primas a fim de avaliar as influências nos produtos acabados no que diz respeito a suas propriedades. Para realizar tal análise, além da comparação das amostras de pó virgem e reutilizada entre si, as amostras de matéria prima do processo MJF foram comparadas com uma amostra de referência de poliamida 12 pura e com poliamida 12 utilizada para processo SLS.

Na Figura 33 compara-se a PA 12 utilizada por processo SLS (a), uma PA 12 virgem do processo MJF (b) e uma poliamida 12 reutilizada do processo MJF (c). Observa-se que a poliamida do processo SLS e nova do processo MJF são parecidas em sua forma e mostram a mesma não uniformidade de tamanhos. Além disso, verifica-se que ambas possuem uma superfície escamosa. Observando o pó reutilizado do processo MJF verifica-se que o formato se mantém, bem como a superfície rugosa (GALATI et. al, 2020).

O autor cita também que observou uma mudança quanto ao aglomerado no pó reutilizado, verificando um ligeiro aumento, o que poderia ter influência nas propriedades das peças produzidas. Entretanto, o tamanho das partículas é equivalente nas imagens de MEV, o que torna difícil tal conclusão, sendo necessária uma análise mais profunda, utilizando imagens com maiores aumentos ou outras técnicas de granulometria de pós.

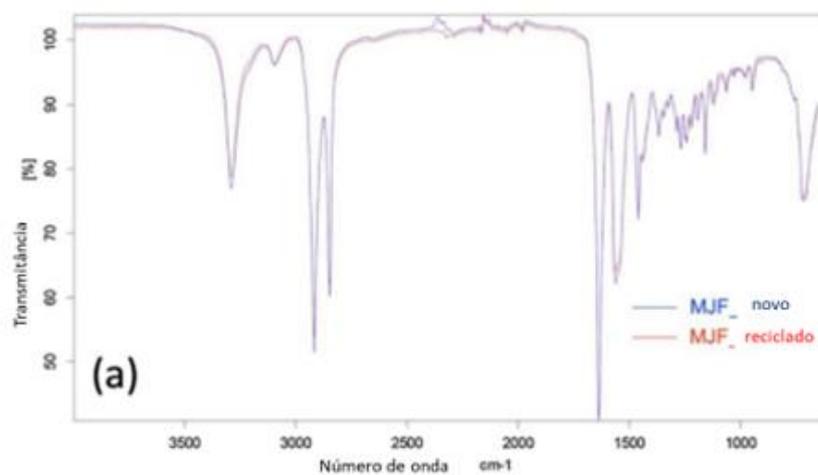
Figura 33 – Comparação das Poliamidas 12: (a) – SLS, (b) MJF Nova e (c) MJF reutilizada



Fonte – GALATI et. al., 2020

Do ponto de vista químico, verifica-se pelo espectro infravermelho mostrado na Figura 34, que os pós novos e reutilizados são idênticos, o que mostra que a reutilização do pó não altera a matéria prima (GALATI et. al, 2020).

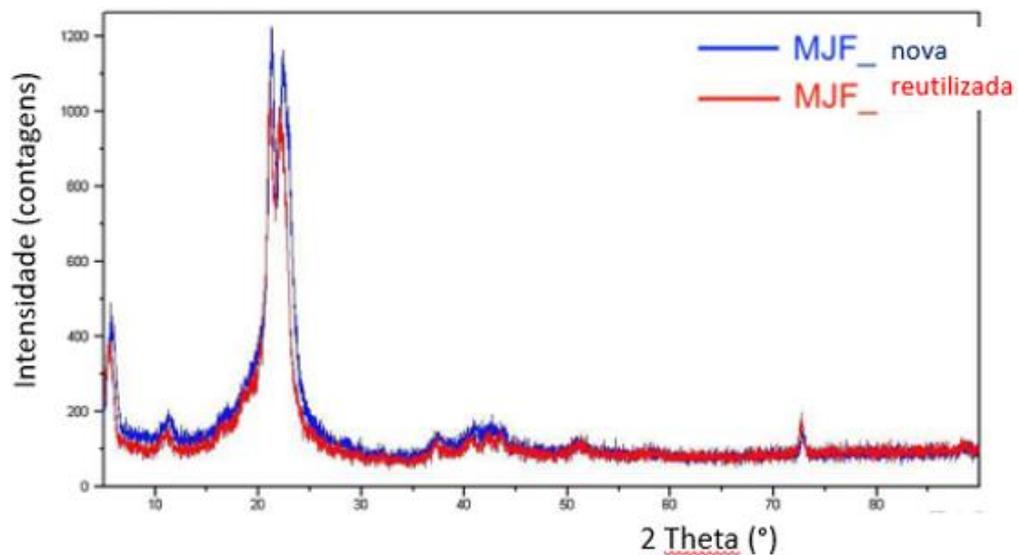
Figura 34 - Comparação espectro infravermelho da PA12 virgem e reciclada do processo MJF



Fonte - GALATI et. al., 2020

O mesmo ocorre ao observar o difratograma de raios-X da Figura 35, no qual foi utilizada radiação $\text{CuK}\alpha$ com comprimento de onda (λ) de 1,54 Å, e ângulo 2θ variando de 5° a 90° com passo de $0,017^\circ$; observa-se coincidência dos picos da PA 12 nova e reciclada do processo MJF. Tais picos são relativos a PA 12 cristalina, sendo os principais em $21,2^\circ$ (fase γ) e $22,2^\circ$ (fase α) (GALATI et. al, 2020).

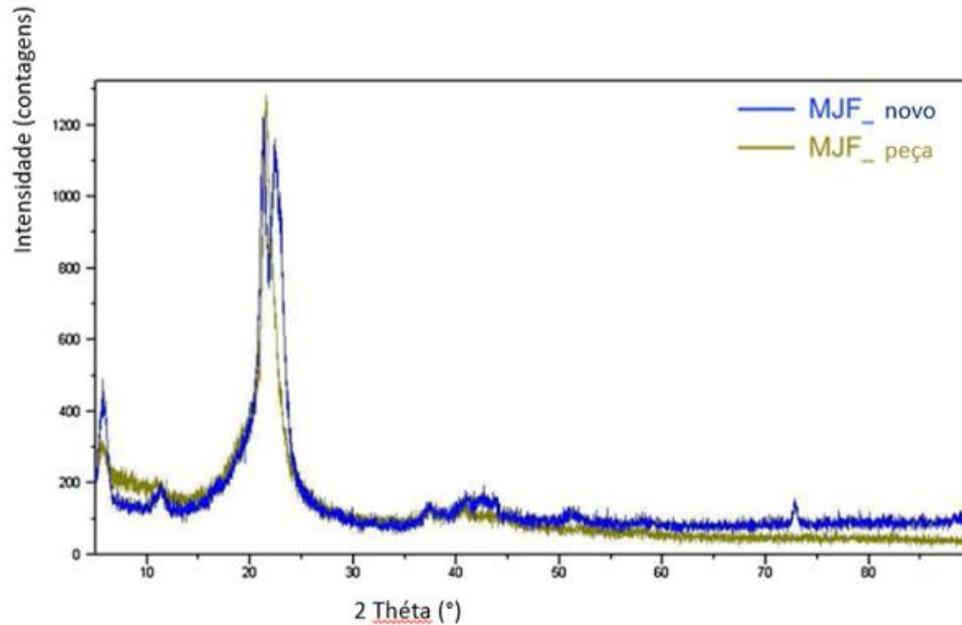
Figura 35 – Difratograma de raios-X – PA 12 nova x PA 12 reutilizada (Processo MJF)



Fonte - GALATI et. al., 2020

Entretanto, essa situação muda após o processamento, o qual torna negligenciável o pico da fase α que no pó que ocorria a $22,2^\circ$, justificada pelo resfriamento rápido. O pico da fase gama se mantém como pode-se observar na Figura 36 (GALATI et. al, 2020).

Figura 36 – Difratoformas de raios-X – Pó virgem x Peça impressa

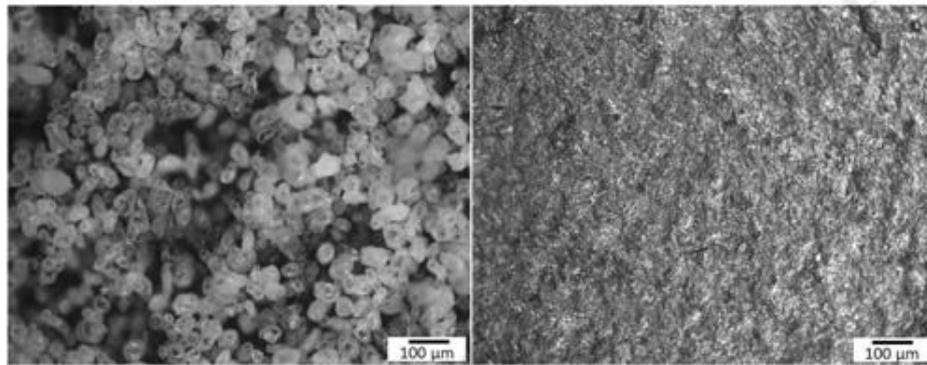


Fonte - GALATI et. al., 2020

Após processar a matéria prima, foi observado em O'Connor, Dickson e Dowling (2018), por meio de microscopia, que após a impressão e antes do pós processamento a superfície apresentava resíduo de pó parcialmente fundido. Após o jateamento de esferas de vidro, a superfície foi modificada e passou a ser menos rugosa, como mostrado na Figura 37 (O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018). Essa situação era esperada e foi apresentada na seção 3.1.2 ao mostrar a Figura 29 e a necessidade do pós processamento no processo MJF. Entretanto, não foram realizadas medições de rugosidades antes e depois do pós processamento para verificar em que grandeza o pós processamento reduz a rugosidade. Tal análise mostra a importância da operação de pós processamento para eliminar resíduos indesejados na peça que podem afetar a funcionalidade e o dimensional do produto.

Outro aspecto relativo a rugosidade importante de se evidenciar é a diferença entre as rugosidades das superfícies superior (última camada depositada) e inferior (primeira camada depositada) dos corpos de prova, como pode ser visto na Tabela 3, a qual apresenta valores obtidos em diferentes estudos.

Figura 37 - Rugosidade antes (à esquerda) e depois (à direita) do pós processamento por jateamento de esferas de vidro



Fonte: O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018

Analisando a Tabela 3 é possível verificar que em todos os estudos há uma tendência de que no processo MJF a face inferior apresente uma rugosidade média menor. Provavelmente isso se deva ao fato de que a primeira camada depositada, ao ser fundida, busca tomar a forma do leito de pó abaixo e por isso fica mais lisa, diferentemente do que ocorre com a última camada depositada que possui como base uma outra camada anterior. A única exceção ocorreu em Rosso et. al. (2020), a qual pode ser justificada pela não execução do pós processamento, situação essa que também eleva muito a rugosidade do produto quando comparado aos outros resultados obtidos nos outros estudos apresentados na tabela. Já para o processo SLS, observa-se que os resultados de rugosidade obtidos se aproximam (não há grandes variações como no caso do MJF), tanto entre os estudos quanto entre as faces de uma peça produzida nas mesmas condições.

Comparando a rugosidade obtida pelo processo MJF com as obtidas por processos SLS conclui-se que, em geral, o processo MJF apresenta rugosidades médias menores, exceto para a face superior no estudo de Xu et. al. (2019), em que apresentou rugosidade superior em MJF. Essa situação pode ser fruto do regime de impressão utilizado em tal processo, que segundo a fabricante influencia diretamente no acabamento das peças produzidas, o qual, no entanto, não foi citado pelo autor.

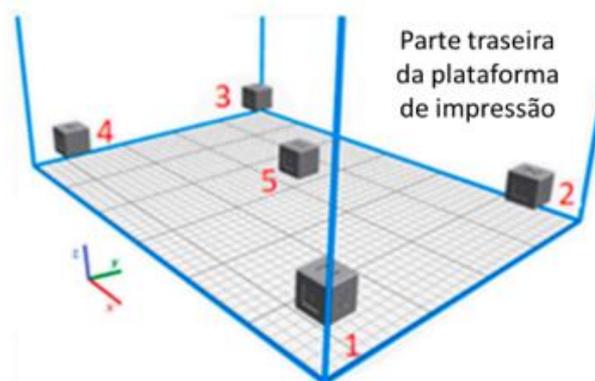
Tabela 3 - Comparação de rugosidades entre processos (MJF e SLS) e faces (superiores e inferiores)

Comparação de Rugosidades				
	Rugosidades médias obtidas (μm)			
	O'Connor 2018	O'Connor 2019	Xu 2019	Rosso 2020
MJF Face Inferior	2,54 \pm 0,42	4,12 \pm 0,32	6,31 \pm 0,43	13,3 \pm 1,0
MJF Face Superior	10,29 \pm 2,82	8,30 \pm 0,12	15,58 \pm 0,59	8,7 \pm 0,9
SLS Face Inferior	-	-	14,40 \pm 1,06	15,0 \pm 2,3
SLS Face Superior	-	-	14,62 \pm 0,45	10,4 \pm 1,6

Fonte: O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018 / O'CONNOR; DOWLING, 2019 / XU et. al., 2019 / ROSSO et. al., 2020

Entretanto, nos estudos apresentados, não foi mostrada a posição dos corpos de prova na unidade de construção para avaliar se foram impressos em regiões próximas ou distantes das paredes, o que permitiria uma análise se há posições em que se possa obter melhor acabamentos superficiais devido a gradientes de temperatura que possam afetar a taxa de resfriamento, a densidade ou a cristalinidade. Por isso, em Sagbas et. al. (2021) realizou-se impressões de amostras cúbicas de 20 mm de aresta em diferentes posições e em tréplicas (impressões realizadas separadamente), como mostra a Figura 38, e avaliou-se o acabamento superficial das mesmas, bem como os desvios dimensionais.

Figura 38 – Posições de impressão nos cantos e no centro da plataforma de impressão



Fonte – SAGBAS et. al., 2021

As faces dos cubos foram identificadas da seguinte forma: a face frontal foi identificada com o número da posição (1 a 5), os quais são apresentados na Figura 38 já apresentada. A face oposta ao número do cubo foi nomeada como Y. A face inferior (primeira camada aplicada) foi nomeada como B, enquanto a face superior (última camada aplicada) foi chamada de Z. As faces que se encontram na direção positiva do eixo X, foram nomeadas de X, enquanto as opostas foram chamadas de O. Além disso, é importante ressaltar que o regime de impressão utilizado foi o *balanced* pelas características já apresentadas e o resfriamento foi natural. Após a impressão, realizou-se o pós processamento com jateamento de esferas de vidro sob pressão de 5 bar. Além disso, antes das medições as amostras foram submetidas a um banho de água deionizada (SAGBAS et. al., 2021).

As rugosidades obtidas se mostram na mesma tendência dos outros estudos, nos quais a superfície inferior tem valores expressivamente menores de rugosidade do que a superfície superior. Comparando com as outras superfícies, há uma tendência de que a face inferior possua valores melhores também. Entretanto, em algumas amostras as superfícies Y e a oposta apresentam valores baixos, em determinadas amostras até obtendo-se valores inferiores do que obtidos na face B, como é o caso da amostra 2, por exemplo. Os resultados obtidos para rugosidade média são apresentados na Tabela 4.

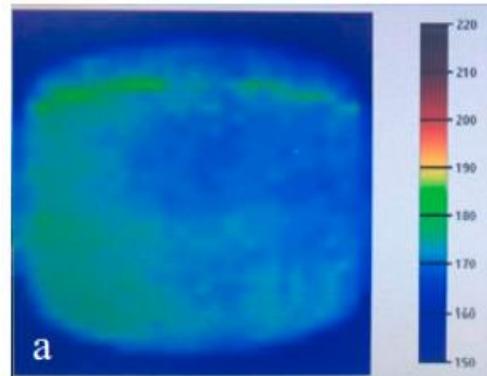
Tabela 4 – Rugosidades obtidas nas faces dos cubos impressos em 5 posições diferentes

Rugosidades médias em μm						
Cubo	Superfícies					
	Z	X	Y	O	N	B
1	23,46	16,78	14,76	17,74	9,37	13,78
2	17,36	14,47	11,17	13,58	11,66	12,22
3	20,10	12,89	10,59	13,77	11,69	11,56
4	16,38	12,79	9,76	15,66	11,79	9,87
5	13,69	12,34	12,46	10,31	10,23	7,18

Fonte – SAGBAS et. al., 2021

Além disso, observa-se uma diferença considerável entre os cubos, de forma que o cubo 1 apresenta os valores mais altos para rugosidade e o cubo 5 apresenta os valores mais baixos mostrando que o gradiente de temperatura de 170 a 185 °C, medido e observado na Figura 39, possui influência sobre a textura das amostras em diferentes posições.

Figura 39 - Gradiente de temperatura na plataforma de impressão



Fonte – SAGBAS et. al., 2021

Outra análise morfológica realizada em diferentes estudos foi a avaliação de porosidade, na qual O'Connor e Dowling (2019) utilizaram a técnica de micro tomografia computadorizada de raios-X a qual, segundo os autores, proporciona uma análise quantitativa da porosidade. Os resultados obtidos estão na Tabela 5. É possível verificar uma porosidade muito baixa em peças produzidas por processo MJF, neste caso todas abaixo de 1%. Verifica-se também que a menor porosidade se encontra nos corpos de prova impressos na direção Z, provavelmente pelo fato de em tal direção existir maior massa depositada no plano de impressão e permitir maior adensamento. Somado a isso, tem-se o fato de o processo MJF possuir uma sinterização quase completa com formação de pequenos poros como observado por Craft et al (2018).

Tabela 5 – Porosidade das peças produzidas em cada uma das 3 direções

Porosidade (%) x Direção de Impressão			
Poliamida 12	Direção X	Direção Y	Direção Z
	0,49±0,09	0,66±0,03	0,15±0,05

Fonte: O'CONNOR; DOWLING, 2019

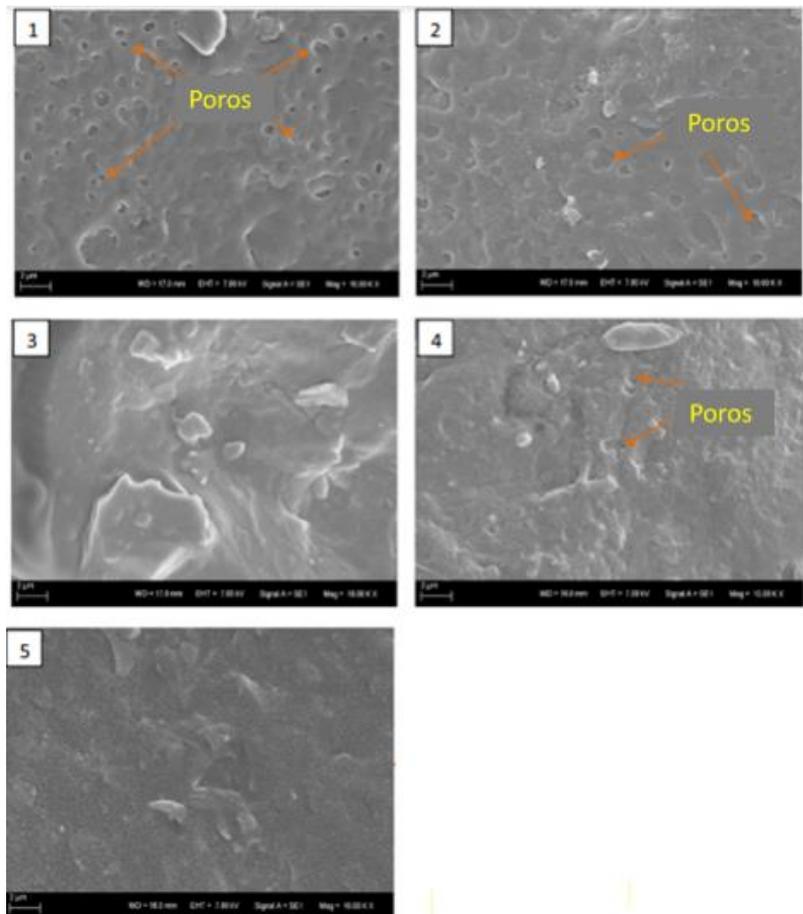
Esse valor de porosidade é baixo, inclusive, quando comparado com o de peças obtidas por processo SLS, que pode ser de 3 a 6% de porosidade (CRAFT et al., 2018).

Em um outro estudo, avaliou-se a porosidade utilizando microscopia ótica e o software de análise ImageJ, e neste obteve-se $3,2 \pm 4,1\%$, ou seja, majoritariamente menor do que 5%, o que mostra um bom preenchimento do processo MJF (O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018). Entretanto, este valor gera dúvidas quanto à distribuição dos dados pois apresenta um

desvio padrão maior do que a média e, provavelmente, não é uma distribuição normal. Além disso, apenas 4 amostras foram avaliadas e todas elas impressas em uma mesma direção, ou seja, não foi avaliado se há diferenças de porosidade entre as direções impressas.

Em Sagbas et. al. (2021), como mostrado na Figura 38, produziu-se amostras em diferentes posições a fim de verificar se havia gradientes de temperatura e se os mesmos afetavam as amostras de alguma forma. Além de diferenças de rugosidade e dimensionais, há diferença na densidade das amostras e na formação de poros, de forma que as amostras 3 e 5 não apresentaram poros visíveis enquanto nas amostras 1, 2 e 4 há ocorrência. Essa afirmação pode ser verificada na Figura 40.

Figura 40 – Imagem de SEM para análise da existência de poros nas amostras impressas nas diferentes posições

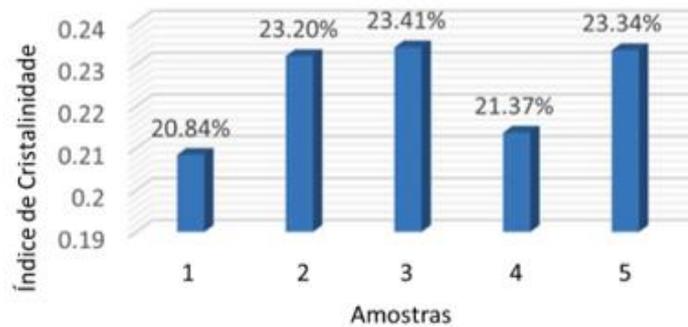


Fonte – SAGBAS et. al., 2021

Este resultado vai de encontro e pode ser justificado com os dados obtidos para a porcentagem de cristalinidade obtida, de forma que os cubos 2, 3 (que estão na parede traseira

da cuba) e 5 (porção central da cuba) apresentaram as maiores porcentagens, como pode ser visto na Figura 41.

Figura 41 – Índice de cristalinidade obtido para cada amostra

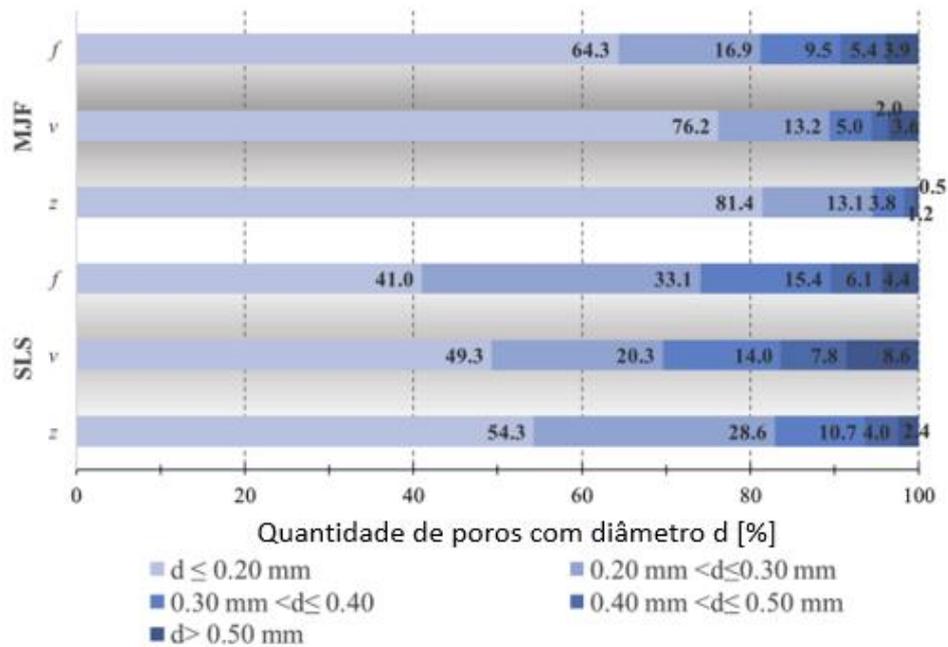


Fonte – SAGBAS et. al., 2021

Apesar de mostrar diferença de cristalinidade e porosidades em diferentes posições, não foram avaliadas propriedades mecânicas. Entretanto, é esperado que haja diferenças, visto que estes são fatores que afetam diretamente as propriedades de materiais poliméricos.

Em Calignano et al (2021) realizou-se uma comparação entre as dimensões dos poros gerados em peças produzidas por tecnologia MJF e SLS com objetivo de correlacionar o comportamento mecânico das amostras com este parâmetro. Como resultado verificou-se que as amostras produzidas pela tecnologia MJF possuem mais de 80% dos poros com diâmetros inferiores a 0,3 mm em todas as direções impressas, como pode-se verificar na Figura 42. Já na tecnologia SLS verificou-se a formação de uma maior quantidade de poros alongados.

Figura 42 – Quantidade de poros com diâmetro d em diferentes direções impressas em tecnologia MJF e SLS

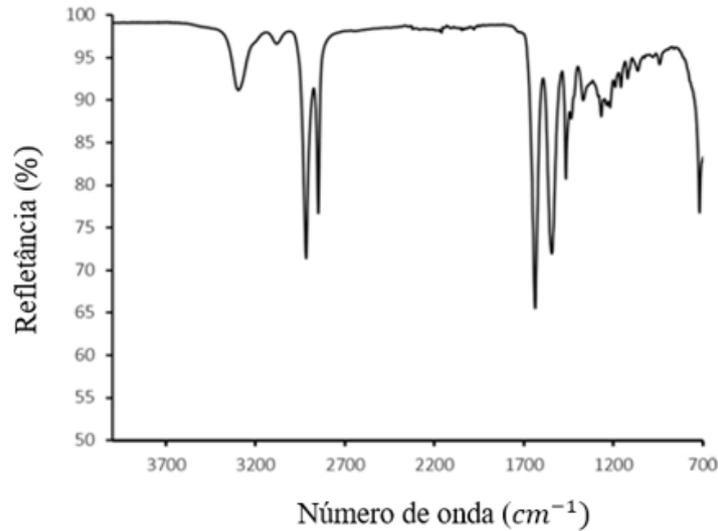


Fonte – CALIGNANO et. al., 2021

Utilizando espectroscopia por infravermelho, ATR-IR, avaliou-se a matéria prima a partir do espectro gerado e apresentado na Figura 43 juntamente com seus picos, apresentados na Tabela 6, e foi comparado com o disponível na literatura e, com isso, mostrou-se que a matéria prima era realmente poliamida 12. (O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018).

Tal resultado pode ser comparado com o apresentado na Figura 34, permitindo confirmar os resultados obtidos dada a ocorrência dos mesmos picos nos dois estudos.

Figura 43 - Espectro infravermelho da PA12 obtido



Fonte: O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018

Tabela 6 – Picos do ensaio infravermelho e respectivas descrições

Resultado do Infravermelho	
Picos (cm^{-1})	Descrição do Pico
3297	Estiramento ligação N-H
2918	Estiramento CH_2 assimétrico
2850	Estiramento CH_2 simétrico
1639	Estiramento C=O
1545	Estiramento C-N + Flexão plana C=O
1370	Flexão CH e Torção CH_2
1269	Estiramento C-N + Flexão plana C=O
1122	Estiramento C-C
944	CONH em plano
720	4 ou mais CH_2 em sequência

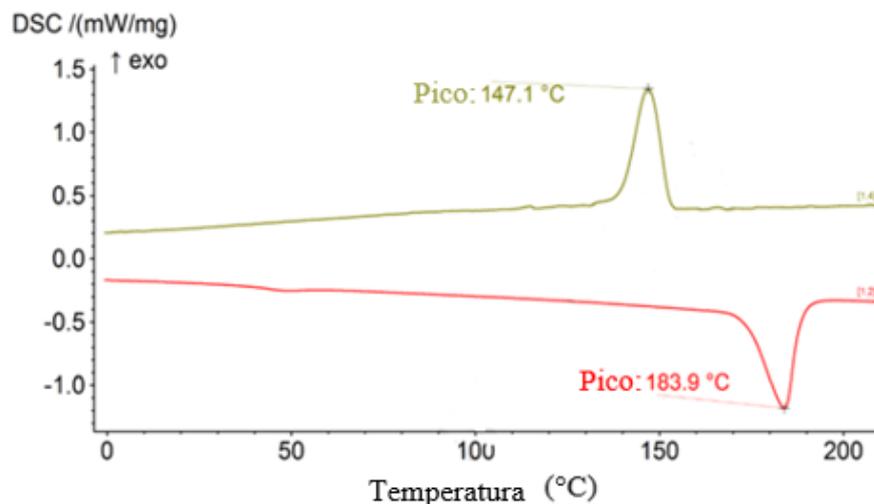
Fonte: O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018

Análises térmicas foram realizadas utilizando ensaios de DSC (calorimetria exploratória diferencial), das quais se pode retirar as informações da temperatura de transição vítrea (T_g), intervalo de temperatura de fusão (T_m), o grau de cristalinidade (X_m) e o grau de cristalinidade (X_c) pelas integrações do pico endotérmico e exotérmico, respectivamente. (O'CONNOR;

DICKSON, DOWLING, 2018). Como resultado da análise térmica nos corpos de prova realizados em O'Connor, Dickson e Dowling (2018), apresenta-se o termograma da Figura 44, no qual identifica-se os picos de fusão e de cristalização como sendo 183,9°C e 147,1°C, respectivamente. Tais valores se aproximam dos encontrados para a poliamida 12 em outros estudos, sendo a temperatura de fusão 184,81°C e de cristalização 146,45°C (VASQUEZ et. al., 2014).

Observando os valores encontrados pode-se justificar a afirmação do início do capítulo, de que os intervalos de cristalização e fusão para a PA12 são bem espaçados entre si, ou seja, existe um intervalo de superresfriamento grande, o que é uma característica essencial em processos de leito de pó, já que o leito de impressão pode ficar em um intervalo entre essas duas temperaturas e permite que o material, quando absorve energia, possa formar a peça sem correr o risco de uma cristalização prematura (VASQUEZ et. al., 2014).

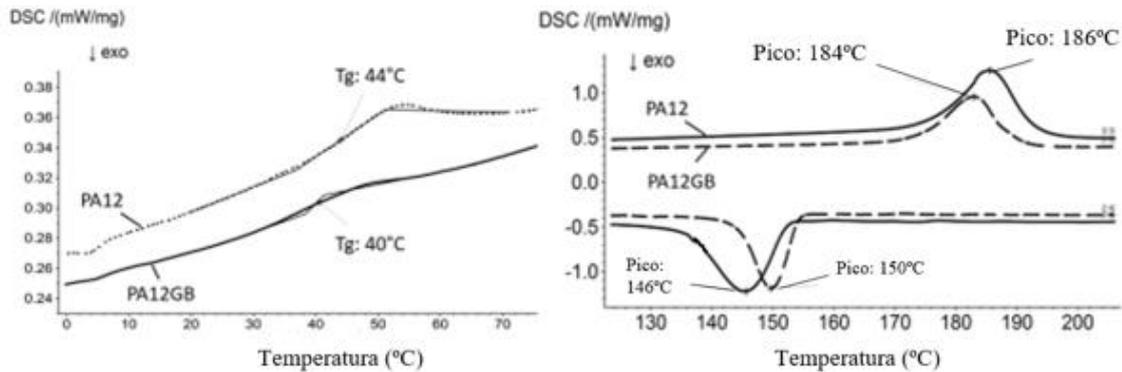
Figura 44 - Termograma de aquecimento e resfriamento da PA 12



Fonte: O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018

O resultado da Figura 44 se aproxima muito do obtido em O'Connor e Dowling (2019) apresentado na Figura 45. Entretanto, em O'Connor e Dowling (2019), não foi dito se o ensaio foi realizado na matéria prima (pó) ou nas amostras já impressas, o que dificulta a comparação direta dos dados. Desconsiderando esse fato, e analisando somente as temperaturas dos picos obtidas nos estudos e apresentadas na Tabela 7, pode-se observar que as temperaturas obtidas são bem próximas.

Figura 45 - Termograma DSC da PA 12 e PA12 com reforço de esferas de vidro



Fonte: O'CONNOR; DOWLING, 2019

Tabela 7 – Comparação das propriedades térmicas obtidas nos estudos de 2018 e 2019

Resultados DSC – 2018 x 2019					
Estudo	Tg (°C)	Tm (°C)	Xm (%)	Tc (°C)	Xc (%)
2018	44	184	32	147	26
2019	44	186	31	146	26

Fonte: O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018 / O'CONNOR; DOWLING, 2019

Comparando os valores da porcentagem de cristalinidade (X_m) da Tabela 7 com os da Figura 41 obtidos em Sagbas et. al. (2021), verifica-se que os destes autores (valor máximo em 23,41%) são substancialmente menores que os encontrados por O'Connor e colaboradores (2018).

Pode-se observar que em ambos os estudos foram obtidos termogramas com um único pico de fusão e sem nenhuma outra alteração da linha base do diagrama, o que mostra a capacidade do processo MJF em providenciar sinterização completa como comentado por Craft et. al. (2018), justificando os baixos índices de porosidade apresentados.

A análise das propriedades mecânicas é o ponto mais crítico do processo MJF, pois a fabricante aponta que é possível produzir peças isotrópicas. Entretanto, nos resultados até então disponíveis na literatura, apenas poucas variações de angulações relativas ao plano de impressão foram estudadas.

Em Galati et. al. (2020) foram realizadas duas diferentes análises em ensaios de tração com velocidade de 1 mm/min segundo a norma ISO 527: corpos de prova impressos e corpos de prova retirados de um componente industrial impresso, o qual é mostrado na Figura 46,

juntamente com as direções as quais os corpos foram extraídos, sendo 5 na direção Z, 5 da Z-50°, 5 XY-50° e 3 XY.

Figura 46 – Componente industrial impresso do qual foram retiradas amostras para ensaio de tração



Fonte - GALATI et. al., 2020

Além do componente industrial, foram impressos corpos de prova diretamente: 5 amostras com o comprimento dos corpos de prova impressos na direção de passagem do rolo de normalização do pó e a espessura na direção de movimento do mecanismo, ou seja, para cima em relação a plataforma de processamento. Tais amostras foram nomeadas de XY. Outras cinco amostras foram construídas com o comprimento na direção de movimento do mecanismo e espessura na direção de movimento do rolo. Tais amostras foram nomeadas como Z. Os resultados serão apresentados na Tabela 8 e posteriormente analisados (GALATI et. al, 2020).

Tabela 8 - Propriedades mecânicas de peças de poliamida 12 produzidas por MJF. Variações de medidas são calculadas comparando-as com as medidas dos corpos XY extraídos do componente.

Propriedades mecânicas obtidas por Galati et. al. (2020)									
	Direção	Módulo de Elasticidade [MPa]	Variação [%]	Tensão limite de escoamento [MPa]	Variação [%]	Tensão limite de resistência [MPa]	Variação [%]	Alongamento [%]	Variação [%]
Corpos Impressos	XY					36	-4,0	25	104,9
	Z					39	4,0	18	47,5
Corpos extraídos do componente	Z	1560±98	13,9	18,6±1,0	-5,6	32,0±5,5	-14,7	5,9±2,4	-51,6
	Z – 50°	1696±65	23,8	21,7±1,0	10,1	39,4±1,2	5,1	7,7±0,7	-36,9
	XY	1370±17	0,0	19,7±3,5	0,0	37,5±2,3	0,0	12,2±1,6	0,0
	XY – 50°	1508±160	10,1	19,9±1,5	1,0	41,0±2,2	9,3	12,8±1,2	4,9

Fonte - GALATI et. al., 2020

Analisando os corpos impressos, verifica-se uma variação nas tensões limite de resistência (de 36 a 39 MPa) de cerca de 8,3% entre as direções XY e Z (mostradas nas duas primeiras linhas da tabela). Para o alongamento se mostra com anisotropia considerável, sendo maior nos corpos nomeados como XY (25%) em relação a direção Z (18%).

Observando os corpos extraídos, verifica-se as mesmas ordens de grandeza nas variações das tensões limites, tanto de resistência quanto de escoamento. Já para o alongamento verifica-se que são substancialmente menores para os corpos extraídos quando comparados aos impressos. Além disso, mostram-se anisotrópicos quando se observa que nas direções XY e XY-50° são maiores que na direção Z e Z – 50° (GALATI et. al, 2020). Observando as colunas de variação percentual, para a qual tomou-se como referência os corpos de prova extraídos XY, verifica-se que são estas as propriedades que apresentam menores variações (desconsiderando se positiva ou negativa, apenas olhando o valor em módulo), sendo a variação máxima para a tensão de escoamento de 10,1% e de 14,7% para a tensão limite de resistência, valores consideravelmente elevados para tratar como isotrópico o material produzido por MJF.

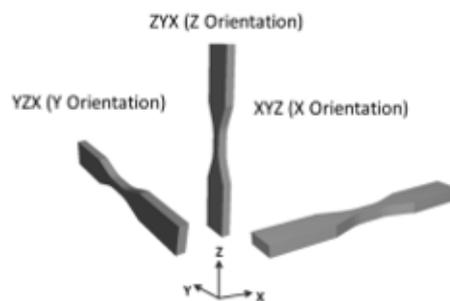
O módulo de elasticidade se mostra com variações consideráveis entre as direções, o que mostra determinado grau de anisotropia para essa propriedade (GALATI et. al, 2020). Esse determinado grau de anisotropia é evidenciado quando se observa as colunas de variação percentual, e verifica-se que há variação de módulos de elasticidade de até 23,8%.

O alongamento, observando os dados da tabela, é a propriedade que se mostra com maior grau de anisotropia, visto que as variações chegam a até 104,9% do valor tomado como referência.

Após verificar os resultados, Galati et al (2020) citam que com as considerações anteriormente apresentadas pode-se verificar que para produção de peças funcionais pode-se estimar as tensões de resistência das mesmas a partir de resultados obtidos em ensaios de tração em corpos de prova. Entretanto, como visto na Tabela 8 apresentada, observam-se tensões limite com variações de no mínimo 10%. Já para o alongamento e módulo de elasticidade, verifica-se que os valores obtidos em corpos de prova impressos diretamente para essa finalidade são maiores que os obtidos em corpos de prova extraídos de peças funcionais, ou seja, há uma diferença considerável entre os alongamentos obtidos a partir de ensaios realizados em corpos de prova e em realizados em peças funcionais.

Alguns outros estudos serão apresentados e os resultados obtidos para as propriedades mecânicas serão discutidos. Entretanto, nos estudos encontrados, bem como no *white paper* da fabricante (HP, 2020), apenas apresentam-se corpos de provas impressos em direções ortogonais de impressão, como mostra a Figura 47, fato este que dificulta a avaliação correta da anisotropia de propriedades. Além disso, nos estudos de O'Connor, Dickson e Dowling (2018) e O'Connor e Dowling (2019) aqui apresentados, não fica claro como são as direções X e Y em relação ao plano de impressão, ou seja, não se pode concluir qual o posicionamento delas em relação as lâmpadas de aquecimento, o que tem influência na temperatura da plataforma de impressão, como mostrado anteriormente na Figura 39.

Figura 47 - Direções de impressão estudadas pela fabricante e nos artigos de O'Connor

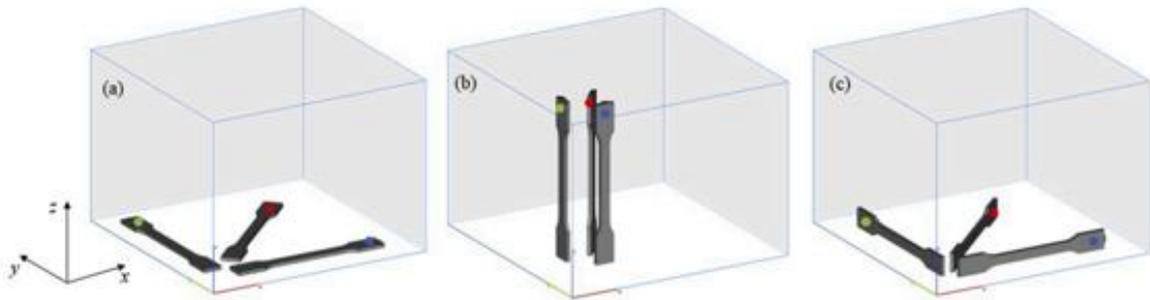


Fonte: O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018

Um outro estudo apresentado é o de Calignano et. al. (2021) e nele foram impressas mais amostras de forma que as direções principais foram as mesmas apresentadas na Figura 47, porém para cada direção rotacionou-se duas vezes a amostra em 45° de forma a obter mais duas

amostras com diferentes direções. As direções impressas em tal estudo são mostradas na Figura 48. A observação realizada acima a respeito do posicionamento das amostras relativo às lâmpadas, porém, se mantém.

Figura 48 – Posicionamento dos corpos de prova no estudo de Calignano et. al. (2021)



Fonte: Calignano et. al. (2021)

Os ensaios mecânicos de tração conduzidos nos estudos de O'Connor, Dickson e Dowling (2018), O'Connor e Dowling (2019), Calignano et. al. (2021) e pela fabricante HP (*White paper*, 2020) tiveram como objetivo investigar a existência de isotropia de propriedades entre as direções impressas. Entretanto, como comentado anteriormente, em todos eles, apenas avaliou-se em direções ortogonais, ou seja, apenas corpos de prova nos eixos X, Y e Z, como mostrado nas Figura 47 e 48 já apresentadas.

Os resultados obtidos por estes estudos são apresentados nas Figuras 49 a 51 e nas Tabelas 9 a 11, e posteriormente analisados de duas perspectivas: a primeira será uma comparação entre os valores obtidos de cada propriedade nos diferentes estudos (posicionamento relativo de uma linha do gráfico em relação a outra) e a segunda será, dentro do mesmo estudo, uma comparação dos valores obtidos em cada direção de impressão (distância vertical entre os pontos).

É importante ressaltar que as linhas do gráfico foram numeradas apenas com o ano do estudo sendo: 2018/2019 para os estudos de O'Connor, Dickson e Dowling (2018) e O'Connor e Dowling (2019), 2020 para os ensaios da fabricante (HP) e 2021 para os ensaios realizados em Calignano et al (2021). Os ensaios realizados pela HP nos corpos de prova de X e Y foram agrupados e apresentados no *white paper* (HP, 2020) como uma média das duas direções, e por isso os valores foram repetidos. Além disso, verificou-se que os ensaios de 2018 e 2019 apresentaram os mesmos valores, e por isso, foram agrupados.

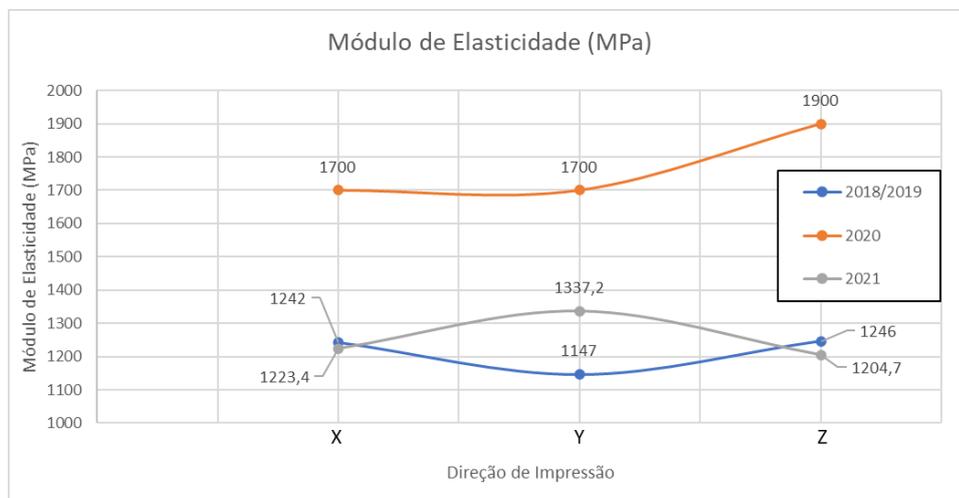
Outra observação importante é que em Calignano et al (2021) os ensaios foram conduzidos sob a norma EN ISO 527 (a 10 mm/min), a qual apresenta diferenças em relação a ASTM D638 quanto a geometria do corpo de prova e métodos de cálculos, podendo assim apresentar alguma divergência face a diferenças metodológicas.

Analisando a Figura 49 e a Tabela 9 verificam-se diferenças consideráveis no módulo de elasticidade, sendo a maior delas na direção Z, na qual a fabricante obteve 1900 MPa e os estudos módulos de elasticidade menores em mais de 30%. Comparando os valores obtidos nos estudos de 2018/2019 com os obtidos em 2021, apesar de utilizar uma norma diferente, os valores se aproximam, o que pode ser verificado pela proximidade das linhas no gráfico.

Analisando os dados pela segunda perspectiva e comparando as orientações de impressão dentro de cada estudo é possível observar algumas diferenças relevantes também. Em todos os casos observa-se que em duas direções os valores convergem, entretanto isso não ocorre nas mesmas direções. Enquanto nos estudos de 2018, 2019 e 2021 as direções X e Z se aproximaram, muito mostrando isotropia no módulo de elasticidade nessas direções, tem-se na direção Y certo grau de anisotropia, enquanto nos ensaios realizados pela fabricante as direções X e Y convergiram para um mesmo valor e mostrou a direção Z com certo grau de anisotropia para o módulo de elasticidade.

Os valores mostrados na Tabela 8 se mostram em posição intermediária entre os estudos de apresentados na Tabela 9, o que fortalece a ideia de que há um certo grau de anisotropia para esta propriedade visto que há variação entre as direções e entre diferentes estudos.

Figura 49 – Comparação de módulos de elasticidade obtidos em diferentes estudos e diferentes direções de impressão



Fonte: O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018 / O'CONNOR; DOWLING, 2019 / White paper HP / CALIGNANO et. al, 2021

Tabela 9 – Comparação dos módulos de elasticidade obtidos em diferentes estudos

Propriedades	HP (2020) (ASTM D638)	Variação 2018/2019 (ASTM D638)	Variação Calig. (2021) EN ISO 527
Módulo de Elasticidade (E) MPa - X	1700 (Ref.)	-26,9%	-28,0%
Módulo de Elasticidade (E) MPa - Y	1700 (Ref.)	-32,5%	-21,3%
Módulo de Elasticidade (E) MPa - Z	1900 (Ref.)	-34,4%	-36,6%

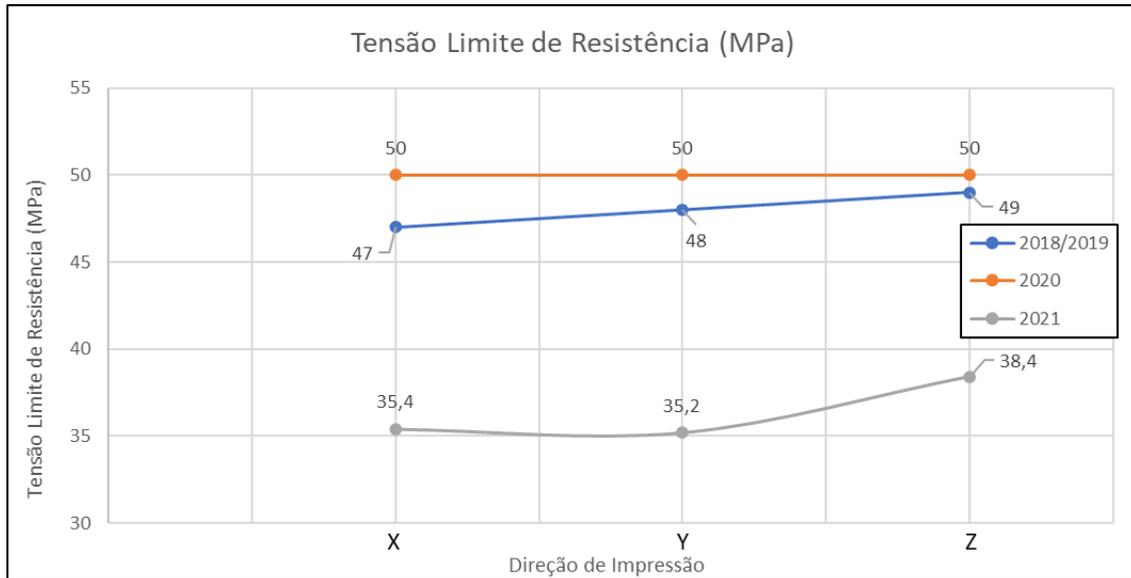
Fonte: O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018 / O'CONNOR; DOWLING, 2019 / White paper HP / CALIGNANO et al, 2021.

Na Figura 50 e na Tabela 10 pode-se avaliar os valores obtidos para tensão de resistência a tração obtidos nos estudos de 2018 e 2019, de 2021 e os da HP. Neste caso, verifica-se poucas diferenças nos valores encontrados entre os estudos de 2018 e 2019 com os valores obtidos pela fabricante, de forma que tomando como referência os valores obtidos pela fabricante a maior diferença se encontra na direção de impressão X e é de 3 MPa (6%). Dessa forma, verifica-se que a resistência a tração, observando apenas estes estudos, se comporta com certo grau de isotropia nessa primeira perspectiva de análise. Entretanto, se observados os valores obtidos no estudo de 2021, os valores se distanciam consideravelmente dos obtidos em 2018 e 2019 e pela fabricante, sendo a maior diferença na direção Y de 14,8 MPa (29,6%).

Pela segunda perspectiva, observando os valores da HP observa-se completa isotropia na tensão limite de resistência, visto que os valores convergiram para 50 MPa. Nos estudos de 2018 e 2019 existem pequenas diferenças, sendo a maior delas ainda abaixo de 5% (49 MPa para 47 MPa), ou seja, também apresenta certo grau de isotropia, bem como ocorre no estudo de 2021 no qual a maior diferença é de 8,3% (38,4 MPa para 35,2 MPa). Tais diferenças ocorrem de forma que as tensões tenham uma tendência crescente segundo a ordem X, Y e Z, ou seja, $S_{LRX} < S_{LRY} < S_{LRZ}$.

Comparando os valores com os obtidos na Tabela 8, verifica-se que, apesar da tendência isotrópica, os limites de resistência obtidos, tanto nos estudos de 2018/2019 quanto nos da fabricante, são consideravelmente maiores. Comparando o estudo de 2021 com a Tabela 8, verifica-se uma maior proximidade dos valores obtidos.

Figura 50 - Comparação de tensões limite de resistência obtidos em diferentes estudos e diferentes direções de impressão



Fonte: O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018 / O'CONNOR; DOWLING, 2019 / White paper HP / CALIGNANO et. al, 2021

Tabela 10 – Comparação das tensões limite de resistência obtidos em diferentes estudos

Propriedades	HP (2020) (ASTM D638)	Variação 2018/2019 (ASTM D638)	Variação Calig. (2021) EN ISO 527
Tensão Limite de Resistência MPa - X	50 (Ref.)	-6%	-29,2%
Tensão Limite de Resistência MPa - Y	50 (Ref.)	-4%	-29,6%
Tensão Limite de Resistência MPa - Z	50 (Ref.)	-2%	-23,2%

Fonte: O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018 / O'CONNOR; DOWLING, 2019 / White paper HP / CALIGNANO et. al, 2021

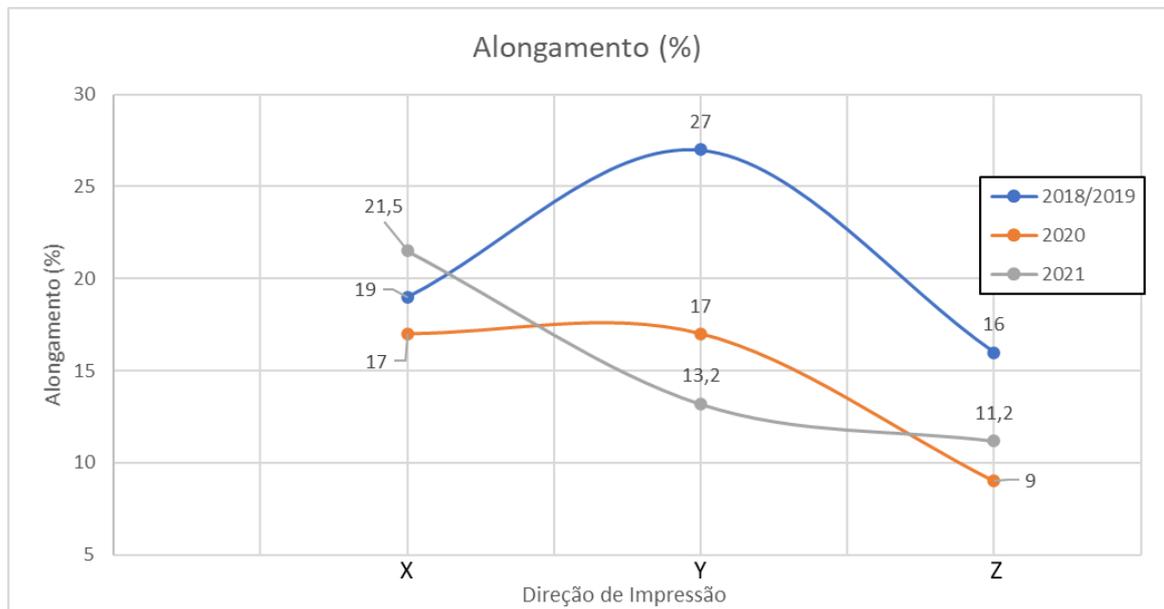
Analisando o gráfico de alongamentos apresentado na Figura 51 e a tabela de variações, Tabela 11, verifica-se uma situação parecida com a que ocorreu com o módulo de elasticidade, ou seja, há algumas diferenças consideráveis entre os valores obtidos nos estudos de 2018 e 2019, de 2021 e pela fabricante, sendo a maior delas na direção Y.

Observando pela segunda perspectiva, em todos os estudos, verifica-se também uma situação parecida com a que ocorreu com os módulos de elasticidade, ou seja, em duas direções os valores convergem e na terceira ocorre certo grau de anisotropia. As direções próximas foram as mesmas que se aproximaram para o módulo de elasticidade, ou seja, as direções X e Z

possuem alongamento na ruptura próximos nos estudos de 2018 e 2019, e nos estudos da HP os alongamentos em X e Y se aproximam mais. Entretanto, no estudo de 2021 as diferenças entre as direções X e Y são maiores, e as direções que mais são aproximam são Y e Z.

Comparando ainda com a Tabela 8, verifica-se que os alongamentos obtidos pelos estudos de 2018/2019 se aproximam dos valores obtidos para os corpos de prova impresso em Galati et. al. (2020).

Figura 51 - Comparação dos alongamentos obtidos em diferentes estudos e diferentes direções de impressão



Fonte: O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018 / O'CONNOR; DOWLING, 2019 / White paper HP / CALIGNANO et. al, 2021

Tabela 11 - Comparação dos alongamentos na ruptura em diferentes estudos

Propriedades	HP (2020) (ASTM D638)	Varição 2018/2019 (ASTM D638)	Varição Calig. (2021) EN ISO 527
Alongamento na Ruptura (%) - X	17 (Ref.)	11,8%	26,5%
Alongamento na Ruptura (%) - Y	17 (Ref.)	58,8%	-22,3%
Alongamento na Ruptura (%) - Z	9 (Ref.)	77,8%	24,4%

Fonte: O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018 / O'CONNOR; DOWLING, 2019 / White paper HP

Dessa forma, é possível verificar que, nos estudos até agora realizados, há certo grau de isotropia nas direções avaliadas para as tensões limites de resistência. Já para o módulo de elasticidade e para alongamento, em algumas direções, há certo grau de anisotropia.

Como verificado, poucos estudos tratam da tensão limite de escoamento, sendo esta uma propriedade muito importante para produtos fabricados em materiais poliméricos. Dos estudos apresentados, apenas em Calignano et. al. (2021) e Galati et. al. (2020) foram apresentados dados para esta propriedade.

Apesar de os estudos não citarem como são as direções X e Y em relação aos planos de impressão para verificar se o tamanho da área sinterizada por passe da lâmpada, mostrada na Figura 52, influencia nas propriedades, Mele, Compana e Monti (2020) em seu estudo mostraram que independente da direção de impressão, ou seja, tendo uma área a ser sinterizada grande ou pequena, não há influência considerável sobre as propriedades. Isso pode ser observado na Tabela 12 que mostra a proximidade dos valores obtidos independente da área sinterizada. Ou seja, a área sinterizada por passe não deve possuir forte influência sobre as propriedades. A orientação de impressão é apresentada na Figura 53.

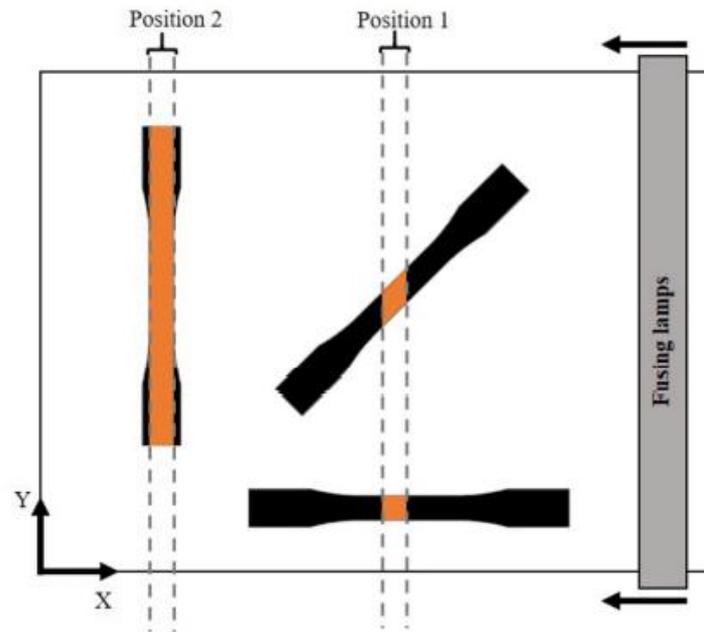
Tabela 12 – Propriedades obtidas por ensaio de tração em diferentes posições de impressão com resfriamento natural

Resultados teste de tração			
Orientação (°)	Limite resistência (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Alongamento (%)
0	43,2±1,1	1705,4±37,4	11,65±1,5
45	43,2±0,6	1677,6±51,5	11,4±1,2
90	44,1±0,9	1666,4±45,7	11,4±0,6

Fonte: MELE; COMPANA; MONTI, 2020

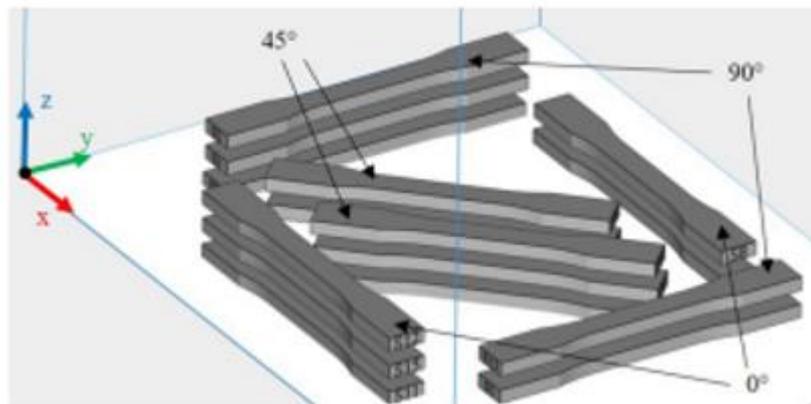
Comparando os valores da Tabela 12 com a Tabela 8 verifica-se uma relativa proximidade com os valores obtidos para o limite de resistência, fortalecendo a ideia de isotropia para essa propriedade. Para o alongamento e módulo de elasticidade, no estudo de Mele, Compana e Monti (2020), mostra-se certa isotropia, diferente do que foi observado em Galati et. al. (2020).

Figura 52 - Área máxima a ser sinterizada em cada direção de impressão por passe



Fonte: MELE; COMPANA; MONTI, 2020

Figura 53 - Posicionamento dos corpos de prova em relação aos eixos X, Y e Z



Fonte: MELE; COMPANA; MONTI, 2020

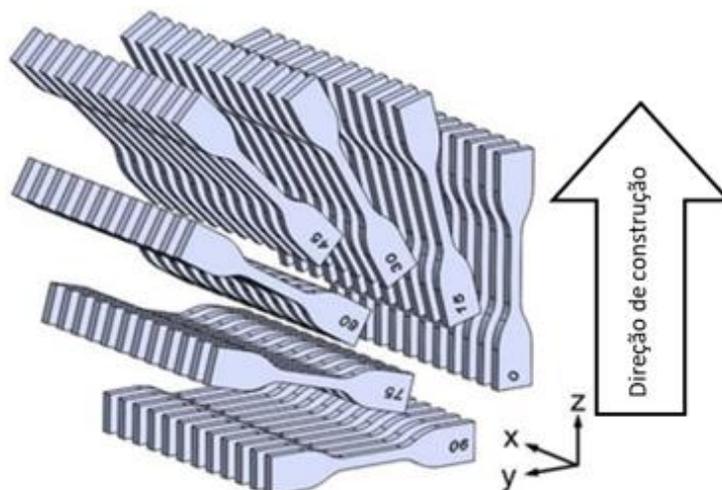
Com isso, pode-se dizer que o posicionamento dos corpos de prova expostos na Figura 53 em relação às lâmpadas possui pouca influência sobre as propriedades. Entretanto, realizando uma comparação entre a Tabela 8 e 9 (provenientes de diferentes estudos) verifica-se diferenças consideráveis entre as propriedades. Além disso, nenhum dos estudos até agora realizados possui análises das propriedades com corpos de prova produzidos com seu comprimento inclinado em relação ao leito de impressão, sendo impossível obter conclusões sobre a total isotropia de propriedades proporcionadas pela máquina.

Em Calignano et. al. (2021), bem como em Galati et. al. (2020), utilizou-se a norma ISO 527 para os ensaios de tração na qual utiliza-se valores arbitrários de offset em deformação e toma-se a tensão correspondente como a tensão de escoamento. Em Calignano et. al. (2021) foram utilizados valores da tensão de escoamento sendo este a tensão a 1% de deformação, valor escolhido como *offset* devido à dificuldade de separar o regime plástico do elástico pelo fato de os polímeros não apresentarem na curva tensão deformação uma zona bem definida de transição do comportamento linear e não linear. Partindo dessa premissa, o autor obteve valores para tensão de escoamento variando de 18,5 MPa a 26,9 MPa (Calignano et. al., 2021). Comparando esses valores com os obtidos em Galati et. al. (2020), no qual calculou-se a tensão de escoamento a 0,2%, verifica-se relativa proximidade (apesar das diferenças na velocidade de ensaio) visto que o mesmo obteve valores em diferentes direções variando de 18,6 a 21,7, como mostrado anteriormente na Tabela 8.

Apesar de em Calignano et. al. (2021) serem apresentadas mais direções de impressão, as mesmas permanecem apenas nas direções ortogonais na mesa, como já apresentado na Figura 48, o que dificulta a análise de isotropia.

Comparando as respostas mecânicas até então obtidas pelo processo MJF com estudos realizados em amostras produzidas por SLS, cujos corpos de prova foram impressos em diferentes direções, como mostra o esquema apresentado na Figura 54, verifica-se uma tendência diferente.

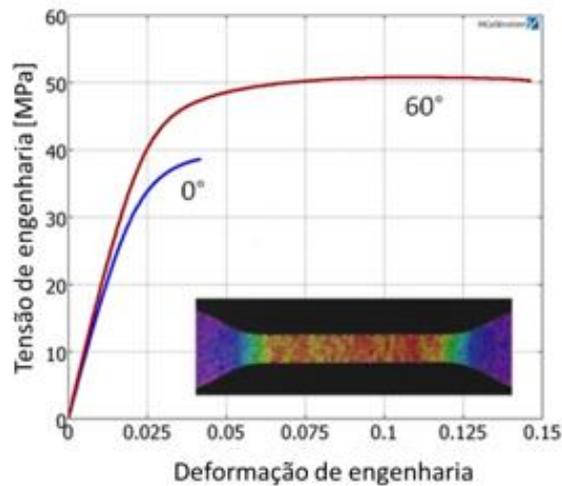
Figura 54 - Direções de impressão em processo SLS



Fonte: VERYST, 2017

Neste caso, a menor resistência mecânica está na amostra produzida com angulação 0°, ou seja, na direção Z apresentada na Figura 55 que mostra as direções mais e menos resistentes. Verifica-se que a direção com maior resistência foi a de 60°, com um valor um pouco superior a 50 MPa. A direção de 0° apresentou-se como a menos resistente com uma tensão limite de resistência um pouco inferior a 40 MPa.

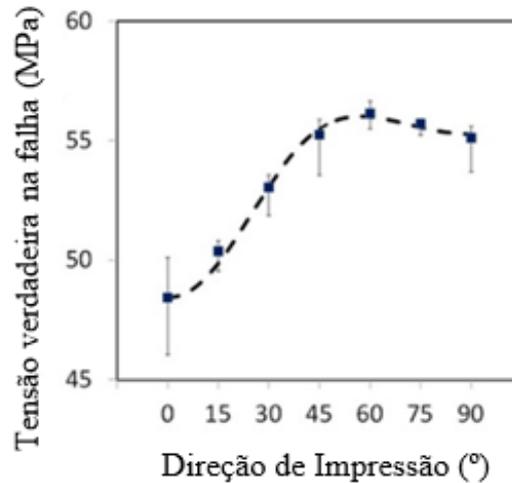
Figura 55 – Direções mais e menos resistentes em ensaios de peças produzidas por processo SLS



Fonte - VERYST, 2017

O fato de obter-se a menor resistência mecânica na direção Z, possivelmente, se deve ao fato de as camadas não possuírem boa aderência entre si (VERYST, 2017). Além disso, na Figura 56, observa-se uma anisotropia considerável para a tensão na ruptura (variação de 48 a 56 MPa) a cada 15° de variação na impressão para o processo SLS, o que justifica a necessidade deste estudo para o processo MJF, visto que não há na literatura dados semelhantes para este processo.

Figura 56 - Tensão verdadeira na ruptura em cada direção impressa



Fonte: VERYST, 2017

Além dos ensaios de tração, há estudos do processo MJF nos quais foram realizados também ensaios de flexão, segundo a norma ISO 178:2010, e nestes as direções de impressão se mostraram mais anisotrópicas entre si, existindo variações na tensão limite de resistência a flexão de 50 MPa até 70 MPa, como se pode observar na Tabela 13.

Os módulos de elasticidade obtidos pelos ensaios de flexão, observados na Tabela 13, assim como os valores obtidos para a resistência, apresentaram diferenças significativas entre si, mostrando uma possível anisotropia de propriedades quando submetido a esforços de flexão.

É interessante destacar que em nenhum outro estudo apresentado realizou-se medidas de propriedades em flexão, esforço para o qual os corpos de prova apresentaram uma anisotropia marcante tanto para a tensão limite de resistência, quanto para o módulo de elasticidade. Entretanto, mesmo realizando os ensaios, para flexão também apenas foram impressos corpos de prova em direções ortogonais a mesa de impressão.

A determinação de limite de escoamento a flexão em 1% de deformação também pode trazer importantes informações a respeito da anisotropia, o que pode levar à otimização de projeto mecânico de peças produzidas por MA, uma vez que as principais variáveis no projeto mecânico são o módulo de elasticidade (que define a proporção entre tensão aplicada e deformação medida na peça no trecho elástico) e limite de escoamento (como sendo a maior tensão – descontado coeficiente de segurança – passível de aplicar no componente).

Tabela 13 – Propriedades mecânicas obtidas por ensaio de flexão em peças produzidas por MJF

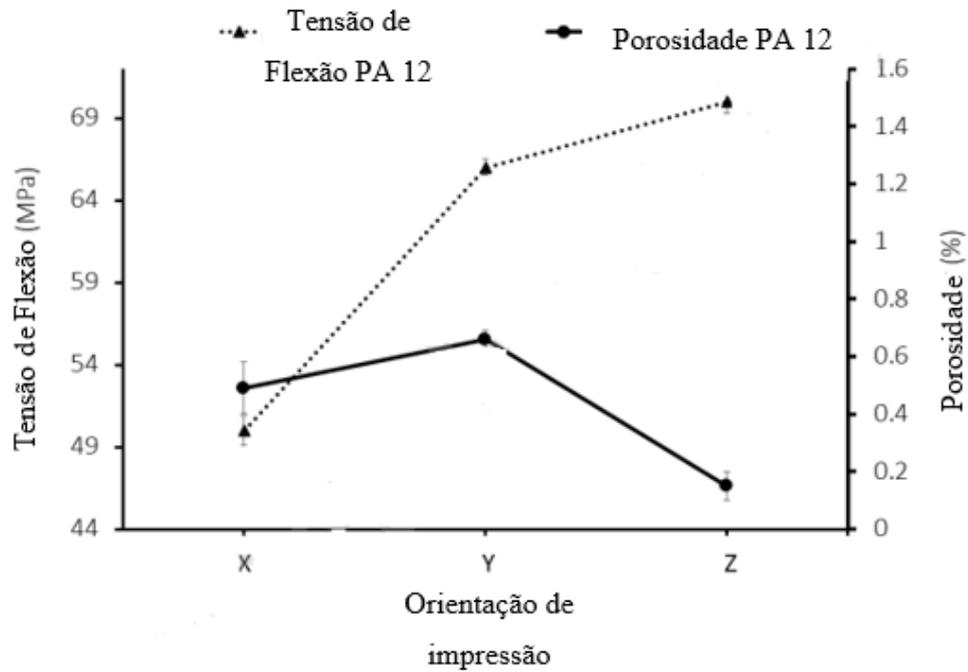
Direção de Impressão	Tensão limite de resistência em flexão [MPa]	Módulo de elasticidade em flexão [MPa]
X	50±0,9	1146±51
Y	66±0,5	1567±36
Z	70±0,7	1687±12

Fonte: O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018

Os corpos impressos na direção de Z tiveram maiores tensões, enquanto os de X tiveram as menores tensões de flexão. Tal resposta mecânica, possivelmente, pode ser justificada pela quantidade de massa depositada no plano de impressão. Observando o corpo na direção de Z, verifica-se que o mesmo possui mais camadas depositadas no plano de impressão, o que melhora o adensamento da amostra e reduzindo a porosidade, como já comentado e pode-se confirmar observando as curvas da Figura 57 nas quais observa-se a tendência de que quanto menor a porosidade maior a tensão de resistência, exceto nos corpos de prova impressos na direção Y, os quais podem ter sido influenciados por outros parâmetros de processo. (O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018).

Essa tendência também é observada (ainda que em menor proporção) nos valores obtidos para tensão limite de resistência nos estudos de O'Connor, Dickson e Dowling (2018) e O'Connor e Dowling (2019) apresentados na Figura 50.

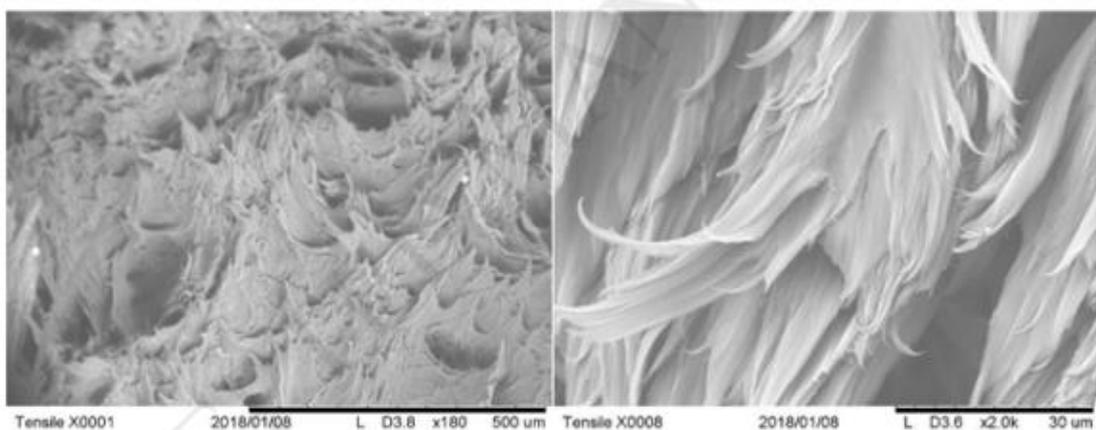
Figura 57 – Relação da Porosidade (%) com a Tensão de resistência a flexão



Fonte - O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018

Feita a análise e comparação dos valores das propriedades mecânicas, serão analisadas as morfologias de fraturas geradas nos estudos de O'Connor, Dickson e Dowling (2018) e O'Connor e Dowling (2019). Após os testes de tração, avaliou-se usando microscopia eletrônica de varredura (SEM) a superfície de fratura, a qual se mostrou predominantemente dúctil, como mostrado na Figura 58 (O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018).

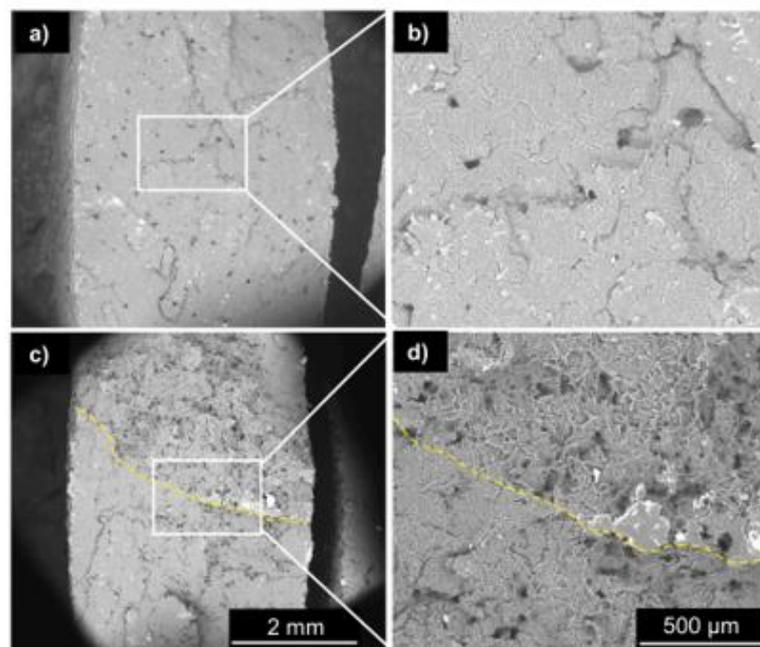
Figura 58 - Análise da superfície de fratura em corpos de prova produzidos por MJF



Fonte: O'CONNOR; DICKSON, DOWLING, 2018

Rosso et. al. (2020) encontrou um mecanismo de fratura parecido para o processo MJF como mostrado na Figura 59, na qual se compara a fratura de corpos de prova produzidos por processo MJF (c e d) e SLS (a e b). Para as amostras produzidas por sinterização a laser, a fratura se mostrou com aspecto um pouco mais frágil, confirmado pelos valores de tenacidade e ductilidade apresentados na Tabela 14. Do ponto de vista da resistência mecânica, observa-se que ambos apresentam respostas parecidas.

Figura 59 - Comparação da superfície de fratura de peças produzidas por SLS (a e b) x MJF (c e d)



Fonte: ROSSO et. al., 2020

Tabela 14 - Comparação de propriedades mecânicas obtidas por processos SLS e MJF

Propriedades mecânicas: SLS x MJF				
	Tenacidade (J/m ³)	Ductilidade (%)	Resistência Mecânica (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
SLS	3,8±0,9	10,3±1,9	46,93±0,86	1870±40
MJF	11,7±2,1	30,0±4,9	45,59±0,38	1530±60

Fonte: ROSSO et. al., 2020

Analisando os valores obtidos na tabela verifica-se uma proximidade das tensões limite de resistência com os estudos realizados pela fabricante, em O'Connor, Dickson e Dowling (2018) e O'Connor e Dowling (2019) já apresentados na Figura 50, na qual os valores ficam entre 47 MPa e 50 MPa. Para ductilidade, como já visto, há grandes variações inclusive superiores a 100% nos estudos já apresentados. O valor apresentado em Rosso et. al. (2020) se aproxima da direção Y apresentada pela fabricante, que foi de 27%. O módulo de elasticidade obtido se coloca em posição intermediária entre os valores obtidos por outros estudos apresentados na Figura 49. O cálculo da tenacidade apresentado, único trabalho de conhecimento deste mestrando com indicação desta propriedade, foi realizado por integração da área abaixo da curva de tensão – deformação verdadeiras.

Vale ressaltar que neste estudo também não se apresentou valores para tensão limite de escoamento, sendo esta de extrema importância para dimensionamento de produtos em materiais poliméricos.

Em resumo, verifica-se que há alguns estudos sobre a tecnologia MJF com diferentes análises. Entretanto, as impressões realizadas ocorrem majoritariamente em direções ortogonais à mesa de impressão, sem variações de ângulos para verificar se há real isotropia de propriedades, em tração, entre as direções impressas. Além disso, verificou-se uma anisotropia marcante para componentes avaliados sob flexão, e apenas um estudo realizou análise sob tal esforço. Vale ressaltar também a baixa quantidade de dados avaliados para tensão de escoamento e do módulo de elasticidade em flexão, sendo estes dados importantes para dimensionamento de produtos em material polimérico. Desta forma, como citado nos objetivos, essa dissertação visa preencher estas lacunas de conhecimento.

Outra lacuna que visa se preencher é a de confirmar se há gradiente de temperatura na plataforma e verificar o quanto isso influencia nas propriedades mecânicas, dado este que não foi encontrado em nenhum estudo até então.

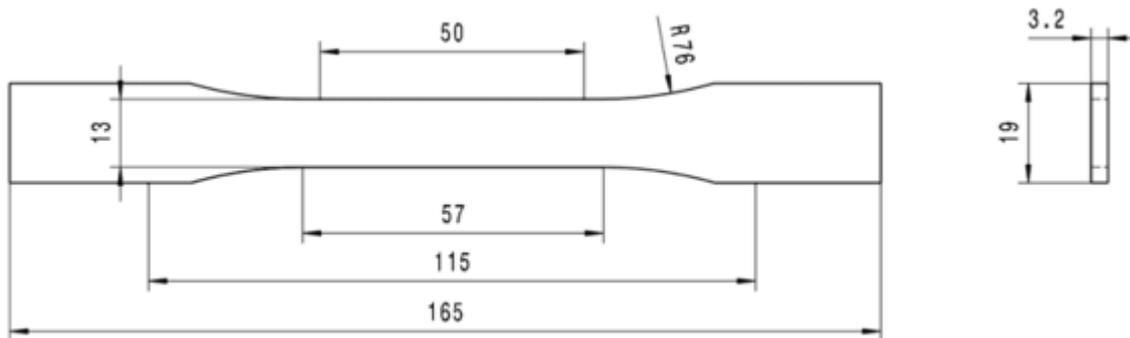
4 METODOLOGIA

Neste item serão apresentados os métodos de análises dos corpos de prova de tração e flexão do ponto de vista dimensional, mecânico, morfológico e térmico.

4.1 CORPOS DE PROVA, POSICIONAMENTO E NOMENCLATURA

Para os ensaios mecânicos de tração foram desenhados os corpos de prova tipo 1 da norma ASTM D638-03. Os corpos de prova têm o formato de gravata e foram modelados utilizando software de CAD (CATIA), como mostrado na Figura 60.

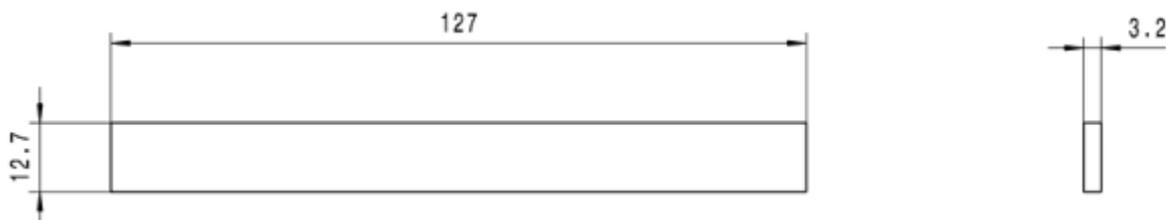
Figura 60 - Corpo de prova de tração modelado



Fonte: ASTM D638 adaptado

Para o ensaio de flexão os corpos de prova foram modelados segundo a norma ASTM D790-03. O software utilizado foi o mesmo do modelamento dos CP's de tração (CATIA). O CP de flexão pode ser visto na Figura 61.

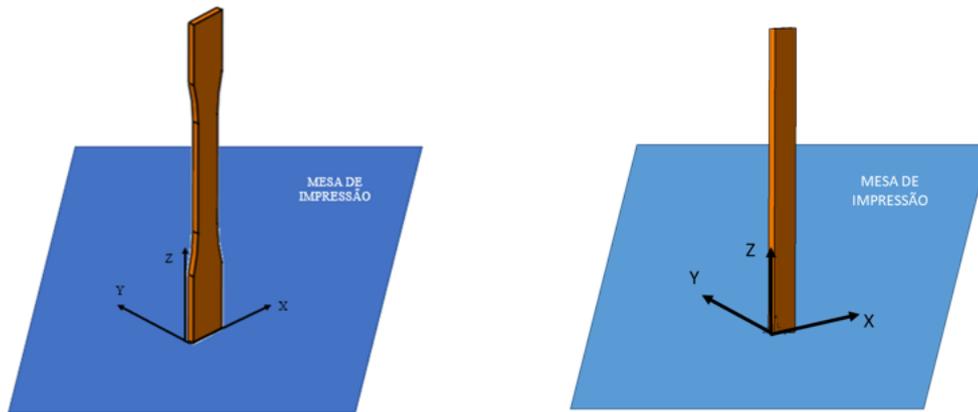
Figura 61 – Corpo de prova de flexão modelado



Fonte – ASTM D790-03 adaptado

Após desenhados, utilizando o próprio CATIA, foi feito um posicionamento virtual a fim de verificar as diferentes possibilidades de direção de impressão rotacionando os corpos de prova em torno dos eixos X e Y partindo de um corpo de prova de referência cujo plano de deposição é o XY, ou seja, a peça é construída na direção Z, como mostrado na Figura 62. Esse posicionamento foi de fundamental importância para definição das posições de impressão bem como as angulações em relação ao plano de impressão, que como apresentado podem influenciar no comportamento mecânico das amostras, gerando assim anisotropia de propriedades.

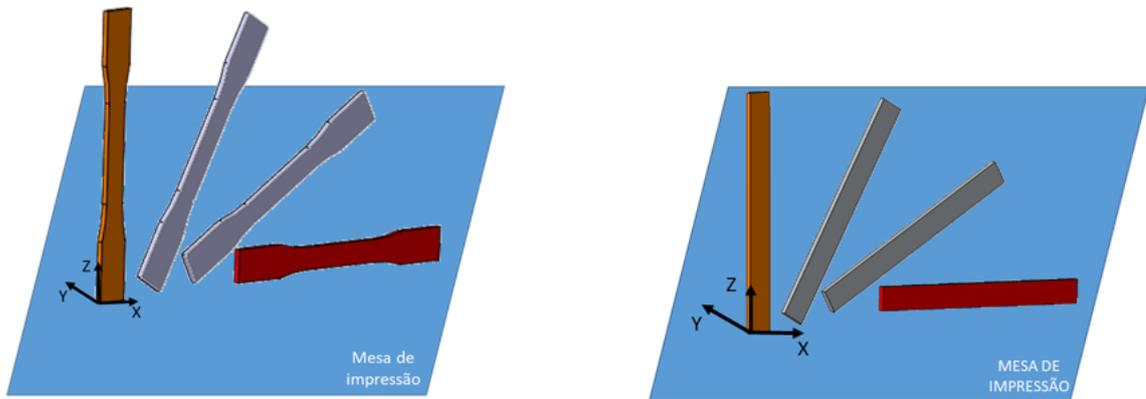
Figura 62 – Corpos de prova de tração (esq.) e flexão (dir.) usados como referência e eixos de rotação para criação de direções de impressão



Fonte: Autor

Com a utilização do software de CAD para realizar esse posicionamento primário foram criados 3 sub-grupos de posição de impressão que serão explicados em detalhes a seguir. Tomou-se como referência o corpo de prova que está posicionado perpendicularmente ao plano de impressão, destacado na cor laranja na Figura 62. Os outros corpos de prova do primeiro sub-grupo foram gerados a partir deste sendo que uma nova direção de impressão era criada a cada 30° de rotação em torno do eixo Y até totalizar 90°, ou seja, além da referência tem-se mais 3 corpos de prova no subgrupo. Dessa forma, tem-se o primeiro sub-grupo criado, o qual será chamado de A e é mostrado na Figura 63.

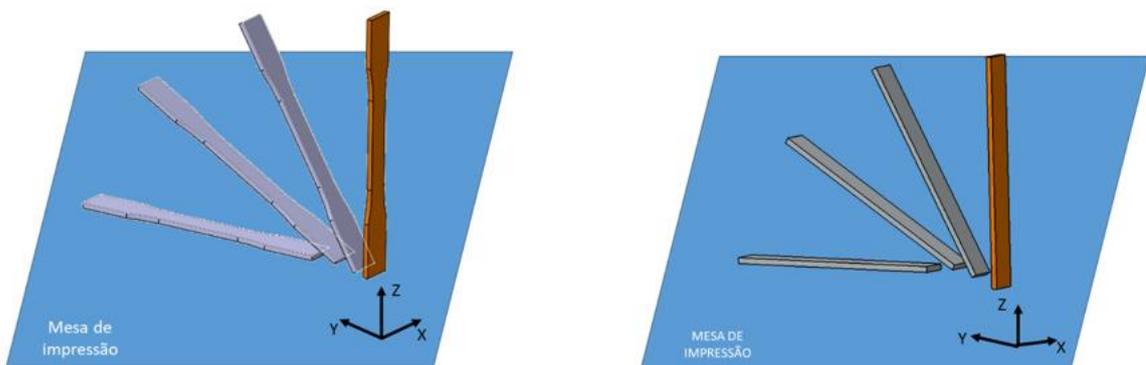
Figura 63 - Distribuição dos corpos de prova do subgrupo A para tração e flexão



Fonte: Autor

Um outro sub-grupo, agora chamado de B, foi criado partindo do mesmo corpo de prova de referência e com a mesma premissa de criar uma nova direção a cada 30° de rotação até totalizar 90° . Entretanto, o eixo de rotação deixa de ser em torno de Y e passa a ser em torno do eixo X, gerando assim o sub-grupo B. Vale ressaltar que o corpo de prova de referência foi impresso apenas uma vez e na nomenclatura que será apresentada a seguir o mesmo pertence ao sub-grupo A. Ou seja, além da referência, são criados mais 3 corpos de prova neste sub-grupo. Dessa forma, tem-se o sub-grupo B criado mostrado na Figura 64.

Figura 64 - Distribuição dos corpos de prova do subgrupo B para tração e flexão

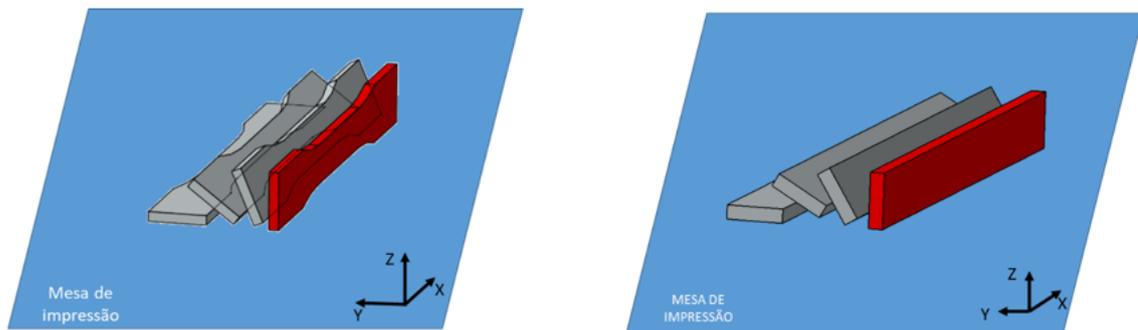


Fonte - Autor

O último corpo de prova do sub-grupo A, ou seja, o corpo de prova do sub-grupo A à 90° servirá de referência ao terceiro sub-grupo criado, o grupo C, e por isso na nomenclatura será tratado como R2 e está destacado em vermelho na Figura 63. Dessa forma, o sub-grupo C, partindo da segunda referência, terá suas direções de impressão formadas rotacionando a cada

30° novamente em torno do eixo X, seguindo a mesma premissa de totalizar 90° dos sub-grupos anteriores. Ou seja, além da referência R2, tem-se mais 3 corpos de prova neste sub-grupo. Forma-se, portanto, o sub-grupo C mostrado na Figura 65.

Figura 65 - Distribuição dos corpos de prova do subgrupo C para tração e flexão



Fonte: Autor

Dessa forma, somando-se todos os corpos de prova de cada sub-grupo, tem-se um total de 10 corpos de prova por grupo. Como citado nos objetivos, além da variação das direções de impressão, deseja-se avaliar se há anisotropia causada por diferentes taxas de resfriamento. Em outras palavras, deseja-se avaliar se há anisotropia de propriedades em corpos de prova impressos próximos as paredes frontal e traseira da cuba. Para uma boa análise dos resultados, os corpos devem ser avaliados em tréplicas, ou seja, deve-se possuir 3 corpos de prova de cada direção e de cada posição na cuba (próxima a parede frontal e próxima a parede traseira). Para isso, haverá 3 grupos próximos a parede frontal e 3 próximos a parede traseira da cuba, esquematicamente mostrado na Figura 66, somando um total 60 corpos de prova para tração e 60 corpos de prova para flexão.

É importante ressaltar que a dimensão das paredes frontal e traseira é de 380 mm, e, portanto, não é possível realizar o posicionamento dos 3 grupos no mesmo plano. Dessa forma foi necessário realizar o deslocamento do grupo central em altura em relação aos grupos das extremidades, ou seja, o grupo 2 e o grupo 5 não foram posicionados no mesmo plano dos grupos 1, 3, 4 e 6.

Figura 66 - Posicionamento dos grupos de impressão em relação a estação de construção (cuba) – Vista superior



Fonte: autor

Após o processo de impressão, os corpos de prova serão avaliados do ponto de vista morfológico, mecânico, térmico e químico, e para uma boa análise dos resultados é primordial possuir os corpos de prova bem identificados para avaliação da possível influência dos posicionamentos de impressão nas propriedades obtidas. Dessa forma, criou-se uma nomenclatura para cada corpo de prova que será apresentada a seguir a fim de identificá-los após a impressão e realizar a análise descrita nos objetivos. As marcações foram criadas nos próprios corpos de prova, na região de fixação para ensaio de tração, ou na extremidade dos corpos de prova de flexão, fora das regiões de apoio, utilizando o software *magics* e seguiram a seguinte lógica: O primeiro caractere será um número e representará o grupo do corpo de prova, ou seja, é um algarismo de 1 a 6. O segundo caractere será uma letra e representará o sub-grupo ao qual o corpo de prova pertence, ou seja, poderá ser A, B ou C. O terceiro caractere será uma letra e representará o posicionamento do grupo ao qual o corpo de prova pertence em relação a cuba, ou seja, poderá ser a letra F (parede frontal) ou T (para grupos próximos a parede traseira). Após esse caractere, será identificado o ângulo de impressão do corpo de prova e para tanto será utilizado 30, 60 ou 90. Entretanto, como citado anteriormente, há corpos de prova que são referência para as inclinações e estes, ao invés de um número indicando a inclinação, serão identificados com R ou R2, sendo R para o corpo de prova pertencente ao sub-grupo A (que dá origem aos corpos de prova dos sub-grupos A e B – corpo de prova na cor laranja nas Figuras 62, 63 e 64) e R2 para o corpo de prova pertencente ao sub-grupo A (que dá origem ao sub-grupo C – corpo de prova vermelho nas Figuras 63 e 65). Dessa forma, tem-se a completa formação das cubas, sendo uma para tração e uma para flexão. As nomenclaturas dos corpos de

prova estão apresentadas as Tabelas 15 a 20 e valem para os dois processos (tração e flexão) já que as posições serão mantidas nos dois ensaios.

Tabela 15 – Nomenclatura dos corpos de prova do grupo 1

Nome do Grupo	Nome do Sub-Grupo	Posição na Cuba	Ângulação	Nome do Corpo de Prova
1	A	F	R	1AFR
1	A	F	30	1AF30
1	A	F	60	1AF60
1	A	F	R2	1AFR2
1	B	F	30	1BF30
1	B	F	60	1BF60
1	B	F	90	1BF90
1	C	F	30	1CF30
1	C	F	60	1CF60
1	C	F	90	1CF90

Fonte: autor

Tabela 16 - Nomenclatura dos corpos de prova do grupo 2

Nome do Grupo	Nome do Sub-Grupo	Posição na Cuba	Ângulação	Nome do Corpo de Prova
2	A	F	R	2AFR
2	A	F	30	2AF30
2	A	F	60	2AF60
2	A	F	R2	2AFR2
2	B	F	30	2BF30
2	B	F	60	2BF60
2	B	F	90	2BF90
2	C	F	30	2CF30
2	C	F	60	2CF60
2	C	F	90	2CF90

Fonte: autor

Tabela 17 - Nomenclatura dos corpos de prova do grupo 3

Nome do Grupo	Nome do Sub-Grupo	Posição na Cuba	Ângulação	Nome do Corpo de Prova
3	A	F	R	3AFR
3	A	F	30	3AF30
3	A	F	60	3AF60
3	A	F	R2	3AFR2
3	B	F	30	3BF30
3	B	F	60	3BF60
3	B	F	90	3BF90
3	C	F	30	3CF30
3	C	F	60	3CF60
3	C	F	90	3CF90

Fonte: autor

Tabela 18 - Nomenclatura dos corpos de prova do grupo 4

Nome do Grupo	Nome do Sub-Grupo	Posição na Cuba	Ângulação	Nome do Corpo de Prova
4	A	T	R	4ATR
4	A	T	30	4AT30
4	A	T	60	4AT60
4	A	T	R2	4ATR2
4	B	T	30	4BT30
4	B	T	60	4BT60
4	B	T	90	4BT90
4	C	T	30	4CT30
4	C	T	60	4CT60
4	C	T	90	4CT90

Fonte: autor

Tabela 19 - Nomenclatura dos corpos de prova do grupo 5

Nome do Grupo	Nome do Sub-Grupo	Posição na Cuba	Ângulação	Nome do Corpo de Prova
5	A	T	R	5ATR
5	A	T	30	5AT30
5	A	T	60	5AT60
5	A	T	R2	5ATR2
5	B	T	30	5BT30
5	B	T	60	5BT60
5	B	T	90	5BT90
5	C	T	30	5CT30
5	C	T	60	5CT60
5	C	T	90	5CT90

Fonte: autor

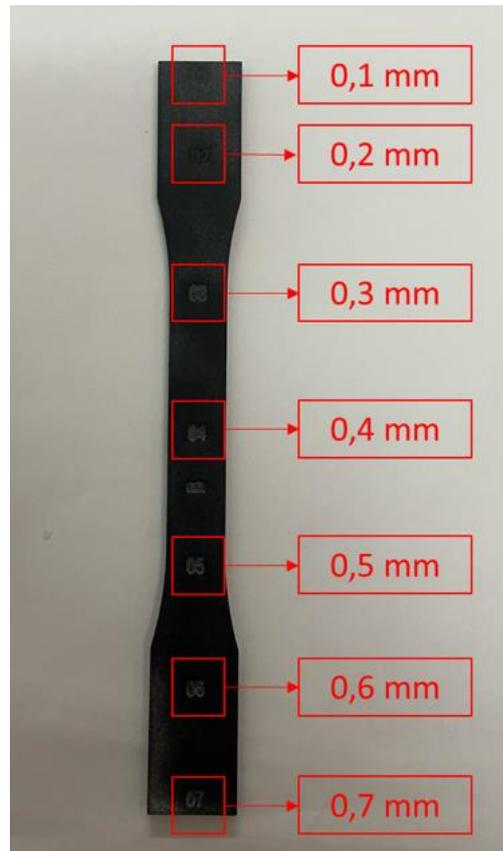
Tabela 20 - Nomenclatura dos corpos de prova do grupo 6

Nome do Grupo	Nome do Sub-Grupo	Posição na Cuba	Ângulação	Nome do Corpo de Prova
6	A	T	R	6ATR
6	A	T	30	6AT30
6	A	T	60	6AT60
6	A	T	R2	6ATR2
6	B	T	30	6BT30
6	B	T	60	6BT60
6	B	T	90	6BT90
6	C	T	30	6CT30
6	C	T	60	6CT60
6	C	T	90	6CT90

Fonte: autor

Como citado, os caracteres que compõem o nome do corpo de prova foram marcados utilizando o software *magics* utilizando uma fonte tamanho 12 e para garantir a completa visibilidade da marcação, foi impresso um corpo de prova de teste com diferentes profundidades de marcação variando de 0,1 mm até 0,7 mm. A profundidade escolhida para os caracteres foi de 0,5 mm e o corpo de prova de teste é mostrado na Figura 67 com as marcações identificadas.

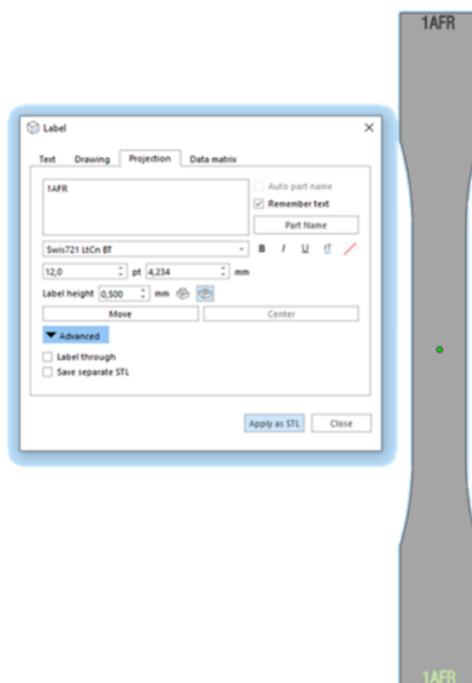
Figura 67 – Corpo de prova teste com variação de profundidades de marcação



Fonte - Autor

Escolhida a profundidade da marca, realizou-se a marcação em todos os corpos de prova e o resultado virtual do corpo de prova com a devida marcação pode ser visto na Figura 68 na qual utilizou-se como exemplo o corpo de prova 1AFR.

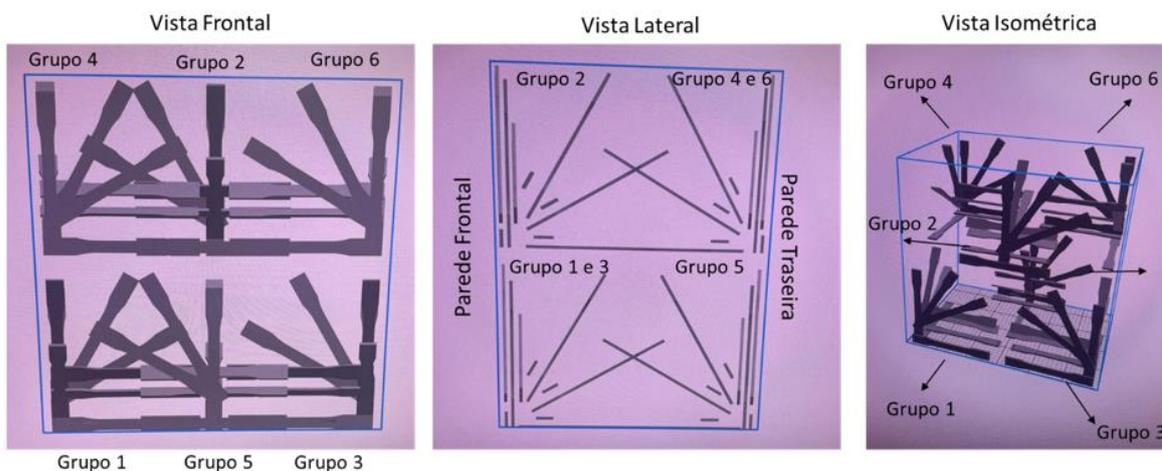
Figura 68 – Corpo de prova no magics com exemplo de marcação de identificação



Fonte - Autor

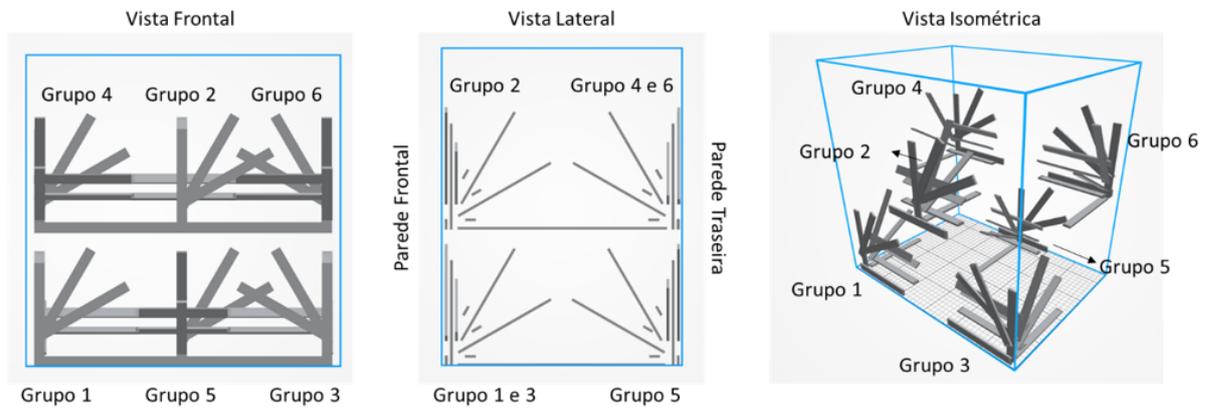
Explicada a metodologia para posicionamento, mostra-se na Figura 69 e 70, em diferentes vistas, o posicionamento de todos os corpos de prova de tração e flexão, respectivamente. Neste momento é importante ressaltar que as impressões foram realizadas em dois processamentos diferentes, sendo um para tração e outro para flexão.

Figura 69 - Distribuição de todos os corpos de prova de tração na cuba de impressão



Fonte: autor

Figura 70 – Distribuição de todos os corpos de prova de flexão na cuba de impressão

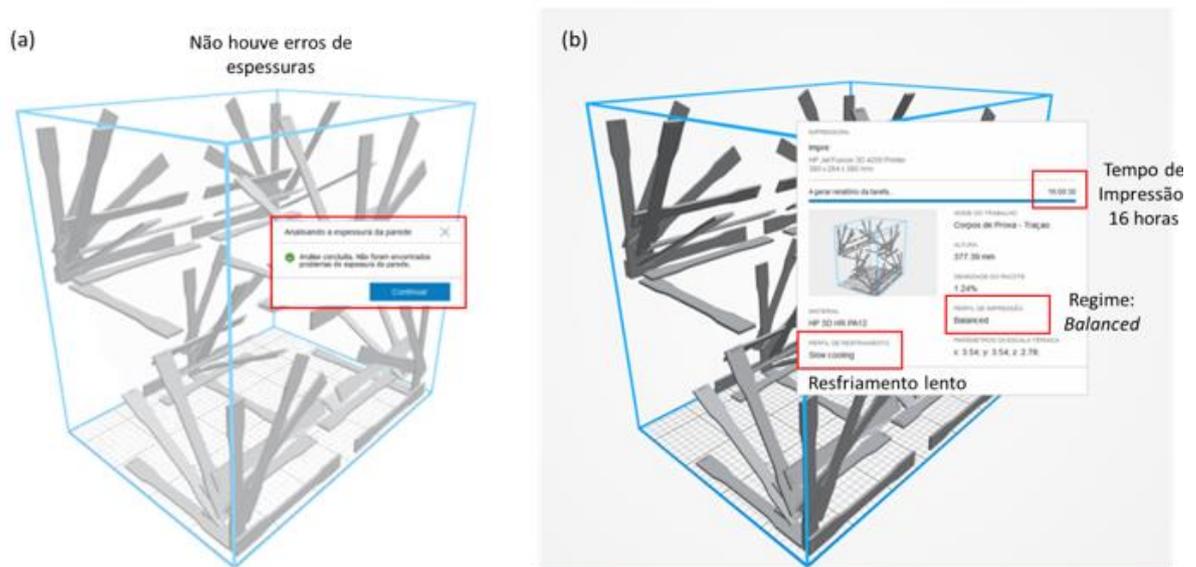


Fonte - Autor

4.2 IMPRESSÃO, PÓS PROCESSAMENTO, MEDIÇÃO E ENSAIO DOS CORPOS DE PROVA

Feita toda a preparação no software, que foi apresentada na secção 4.1, a cuba foi enviada do computador para a impressora sem erros de espessura e com os parâmetros como pode ser visualizado na Figura 71 (tanto a cuba de tração quanto a de flexão passaram pelo mesmo processo exemplificado na Figura 71 pela cuba de tração).

Figura 71 – Análise de espessuras realizada automaticamente pelo software sem erros identificados (a). Parâmetros de impressão (b)



Fonte - Autor

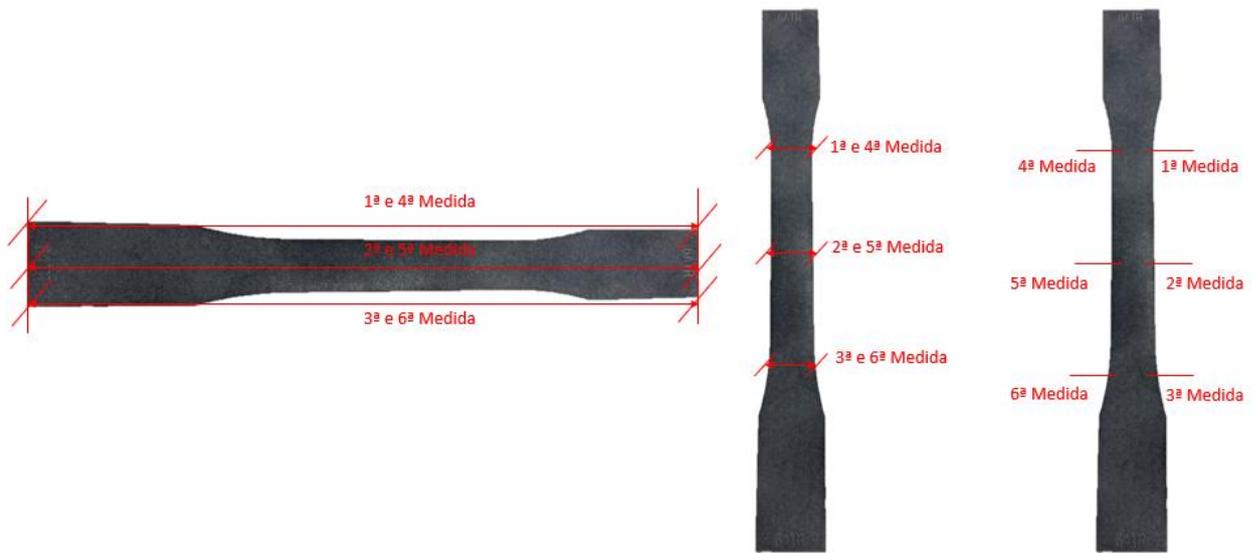
A produção dos corpos de prova, tanto de tração quanto de flexão, foi realizada utilizando a tecnologia MJF da HP na impressora de modelo 4200 de propriedade da Volkswagen do Brasil, mais especificamente da área da Fábrica Piloto Central. A matéria prima utilizada foi a Poliamida 12 em pó e o preenchimento dos produtos foi de 100%. A proporção de pó reutilizado *versus* pó novo foi de 80:20, sendo esta a relação mais indicada pela fabricante. O regime utilizado para a impressão foi o *balanced*, o qual, segundo a fabricante, harmoniza bem as propriedades mecânicas, o acabamento superficial e o tempo de fabricação. A impressão da cuba de tração foi iniciada em 02/02/2022 às 9h10min e término às 2h da manhã do dia 03/02/2022 (16 horas de processo de impressão). Já a cuba de flexão foi iniciada em 09/02/2022 às 8 horas e término às 23 horas do mesmo dia (14 horas de processo de impressão). Durante o processo de impressão, nas primeiras 6 horas e meia (com passo de 30 minutos), foram tiradas fotos da distribuição de temperatura sobre o leito de pó.

Seguindo a recomendação da fabricante, o tempo de resfriamento (para resfriamento lento ou natural) deve ser de 3 vezes o tempo de impressão, portanto o tempo de resfriamento foi de 48 horas para a cuba de tração e 42 horas para a cuba de flexão, tempo no qual as cubas ficaram armazenadas em sala climatizada a 22°C. Passado o tempo de resfriamento, iniciou-se o desempacotamento dos corpos de prova (retirada dos corpos de prova da cuba).

Após extrair todos os CP's da cuba, os mesmos foram direcionados a estação de pós processamento (jateamento de esferas de vidro) já apresentada na Figura 28. Os corpos foram jateados em todas as suas superfícies a fim de remover o máximo de pó sobressalente das mesmas.

Com os CP's jateados, foram tomadas seis medidas de cada grandeza, ou seja, seis medidas de comprimento, seis de largura e seis de espessura. Para o comprimento dos corpos de prova de tração, a medição foi realizada com um paquímetro de 200 mm e uma resolução de 0,02 mm. As medidas foram tomadas da seguinte forma: duas medições próximas a marcação que identifica o grupo do corpo de prova (1ª e 4ª medição), duas medições na parte central (2ª e 5ª medição) e duas medições próximas a marcação da angulação do corpo de prova (3ª e 6ª medição). Para a medição da largura e espessura dos corpos de prova de tração e de todo corpo de prova de flexão utilizou-se um paquímetro digital de 150 mm e resolução de 0,01 mm. Para tomar as medidas de largura, posicionou-se o corpo e prova na direção vertical e tomou-se duas medidas na parte superior da largura útil (1ª e 4ª medição), duas na porção central (2ª e 5ª medição) e duas na parte inferior (3ª e 6ª medição). Para a medição da espessura posicionou-se o corpo de prova na direção vertical e tomou-se três medidas do lado direito do comprimento útil: uma na parte superior (1ª medição), uma na porção central (2ª medição) e uma na parte inferior (3ª medição) e três do lado esquerdo do comprimento útil: uma na parte superior (4ª medição), uma na porção central (5ª medição) e uma na parte inferior (6ª medição). Esse detalhamento é apresentado na Figura 72 (a medição dos corpos de prova de flexão foi análoga a exemplificada na Figura 72).

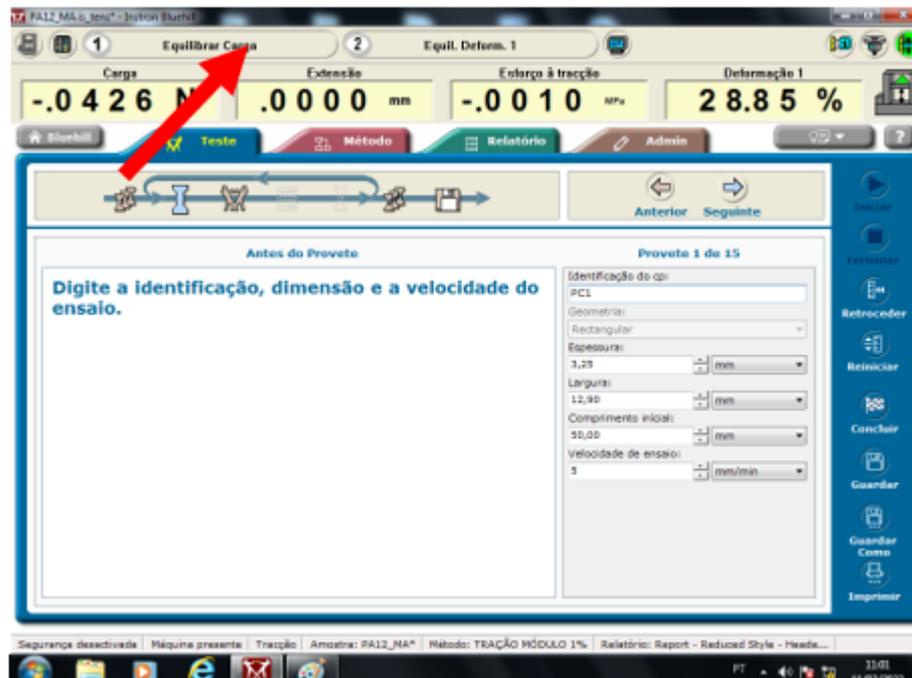
Figura 72 – Posições das medições dos corpos de prova



Fonte: Autor

Ensaio de tração segundo a norma ASTM D638 (Método de ensaio padrão para tração de polímeros) foram realizados em 3 corpos impressos como teste para certificar o procedimento desenhado. Para os ensaios utilizou-se o programa Instron-Bluehill, no qual os dados de entrada eram o nome do corpo de prova e suas medidas de largura e espessura para cálculo da área da secção transversal. Além disso, neste ponto insere-se a velocidade do ensaio, que foi de 5 mm/min. Antes de fixar cada corpo de prova na garra do equipamento a carga foi zerada, como mostrado na Figura 73.

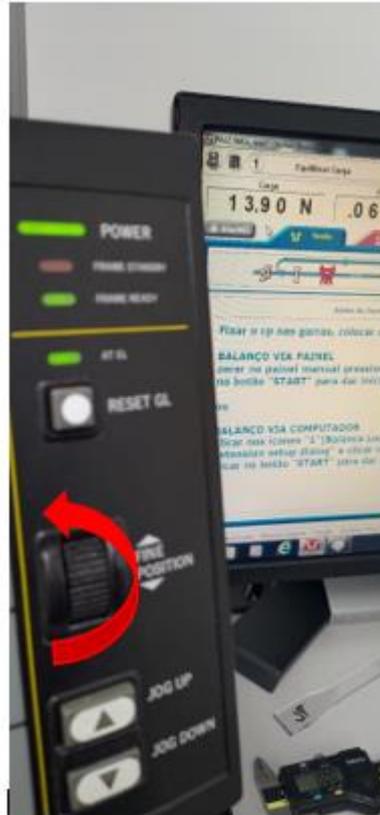
Figura 73 – Processo de zeragem da carga no software



Fonte – Autor

Com a carga zerada fixou-se os corpos de prova nas garras do equipamento garantindo que o CP ficasse em posição vertical exata. Com o corpo posicionado, realizou-se o ajuste fino da carga de forma a deixá-la um pouco positiva, ou seja, deixar o CP sob leve esforço de tração. Este processo pode ser visto na Figura 74.

Figura 74 - Processo de ajuste fino da carga



Fonte – Autor

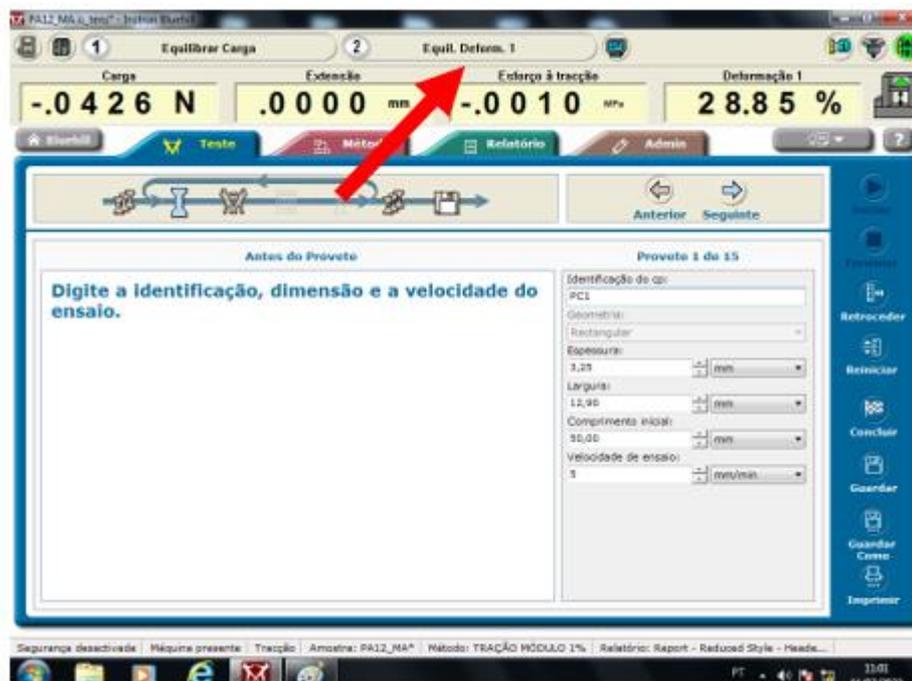
Com a carga ajustada e o CP fixado na garra do equipamento, posicionou-se o extensômetro de 50 mm com 100% de deformação máxima, mostrado na Figura 75, utilizado para extrair as propriedades do regime elástico e plástico. Com o extensômetro posicionado, realiza-se a zeragem da deformação, processo mostrado na Figura 76.

Figura 75 - Extensômetro utilizado no ensaio de tração - 50 mm com deformação máxima de 100%



Fonte – Autor

Figura 76- Processo de zeragem da deformação no software



Fonte – Autor

Feito isso, o ensaio foi iniciado e finalizado no momento da ruptura da amostra. O próprio software gera os dados na extensão .RAW, e estes dados foram inseridos no Microsoft Excel para tratamento e obtenção das seguintes propriedades: Módulo de elasticidade a 1% de deformação, tensão limite de escoamento seguindo um offset de 0,2% de deformação, tensão limite de resistência e alongamento total.

Para obtenção do módulo de elasticidade, localizou-se o ponto mais próximo a 1% de deformação e dividiu-se o mesmo por 100 para deixá-lo em valor absoluto. Feito isso, dividiu-se o esforço a tração do ponto pelo valor absoluto da deformação multiplicado por mil com o objetivo de extrair a propriedade já em GPa. Para isso, considerou-se que o ponto inicial foi a origem. Esse cálculo só pôde ser realizado devido ao fato de nesta região o material se apresentar com comportamento elástico linear.

Para obtenção da tensão limite de escoamento, traçou-se a reta do módulo de elasticidade da origem até a deformação de 1%. Com a equação desta reta, traçou-se uma reta paralela passando pela deformação de 0,2%, valor arbitrário adotado como solicita a norma utilizada para o ensaio (ASTM D638). Esse processo é comumente utilizado para determinação de tal propriedade em materiais metálicos. No ponto de intersecção desta reta com a curva do ensaio pode-se obter o valor da tensão limite de escoamento.

A tensão limite de resistência e deformação na ruptura são mais simples de se obter e representam os valores máximos de tensão e deformação obtidos no ensaio.

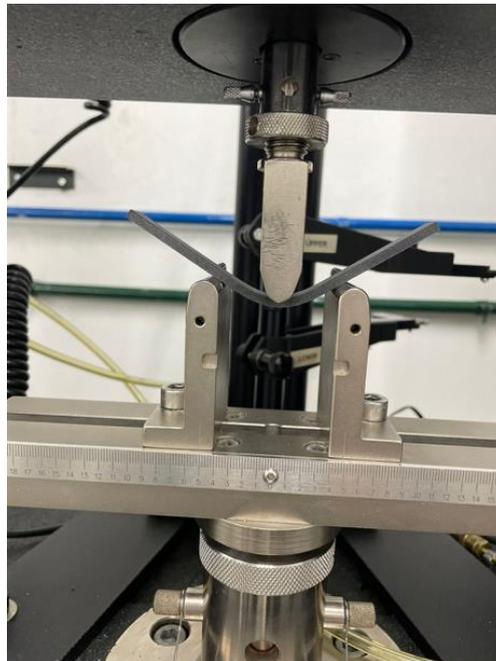
Além dos testes em tração, realizou-se também ensaios de flexão em 3 pontos segundo a norma ASTM D790-03 (Método de ensaio padrão para flexão em polímeros reforçados e não reforçados e materiais isolantes elétricos) em 3 amostras impressas para testes e validação do procedimento de ensaio. Analogamente, no início do ensaio de flexão, insere-se a identificação do corpo de prova bem como as medidas de largura e espessura e velocidade do teste, que neste caso foi de 1,3 mm/min. Assim como no ensaio de tração, no ensaio de flexão foi inserida uma pequena pré-carga sobre a amostra. Nestes ensaios foi verificado que, mesmo levando os corpos de prova de flexão a uma condição extrema de flexão, os mesmos não fraturaram, e na Figura 77 se mostra que mesmo sob alta deformação de flexão (imposta por movimento manual) não se atinge a ruptura. Devido ao fato de não ocorrer quebra das amostras em flexão, os ensaios foram finalizados em uma flecha de 10 mm, situação mostrada na Figura 78.

Figura 77 - Condição extrema em flexão não ocorrendo ruptura da amostra



Fonte - Autor

Figura 78 - Final do ensaio de flexão com 10 mm de flecha



Fonte - Autor

Os ensaios de tração oficiais serão conduzidos no equipamento Instron do Centro Universitário da FEI e seguindo a norma ASTM D638 (Método de ensaio padrão para tração de polímeros) e as propriedades avaliadas serão: Módulo de elasticidade a 1%, tensão limite de escoamento no offset 0,2% de deformação e de resistência, alongamento no escoamento e na ruptura, utilizando velocidade de solitação de 5 mm/min.

Além dos ensaios de tração, para avaliar o comportamento mecânico, serão conduzidos os ensaios de flexão oficiais no equipamento Instron do Centro Universitário da FEI e seguindo a norma ASTM D790-03 (Método de ensaio padrão para flexão em polímeros reforçados e não reforçados e materiais isolantes elétricos) e as propriedades avaliadas serão módulo de elasticidade a 1% e tensão limite de escoamento em 1% de offset, utilizando velocidade de solitação de 1,3 mm/min.

Além disso, serão avaliadas as superfícies de fratura utilizando uma lupa estereoscópica, relacionando as propriedades mecânicas com o modo de fratura.

Ensaio térmico de calorimetria exploratória diferencial, DSC, serão realizadas em amostras de pó virgem, misturado (reutilizado e virgem) e em peças pós processadas para verificar a influência do processo nas propriedades térmicas e para verificar o grau de cristalinidade em cada posição (próxima da parede e posição central).

Ensaio de difração de raios-X serão realizados a fim de obter o grau de cristalinidade e as fases presentes nas matérias primas e nos corpos de prova produzidos em diferentes direções e posições a fim de verificar se há diferenças entre diferentes angulações e em diferentes posições (longe ou próximas da parede).

5 RESULTADOS PARCIAIS E DISCUSSÃO

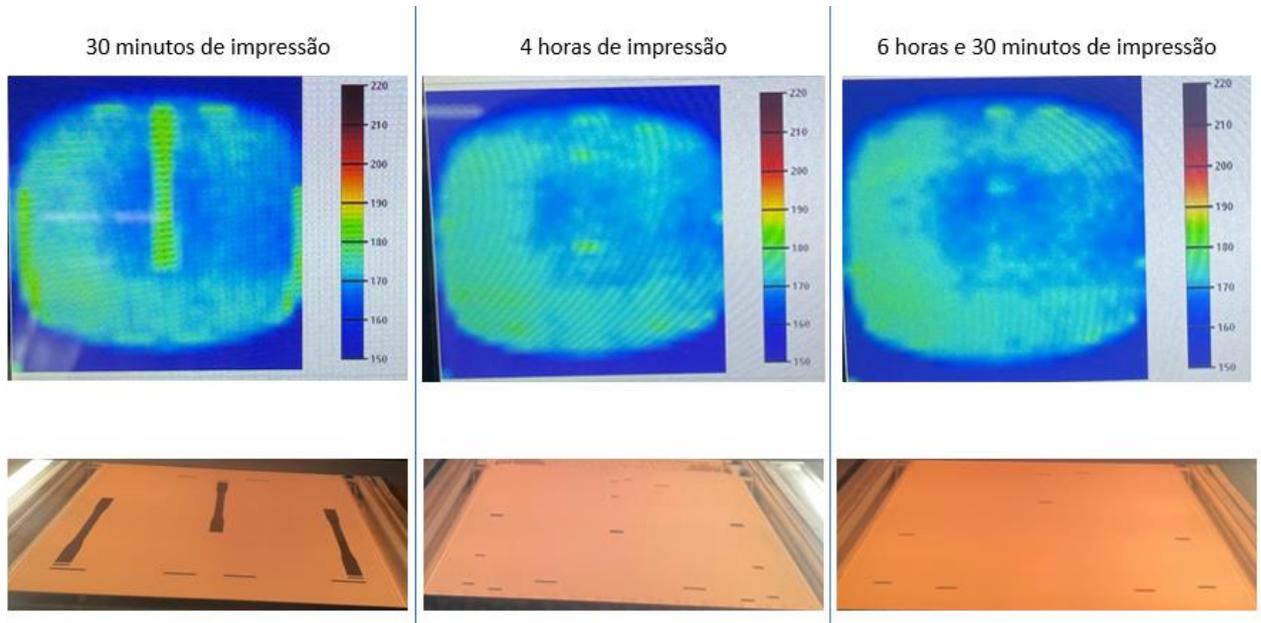
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos procedimentos e experimentos realizados.

5.1 TEMPERATURA NO LEITO DE IMPRESSÃO

No que diz respeito a temperatura de processamento, pode-se verificar na Figura 79 que, como era esperado, devido a necessidade de fundir o material, a região de temperatura mais alta acompanha a região onde foi depositado o agente de fusão (região onde está o corpo de prova evidenciado pela visualização de sua forma no mapa de cor). A figura citada mostra a distribuição de temperaturas no leito em três momentos distintos, sendo eles: 30 minutos de impressão (a), 4 horas de impressão (b) e 6 horas de impressão (c).

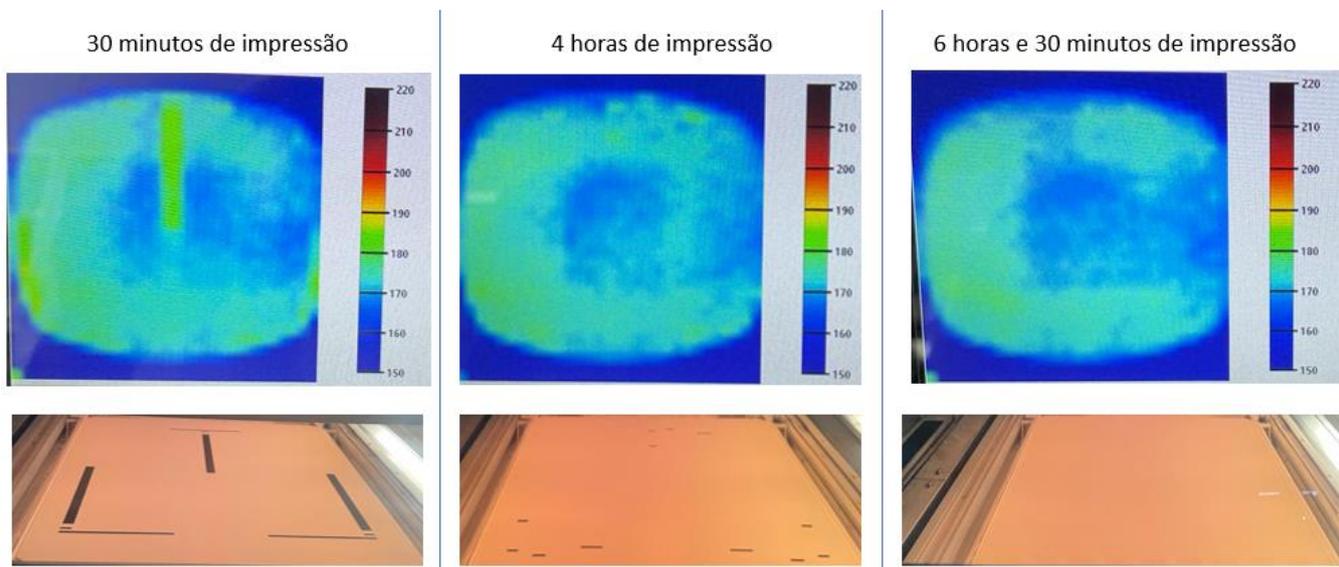
Apesar disso, é possível verificar que a região da parede frontal, em sua totalidade e nos três momentos, apresenta-se com temperaturas superiores ao restante do leito, principalmente se comparada a região central. Estratificando ainda mais o mapa de temperatura, verifica-se que a região esquerda da parede frontal é a que apresenta as maiores temperaturas (nos três instantes mostrados). Essa situação independe da densidade de corpos de prova em cada região pois nas três situações a distribuição de CP's nas extremidades direita e esquerda é parecida e ainda assim há diferenças de temperatura. Essa afirmação é confirmada quando se observa a imagem de 6h30min da Figura 80 (impressão de flexão) onde não há nenhum corpo de prova sendo impresso no momento da foto e o mapa de temperatura acompanha as observações citadas. Essa situação pode explicar os resultados dimensionais de comprimento, largura e espessura dos corpos de prova que serão apresentados a seguir, bem como a maior densidade de pó acumulado nos corpos de prova posicionados na parede frontal da cuba, já que como citado pela fabricante e apresentado na secção 3.1.2 na Figura 13, um maior aporte de calor pode aumentar a quantidade de pó segregado na superfície das peças.

Figura 79 – Distribuição de temperaturas em diferentes momentos do processo e visualização do leito de impressão no mesmo momento - Tração



Fonte – Autor

Figura 80 - Distribuição de temperaturas em diferentes momentos do processo e visualização do leito de impressão no mesmo momento - Flexão

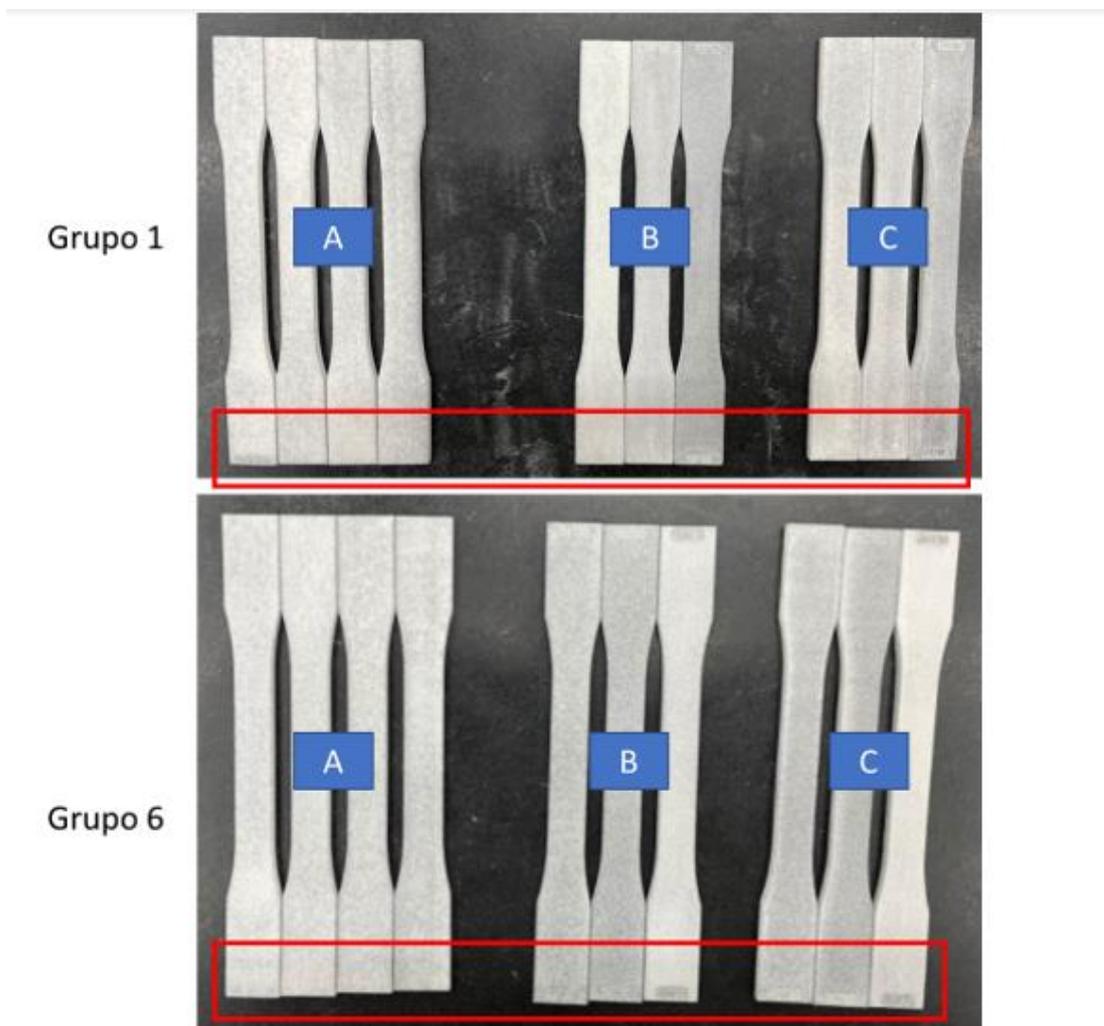


Fonte - Autor

5.2 AVALIAÇÃO VISUAL – ANTES E DEPOIS DO PÓS PROCESSAMENTO

Ao extrair os corpos de prova da cuba, verificou-se que em alguns deles a densidade de pó sobre as superfícies era maior do que em outros. Inclusive, nesses que apresentavam uma camada mais densa, a remoção utilizando o aspirador da estação de processamento foi mais difícil. Essa afirmação pode ser confirmada pela Figura 81, na qual verifica-se diferença de nitidez entre as marcações de nomenclatura nos grupos 1 e 6 usados como exemplo.

Figura 81 – Corpos de prova de tração extraídos da cuba antes da fase de pós processamento

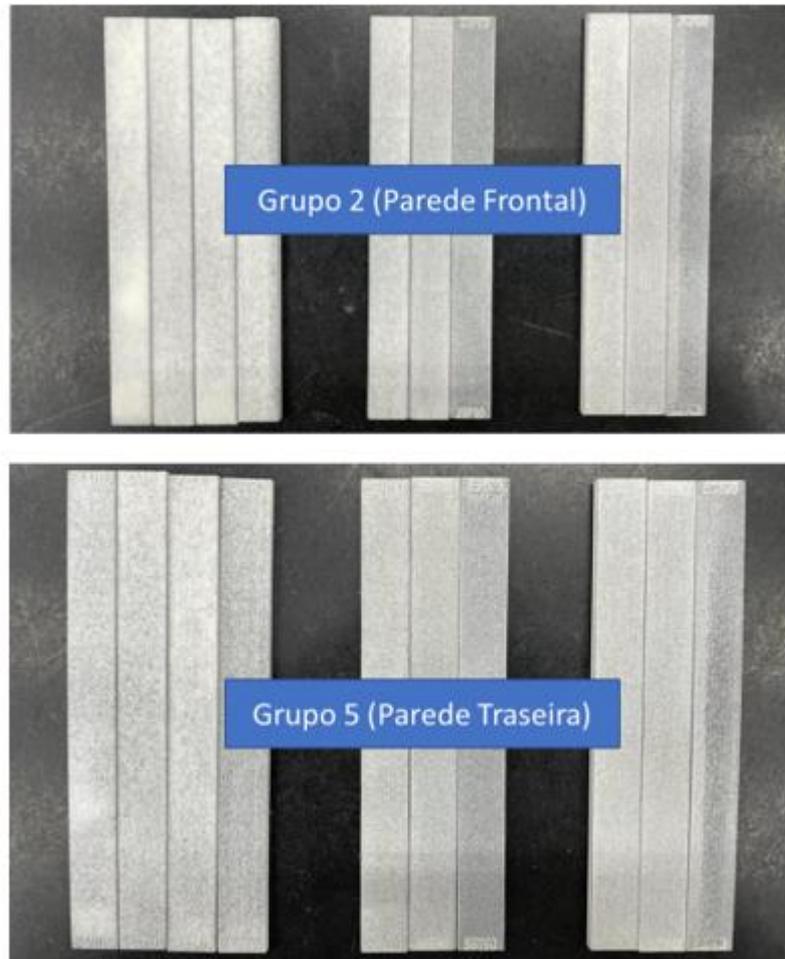


Fonte – Autor

É possível verificar que as marcações podem ser vistas mais facilmente nos sub-grupos B e C, enquanto no grupo A mal podem ser vistas. Essa diferença pode ser fruto do posicionamento dos corpos de prova de forma que as superfícies de marcações do sub-grupo A

ficaram paralelas as paredes da cuba. Essa mesma situação foi observada nos corpos de prova de flexão, os quais são mostrados na Figura 82.

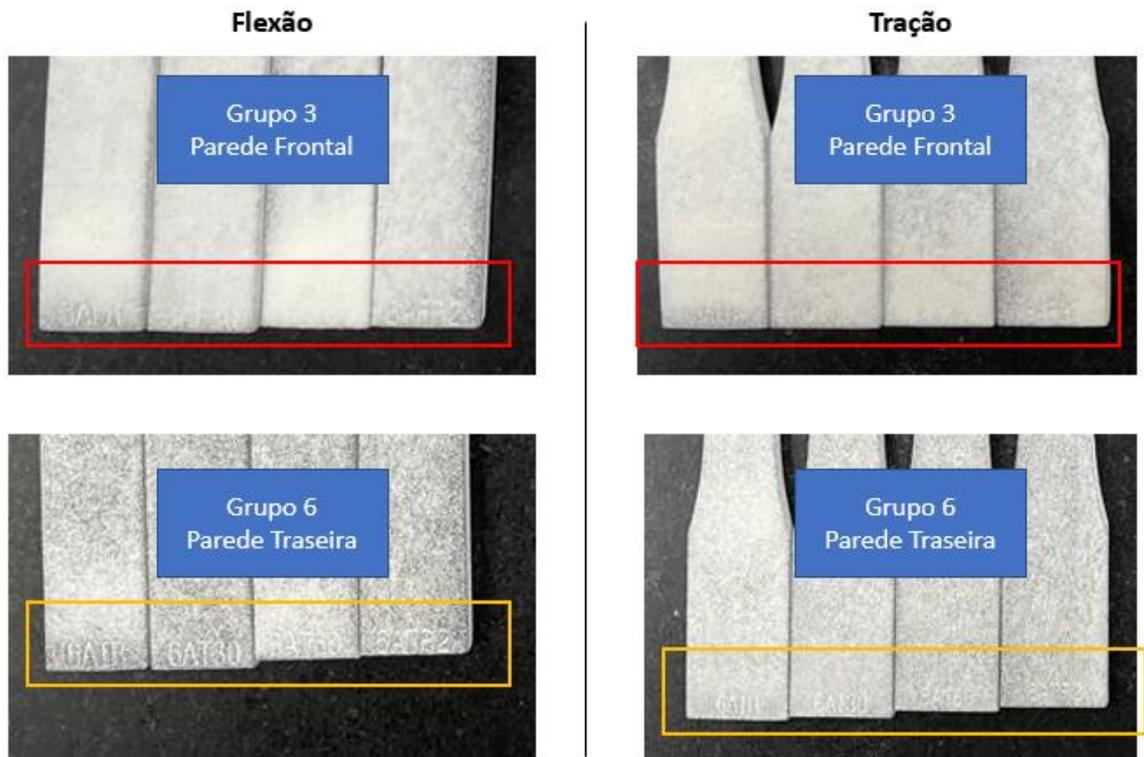
Figura 82 – Corpos de prova de flexão extraídos da cuba antes da fase de pós processamento



Fonte – Autor

Outra variação observada foi a diferença entre o acúmulo de pó nos corpos de prova dos grupos da parede frontal e da parede traseira, tanto para as amostras de tração quanto para as de flexão. Na Figura 83 pode-se verificar que o grupo 6 (parede traseira), antes do jateamento, apresentava uma camada de pó menos espessa se comparado ao grupo 3 (parede frontal). Essa afirmação pode ser verificada pela maior facilidade em identificar as marcações do grupo 6 (região destacada pelo quadro amarelo) se comparado ao grupo 3 (região destacada pelo quadro vermelho). Essa situação pode ser fruto da maior temperatura imposta a parede frontal se comparada a parede traseira mostrada nas Figuras 79 e 80 do capítulo 5.1.

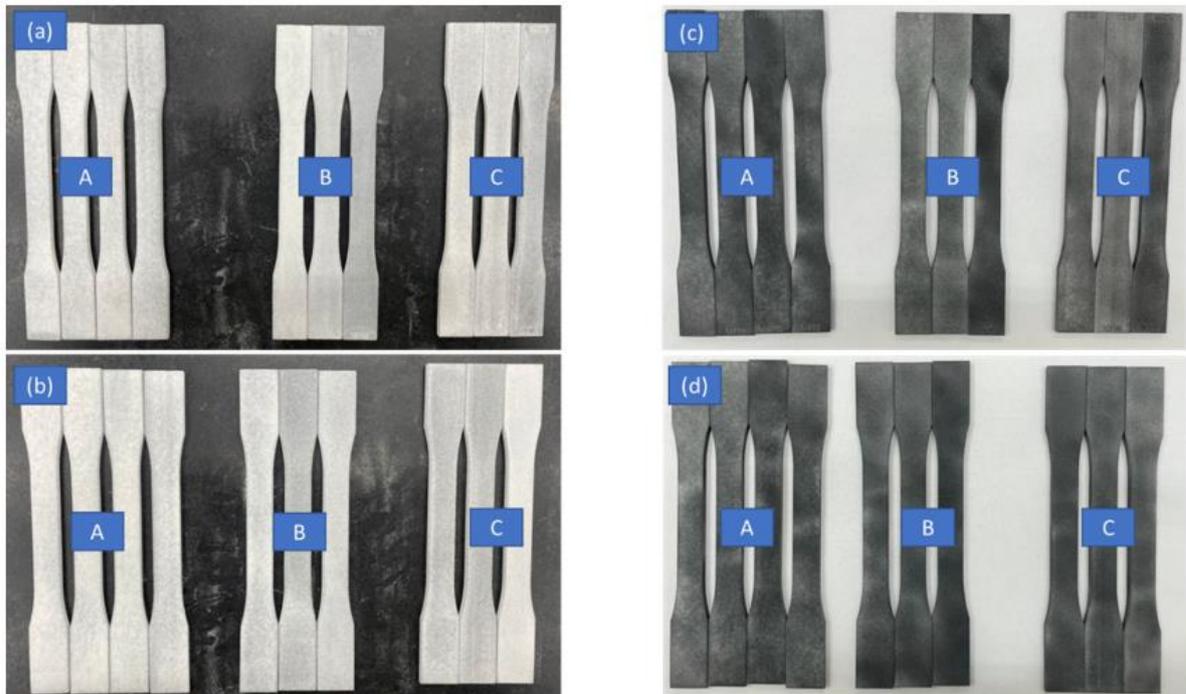
Figura 83 – Diferença na quantidade de pó segregado sobre as superfícies das peças impressas próximas a parede fronta e traseira



Fonte - Autor

Após retirar os corpos de prova de tração e flexão da cuba, os mesmos foram direcionados para a estação de jateamento de esferas de vidros, sendo esta fase requisito básico no processo de impressão MJF. O resultado após essa fase pode ser visto na Figura 84, na qual mostra-se a superfície de marcação da nomenclatura (a) e sua face oposta (b) antes do pós processamento, e depois (c e d).

Figura 84– Amostras do grupo 1 antes e depois da fase de pós processamento



Fonte - Autor

Essa figura confirma a necessidade do pós-processamento e mostra visualmente a diferença no acabamento das amostras.

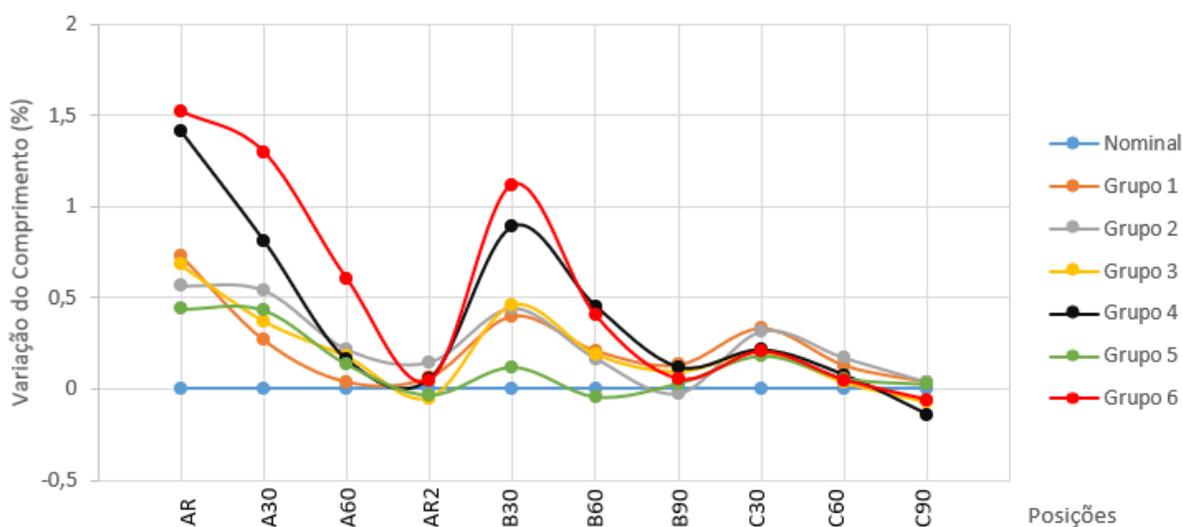
5.3 MEDIÇÃO DE COMPRIMENTO, LARGURA E ESPESSURA

Os corpos de prova de tração e flexão foram medidos em comprimento total (comprimento teórico de 165 e 127 mm, respectivamente), largura da área útil (teórico de 13 e 12,7 mm, respectivamente) e espessura (teórico de 3,2 mm) após o pós-processamento. Essa medição teve como objetivo verificar se há variações em diferentes posições da cuba (grupo 1 a 6) e variações entre as 10 posições de cada grupo (angulações) e identificar possíveis fatores para as variações. As medições foram plotadas e estão apresentadas nas Figuras 85 a 90.

Observando os gráficos das Figuras 85 e 86 verifica-se que, tanto para flexão quanto para tração, há posições que apresentam grandes variações em comprimento em todos os grupos, como é o caso das amostras de referência (AR), amostras em 30° do sub-grupo A (A30) e amostras a 30 do sub-grupo B (B30). A amostra AR possui seu comprimento perpendicular ao plano de deposição, ou seja, cada camada depositada aumenta diretamente seu comprimento e observando o gráfico verifica-se que esta amostra se apresenta como a pior em relação aos

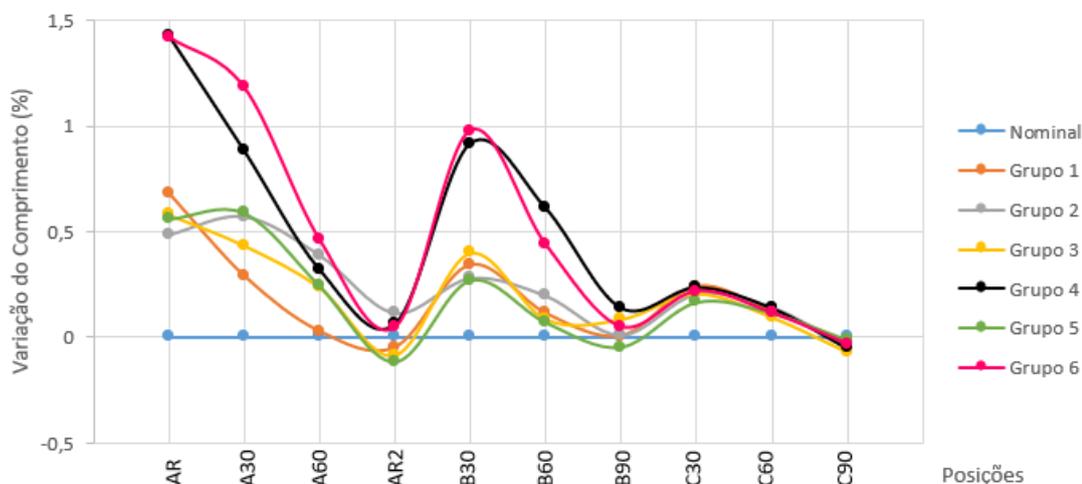
desvios percentuais de comprimento. As outras posições citadas com altos desvios não estão diretamente na posição vertical, porém decompondo o ângulo de inclinação verifica-se que uma de suas componentes está sempre na direção de seu comprimento e outra na direção da espessura (caso do grupo B) ou na direção da largura (caso do grupo A). É possível verificar que as posições que apresentaram menores desvios para o comprimento foram as direções C90, B90 e AR2, as quais apresentam o plano de deposição na direção da espessura, da espessura e da largura, respectivamente.

Figura 85 – Variação de comprimento x Posição de impressão para os CP's de tração



Fonte – Autor

Figura 86 - Variação de comprimento x Posição de impressão para os CP's de flexão

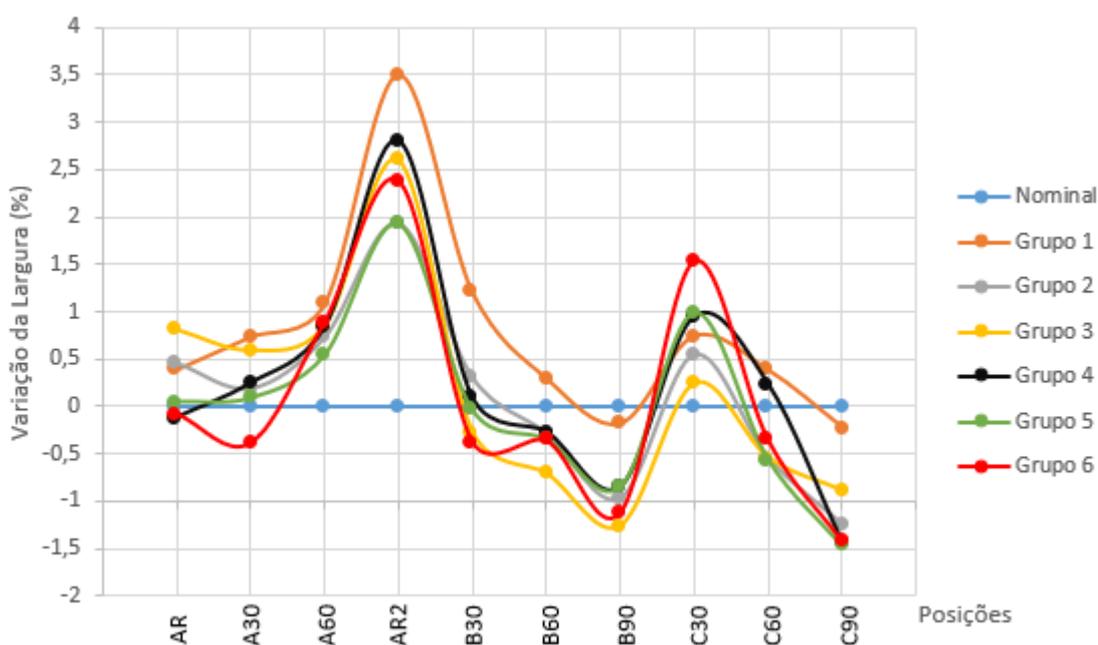


Fonte - Autor

Observando as variações de largura nas Figuras 87 e 88 verifica-se a situação semelhante à do comprimento, ou seja, verifica-se que existe uma direção de maior variação, que é a AR2 (tanto para tração quanto para flexão) cuja largura está perpendicular ao plano de deposição, ou seja, nessa amostra, cada camada depositada aumenta diretamente a largura.

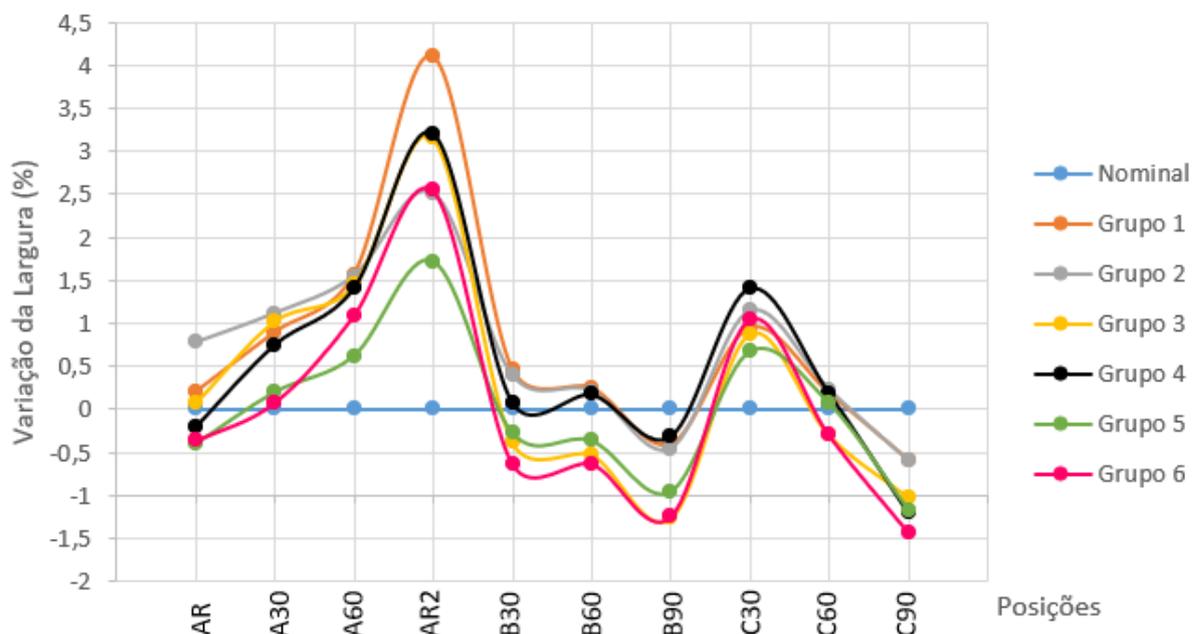
Observa-se que as direções que apresentaram menores desvios foram as direções AR, B30 e B60 das quais apenas a A30 possui uma das componentes de sua inclinação (a menor delas) na direção da largura.

Figura 87 - Variação de Largura x Posição de impressão para CP's de tração



Fonte – Autor

Figura 88 - Variação de Largura x Posição de impressão para CP's de flexão



Fonte - Autor

Para a espessura as piores posições foram a C90 e a B90 (tanto para tração quanto para flexão), de acordo com as Figuras 89 e 90, o que vai de encontro às análises do comprimento e largura, visto que tal posição possui seu plano de deposição na direção de crescimento da espessura, ou seja, cada camada depositada aumenta diretamente a espessura. As melhores direções foram: B60 e C30, sendo que ambas apresentam uma das componentes da inclinação na direção da espessura.

Apesar de apresentar um comportamento análogo as grandezas de comprimento e largura, verifica-se que para espessura a grandeza dos desvios é maior chegando a quase 10%. Dessa forma, é importante destacar que neste caso, tratando-se de espessuras finas em determinadas direções, pode haver variação considerável nas áreas de secções transversais e por conseqüências nos esforços que se pode impor ao material.

Figura 89 - Variação de Espessura x Posição de impressão para CP's de tração

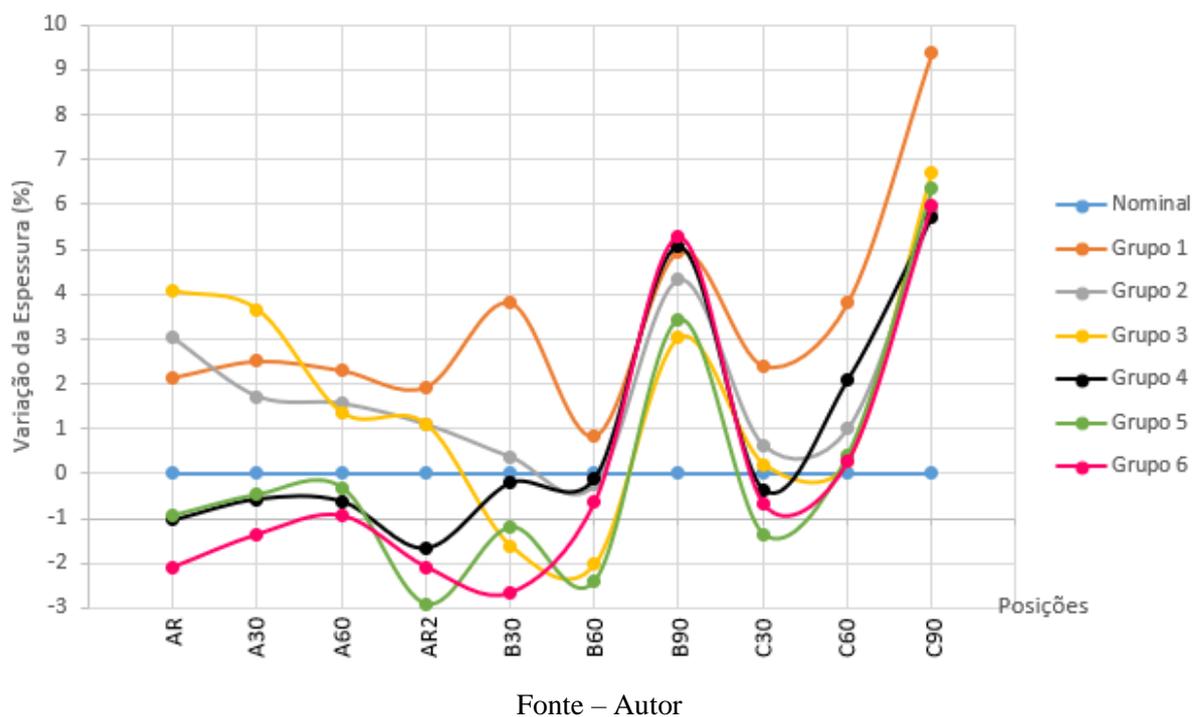
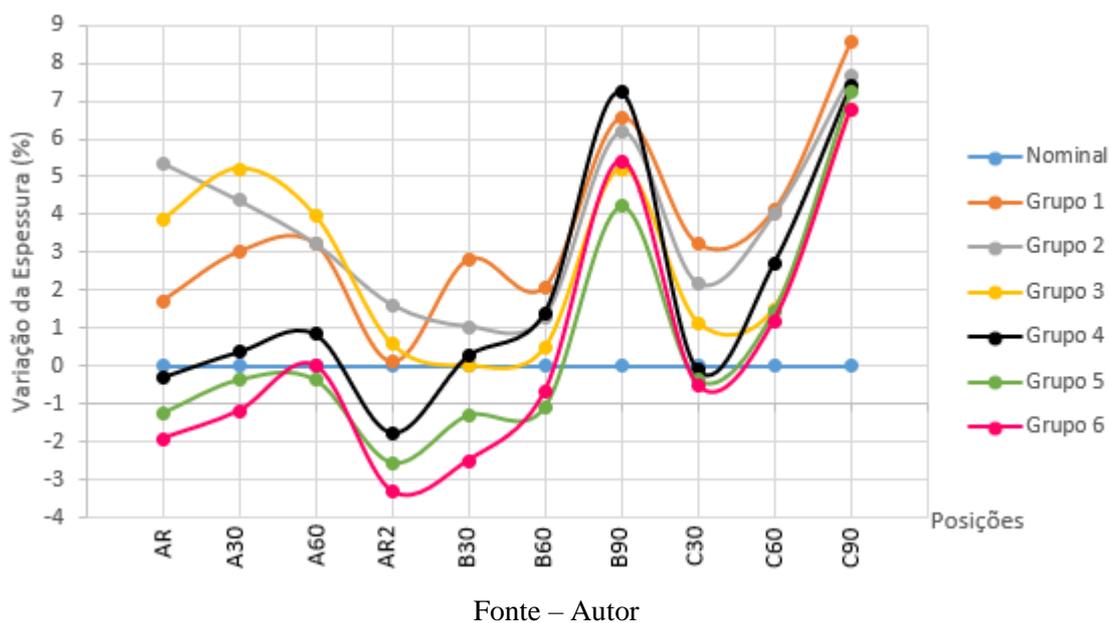


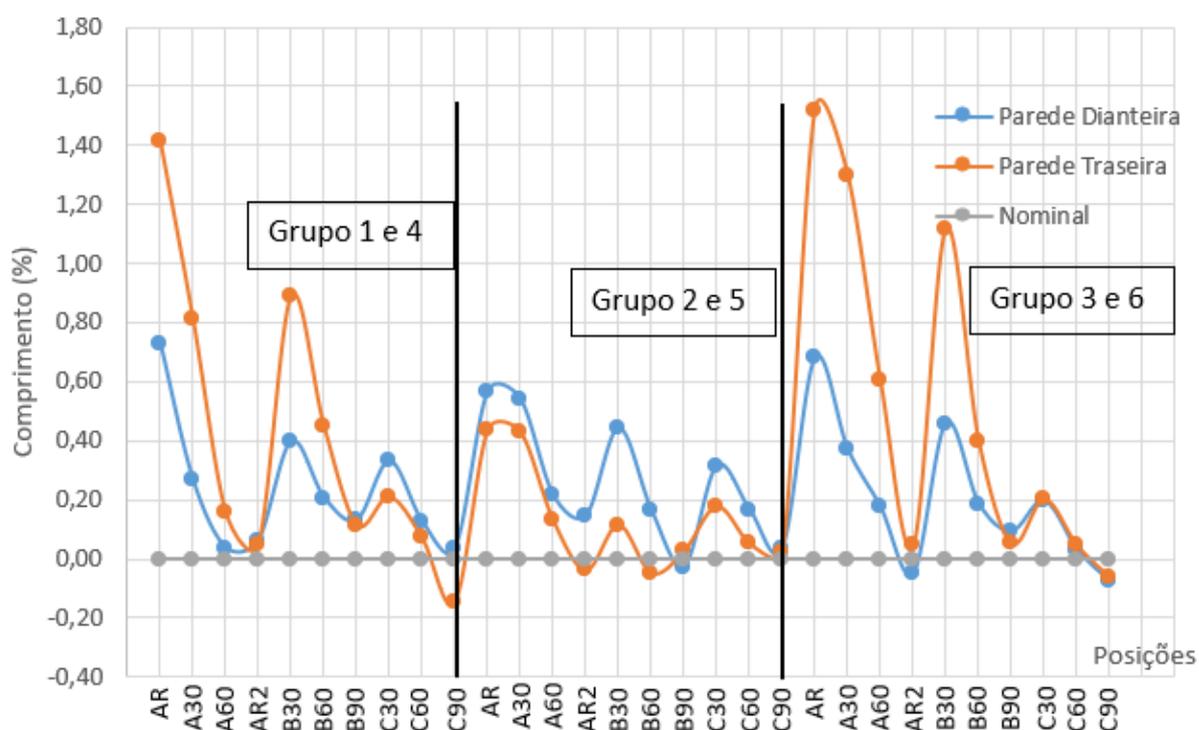
Figura 90 - Variação de Espessura x Posição de impressão para CP's de flexão



Outra análise realizada foi traçando todos os dados da parede frontal (grupos 1, 2 e 3) e da parede traseira (grupo 4, 5 e 6) no mesmo gráfico para verificar se uma delas é mais sensível a variações dimensionais. Os resultados estão inseridos nas Figuras 91 a 96.

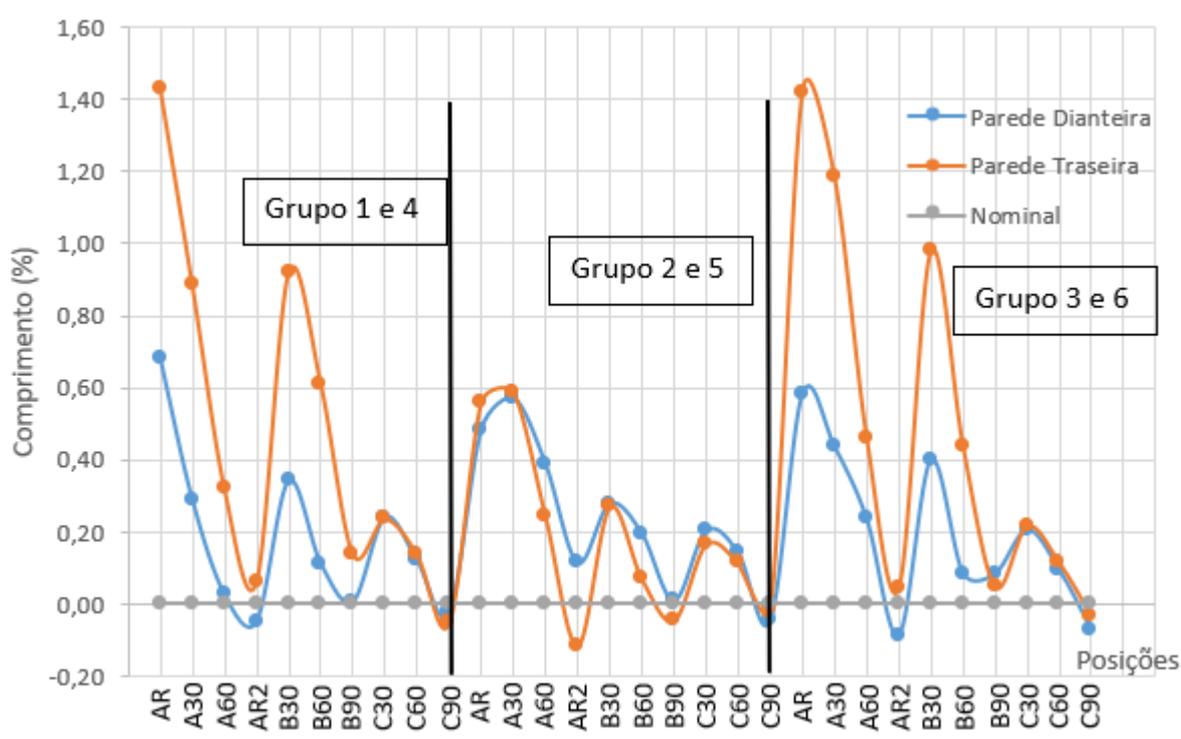
Observando os gráficos de comprimento nas Figuras 91 e 92, verifica-se que para as extremidades (grupo 1 x 4 e grupo 3 x 6) os valores obtidos para comprimento nos corpos de prova da parede traseira se afastam mais do valor nominal do que os grupos da parede frontal. Na porção central da cuba, tanto o grupo a parede frontal (Grupo 2) quanto o grupo da parede traseira (Grupo 5) os valores se mostram mais próximos do valor nominal, inclusive com o grupo da parede traseira (Grupo 5) em melhor condição.

Figura 91 – Comparação de comprimentos obtidos entre as paredes frontal e traseira para cuba de tração



Fonte - Autor

Figura 92 - Comparação de comprimentos obtidos entre as paredes frontal e traseira para cuba de flexão

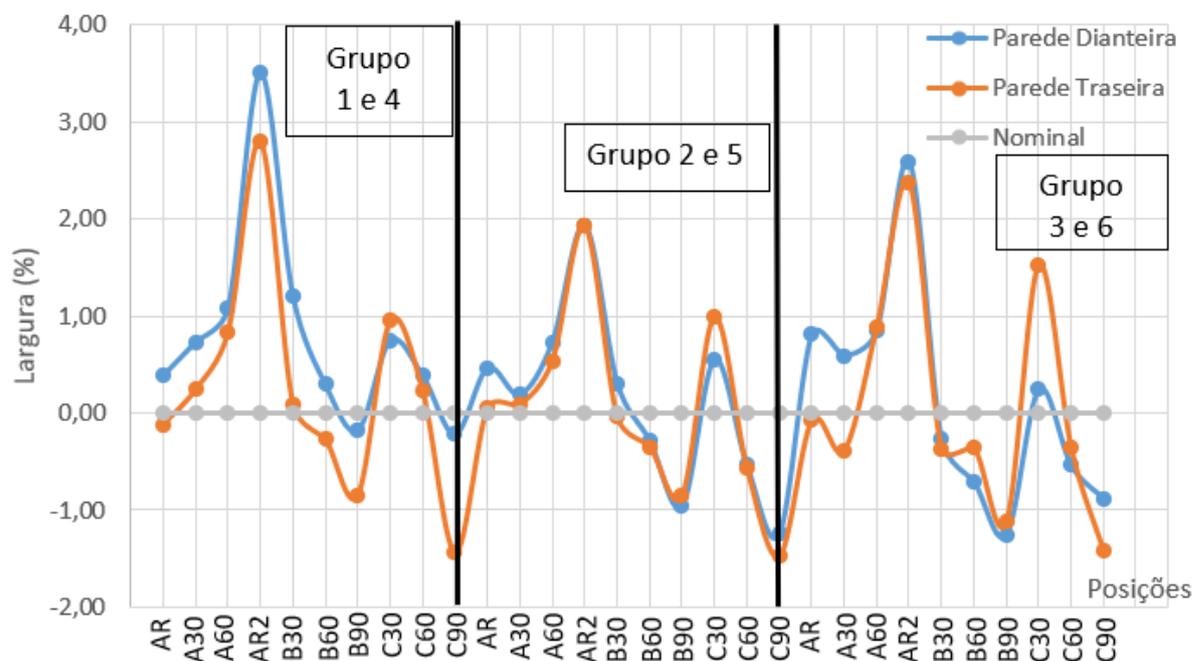


Fonte – Autor

A mesma análise foi realizada para a largura dos corpos de prova de tração e flexão e os resultados são mostrados nas Figuras 93 e 94, respectivamente.

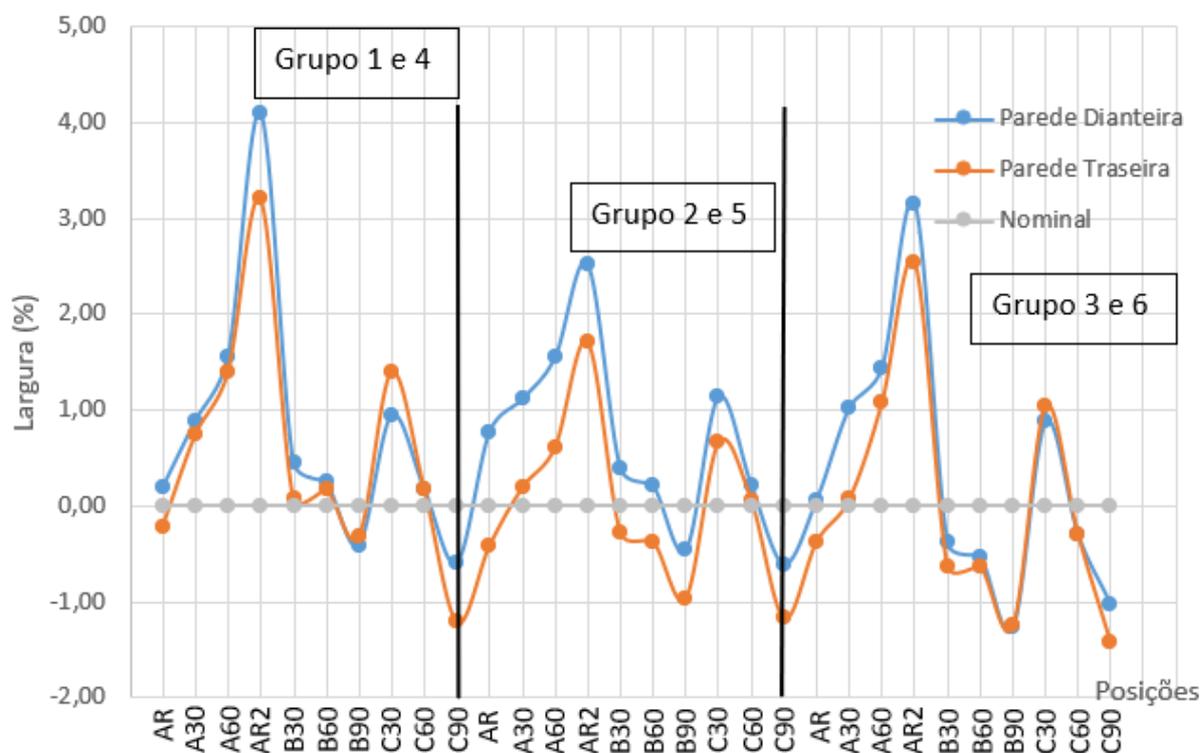
Para a largura verifica-se uma maior proximidade das dimensões dos grupos das extremidades da parede frontal e traseira (Grupo 1 x Grupo 4 e Grupo 3 x Grupo 6) se comparadas com as curvas do comprimento. Inclusive para a largura verifica-se os grupos da parede traseira (Grupo 4 e 6) em condição um pouco melhor do que os grupos da parede frontal (Grupo 1 e 3). Analisando a porção central, assim como no comprimento, verifica-se nesta região os menores desvios em relação ao restante da cuba (tanto na parede frontal quanto na traseira). Comparando-se os dois grupos a porção central, apesar da proximidade das curvas, o grupo da parede traseira (Grupo 5) se mostra com menores desvios se comparado ao grupo da parede frontal (Grupo 2). Dessa forma, verifica-se que, assim como no comprimento, o grupo 5, dentre todos os outros, é o que apresenta os menores desvios dimensionais na largura.

Figura 93 - Comparação de larguras obtidos entre as paredes frontal e traseira para tração



Fonte – Autor

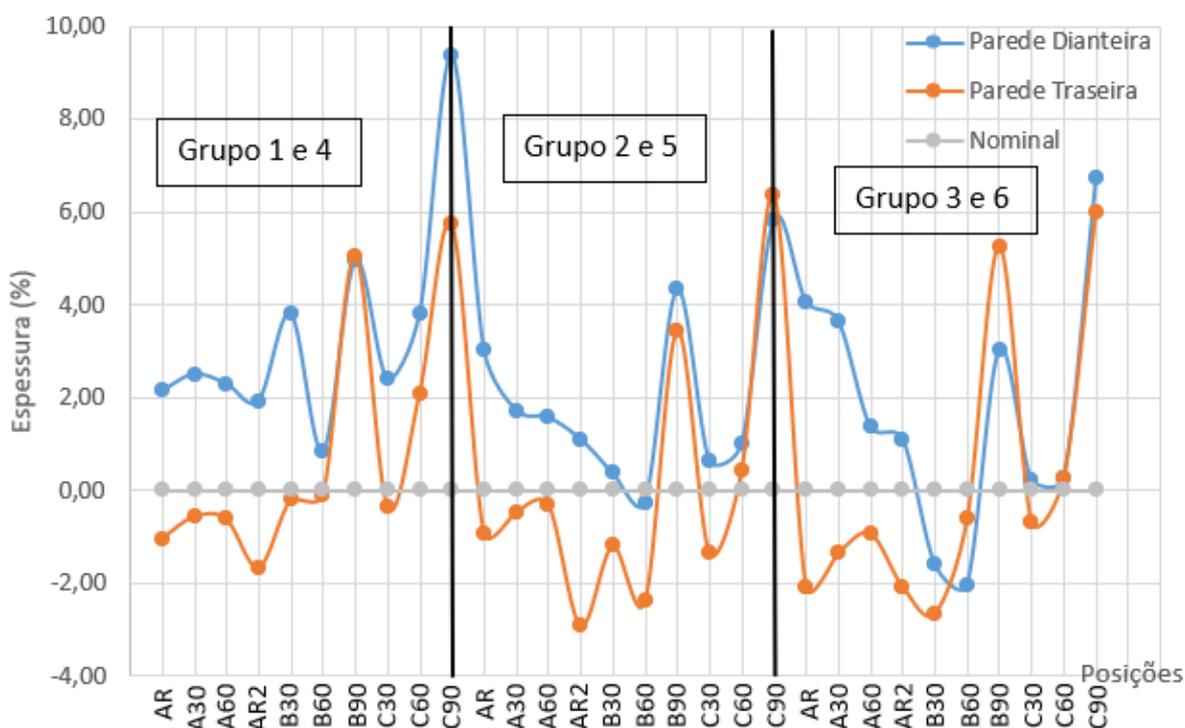
Figura 94 - Comparação de larguras obtidos entre as paredes frontal e traseira para flexão



Fonte - Autor

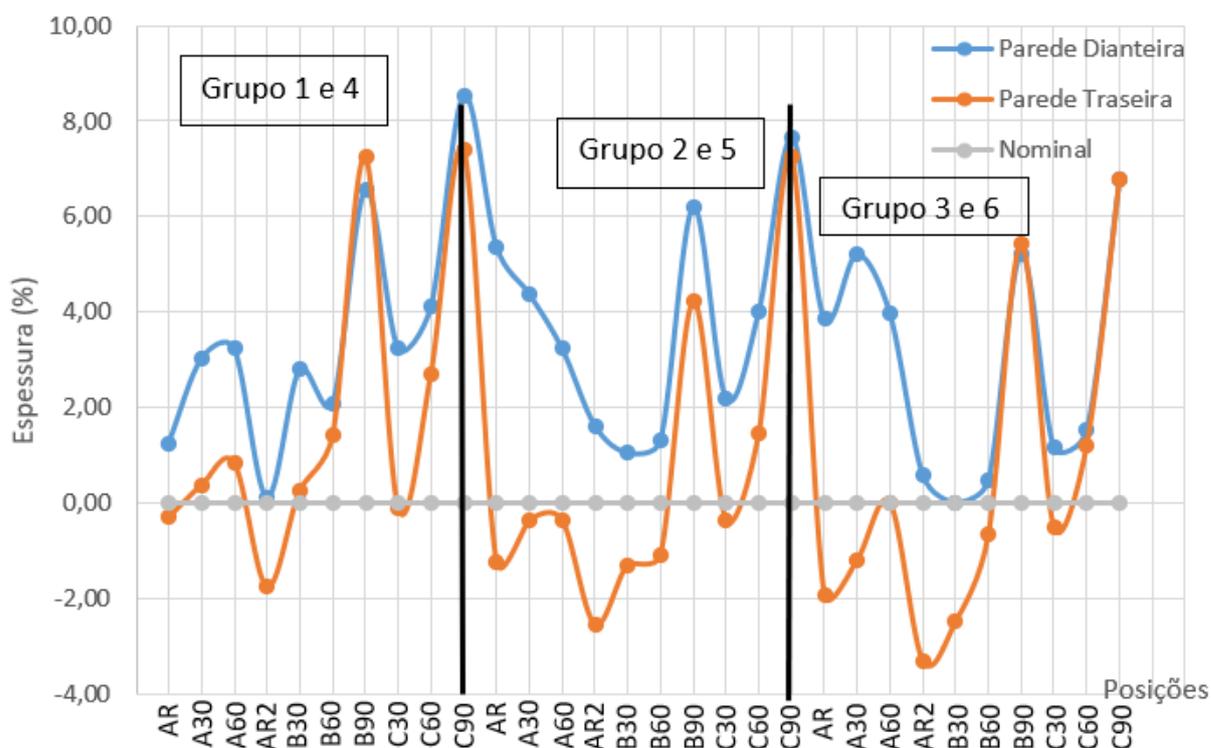
Para a espessura verifica-se nas Figuras 95 e 96, que a parede traseira, de forma geral, se apresenta em melhor condição do que a parede frontal, principalmente na porção central da cuba assim como verificado nas dimensões de comprimento e de largura. Mesmo observando a melhor região (central), para espessura, verifica-se os maiores erros quando se compara às outras grandezas e isso deve ser levado em conta visto que afeta diretamente as áreas das secções transversais e, por consequência, ao esforços que podem ser aplicados.

Figura 95 - Comparação de espessuras obtidos entre as paredes frontal e traseira para tração



Fonte - Autor

Figura 96 - Comparação de espessuras obtidos entre as paredes frontal e traseira para flexão



Fonte – Autor

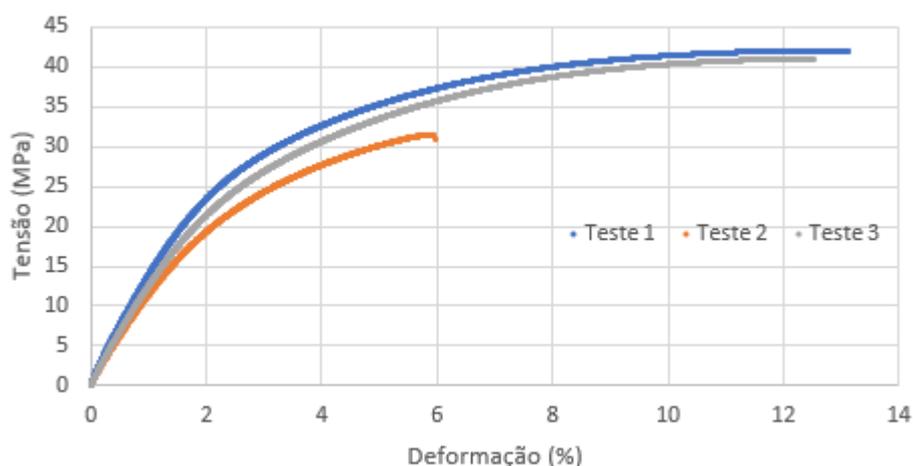
Observando todos os resultados dimensionais obtidos, verifica-se que a grandeza de comprimento é a única que apresenta a parede frontal como melhor localização para impressão. Para a largura e espessura a parede traseira se coloca em melhor condição de resultados dimensionais, sendo que a espessura apresenta desvios consideravelmente maiores.

De forma geral, verifica-se que o grupo 5 é o que apresenta os menores desvios dimensionais em comparação com os outros grupos. Com relação as posições de impressão, verifica-se que quando o plano de deposição se encontra diretamente posicionado sobre uma dimensão (comprimento, largura ou espessura) a mesma se apresenta com altos desvios, ou seja, quando há dimensões perpendiculares ao plano de deposição ou com inclinações cuja uma das componentes esteja perpendicular ao plano de deposição as mesmas apresentam desvios consideráveis. Sendo assim, utilizar posições inclinadas aos planos de deposição é uma boa solução para reduzir os desvios dimensionais.

5.4 ENSAIOS DE TRAÇÃO – TESTE

Após realizar os ensaios testes, foi realizado tratamento dos dados para obtenção das propriedades citadas no procedimento. As curvas dos três ensaios foram plotadas no mesmo gráfico, o qual é apresentado na Figura 97.

Figura 97 - Curvas tensão x deformação dos ensaios testes de tração



Fonte – Autor

Os corpos impressos para teste foram impressos todos na mesma direção (B90) apenas em posição diferentes da cuba (Parede esquerda, centro e parede direita). Dessa forma, observando o gráfico, pode-se verificar que as amostras apresentam anisotropia, e neste caso proveniente do posicionamento do corpo de prova na cuba, visto que foram impressos na mesma angulação. O corpo de prova do teste 2 foi a amostra que apresentou o comportamento mais discrepante entre as amostras, com a menor tensão limite de resistência e o menor alongamento total. As curvas dos testes 1 e 3 estão mais próximas, entretanto apresentam diferenças. Os resultados das propriedades obtidas são apresentados na Tabela 21 e posteriormente discutidos e comparados.

Tabela 21 - Propriedades obtidas em tração para as amostras teste

	E 1% (GPa)	Variação (%)	Tensão Limite de Escoamento (MPa)	Variação (%)	Tensão Limite de Resistência (MPa)	Variação (%)	Alongamento Total (%)	Variação (%)
Teste 1_Ref	1,40	0,00	22,00	0,00	42,09	0,00	13,13	0,00
Teste 2	1,14	-18,57	17,00	-22,73	31,50	-25,16	5,93	-54,84
Teste 3	1,25	-10,71	20,00	-9,09	41,01	-2,57	12,52	-4,65

Fonte - Autor

Para análise dos dados tomou-se o corpo de prova do teste 1 como referência para cálculo das variações. Verifica-se que para todas as propriedades analisadas em tração a maior proximidade está entre as amostras dos testes 1 e 3. A amostra 2 apresentou a maior discrepância.

Para o módulo de elasticidade calculado a 1% de deformação a menor diferença encontrada neste estudo foi de 10,71% e é relativamente alta quando se objetiva verificar se há isotropia entre as amostras produzidas. Na revisão da literatura encontrou-se diversos valores de módulo de elasticidade e com diferenças consideráveis entre os mesmos, o que fortalece a ideia de anisotropia para tal propriedade. O maior valor encontrado foi para a amostra na direção Z nos ensaios da HP, 1900 MPa e o menor foi encontrado por Galati et. al. (2020) de 1370 MPa na amostras XY extraídas do componente industrial. Comparando os valores, verifica-se que a maior diferença encontrada é de 66,67% (entre 1900 MPa da fabricante e 1140 MPa encontrada no teste 2 deste estudo). A menor diferença encontrada seria de 9,6% e ocorre entre os 1370 MPa obtidos em Galati et. al. (2020) e o teste 3 deste estudo. Ainda assim é uma diferença considerável para se considerar isotropia de propriedade.

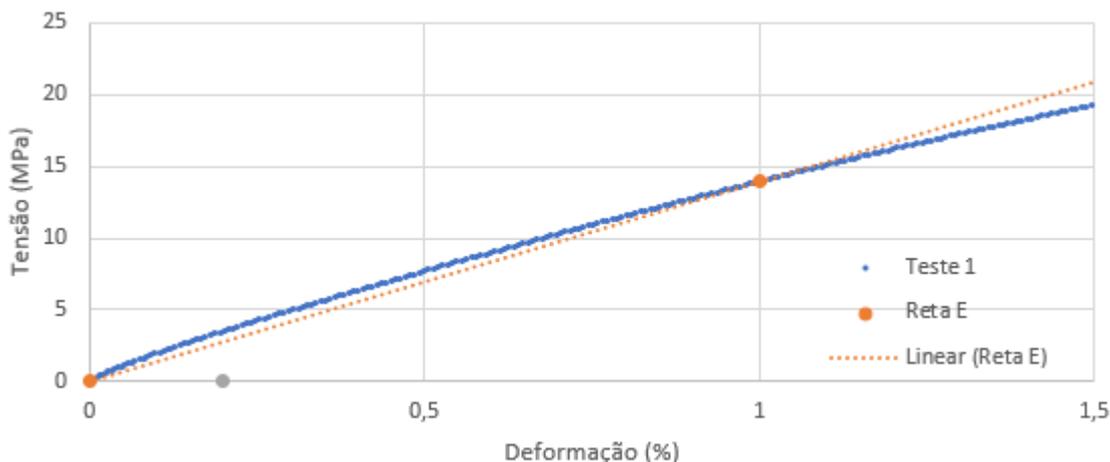
Para a tensão limite de escoamento encontra-se como menor valor de desvio entre os testes 9,09%, o qual também é considerado alto quando se fala em isotropia de propriedades. Comparando esses valores com os disponíveis na literatura verifica-se que, comparando o maior valor obtido (22 MPa neste estudo) e o menor valor (18,5 MPa obtido em Calignano et. al. (2021)), existe uma diferença de 15,9% entre os valores, o que mostra uma anisotropia considerável para tal propriedade. Essa diferença pode ser fruto da diferença entre as normas utilizadas e seus respectivos modos de cálculos. Em Calignano et. al. (2021) e Galati et. al. (2020) utilizou-se a norma ISO 527, enquanto neste estudo utilizou-se a norma ASTM D638. Além disso, há diferenças entre as velocidades impostas aos ensaios.

Para a tensão limite de resistência e alongamento total as menores diferenças ficaram em 2,57% e 4,65%, respectivamente, o que deixa tais propriedades mais próximas da existência de determinado grau de isotropia. Comparando com dados da literatura, a maior tensão limite de resistência obtida foi de 50 MPa no estudo da própria fabricante e a menor foi obtida em Galati et.al (2020) de 32 MPa para as amostras extraídas do componente industrial na direção Z. Calculando uma média de todas os valores obtidos para esta propriedade (42,38 MPa) e comparando com os obtidos neste estudo encontra-se uma diferença de até 34,5% (entre a média e o menor valor deste estudo de 31,5 MPa). Desconsiderando a amostra de grande discrepância a diferença cai para 3,35% (entre a média e 41,01 MPa obtido neste estudo). Para o alongamento o maior valor obtido foi de 30% em Rosso et. al. (2020), entretanto este valor e o de 24% obtido em Galati et. al. (2020) foram bem discrepantes comparados aos outros.

Entretanto, se fez complicado justificar essas diferenças visto que os corpos de prova foram impressos apenas para validar o procedimento do ensaio de tração, e por isso, não foram identificados o que dificulta correlacionar as curvas com as respectivas posições de impressão na cuba. Além disso não foram informadas nas referências as velocidades dos ensaios realizados, o que como se sabe altera as propriedades obtidas nas curvas de tensão-deformação.

Outra observação importante é que, observando a Figura 98 na qual aplicou-se um zoom no início do ensaio, verifica-se que a reta traçada da origem até a deformação de 1%, utilizada para calcular o módulo de elasticidade (e também que deu origem a reta paralela passando pela deformação de 0,2% utilizada para calcular a tensão limite de escoamento) não segue perfeitamente o regime elástico do material, o que mostra a imprecisão de se utilizar o ensaio de tração para obter propriedades do regime elástico para materiais poliméricos. É importante ressaltar que o teste 1 foi utilizado como exemplo, porém essa situação foi observada nos 3 ensaios.

Figura 98 - Falta de aderência entre reta do módulo de elasticidade e curva do ensaio de tração



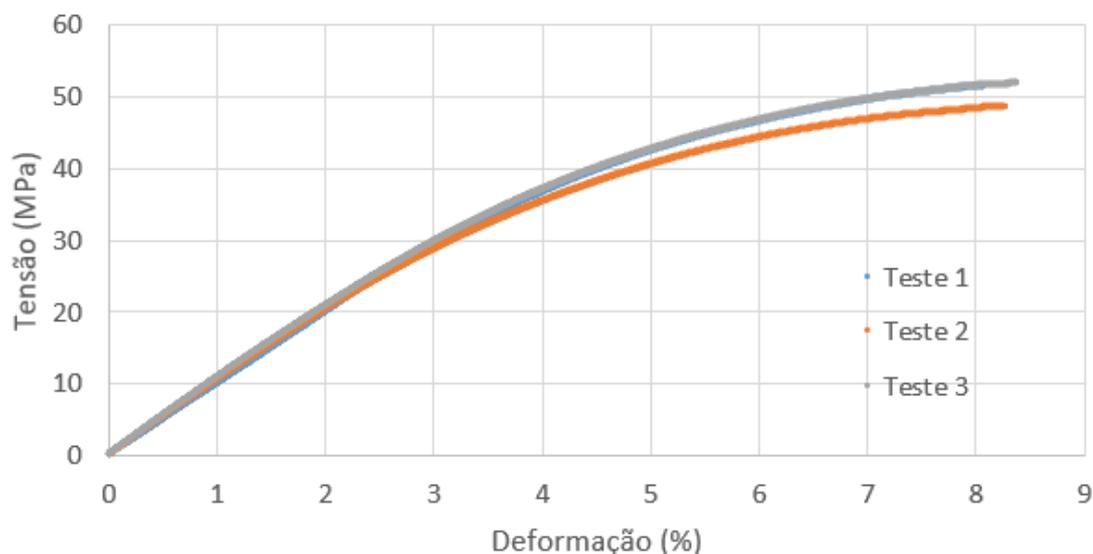
Fonte – Autor

Dessa forma, é possível verificar que apesar de terem sido impressas na mesma direção, as amostras apresentam diferenças consideráveis nas propriedades, ou seja, apresentam um grau de anisotropia que pode ser justificada pela única variável imposta ao processo que foi o posicionamento na cuba de impressão. Essa hipótese será confirmada com os ensaios das amostras reais que estão identificadas para essa finalidade. Além disso, verifica-se que a curva tensão x deformação obtida no ensaio de tração não apresenta grande aderência a reta do módulo de elasticidade a 1% de deformação, o que a torna mais imprecisa para obtenção de tal propriedade, e por consequência, da tensão limite de escoamento.

5.5 ENSAIOS DE FLEXÃO - TESTE

Após realizar os ensaios testes, foi realizado tratamento dos dados para obtenção das propriedades citadas no procedimento. As curvas dos três ensaios foram plotadas no mesmo gráfico o qual é apresentado na Figura 99.

Figura 99 – Curvas tensão x deformação dos ensaios testes de flexão



Fonte – Autor

Os corpos impressos para teste foram impressos todos na mesma direção (B90) apenas em posição diferentes da cuba (Parede esquerda, centro e parede direita). Dessa forma, observando o gráfico, pode-se verificar que as amostras de flexão apresentam uma maior proximidade das curvas se comparadas aos ensaios de tração, principalmente observando os testes 1 e 3, que estão praticamente sobrepostos. A curva do teste 2 se afastou um pouco dos outros, mesmo assim, se comparado aos ensaios de tração, tem seu comportamento mais próximo dos outros 2 ensaios. Os resultados das propriedades obtidas são apresentados na Tabela 22 e posteriormente discutidos.

Tabela 22 - Propriedades obtidas em flexão para as amostras teste

	E 1% (GPa)	Variação (%)	Tensão Limite de Escoamento (MPa)	Variação (%)
Teste 1_Ref	0,98	0,00	35,00	0,00
Teste 2	1,03	5,10	27,00	-22,86
Teste 3	1,07	9,18	29,00	-17,14

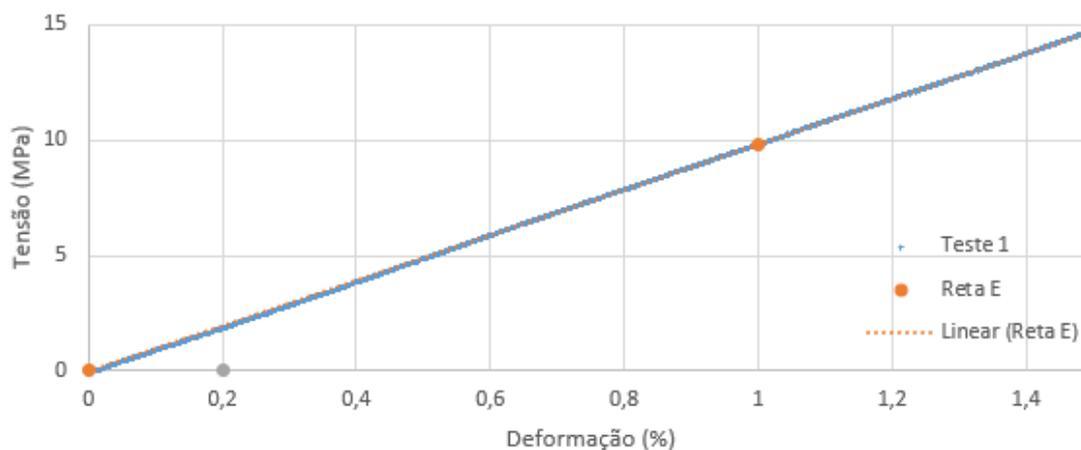
Fonte – Autor

Para os ensaios de flexão verifica-se que a menor diferença para o módulo de elasticidade em flexão é de 5,10%, aproximadamente metade da menor diferença em tração que foi de 10,71%. O mesmo ocorre para a maior diferença (9,18% em flexão e 18,57% em tração).

Para a tensão limite de escoamento a menor diferença é de 17,14%, quase o dobro da obtida em tração (9,09%). Já as maiores diferenças se aproximam entre tração e flexão, 22,73% e 22,86% respectivamente. Como citado na revisão da literatura, apenas um estudo foi encontrado com dados obtidos em flexão. O mesmo já havia apresentado uma anisotropia considerável visto que seus valores variam de 1146 a 1687 MPa. Comparando estes dados com os obtidos neste estudo, encontra-se uma diferença de até 72,14% (entre 1687 MPa e 980 MPa), a qual é extremamente alta quando se quer comparar isotropia de propriedades.

Outra observação importante é que, observando a Figura 100 na qual aplicou-se um zoom no início do ensaio, verifica-se que a reta traçada da origem até a deformação de 1%, utilizada para calcular o módulo de elasticidade (e também que deu origem a reta paralela passando pela deformação de 0,2% utilizada para calcular a tensão limite de escoamento), diferentemente do ensaio de tração, segue perfeitamente o regime elástico do material, o que mostra a melhor precisão de se utilizar o ensaio de flexão para obter propriedades do regime elástico em materiais poliméricos. É importante ressaltar que o teste 1 foi utilizado como exemplo, porém essa situação foi observada nos 3 ensaios.

Figura 100 - Aderência entre reta do módulo de elasticidade e curva do ensaio de flexão



Fonte – Autor

Dessa forma, é possível verificar que apesar de terem sido impressas na mesma direção, as amostras apresentam diferenças consideráveis na tensão limite de escoamento, o que torna

questionável a hipótese de existência de isotropia. Assim como em tração, um dos fatores de influência é a posição de impressão dentro da cuba. Essa hipótese poderá ser confirmada com os ensaios das amostras reais que estão identificadas para essa finalidade. Além disso, verifica-se que a curva tensão x deformação obtida no ensaio de flexão apresenta grande aderência a reta do módulo de elasticidade a 1% de deformação, o que a torna mais precisa para obtenção de tal propriedade, e por consequência, da tensão limite de escoamento.

6 CONCLUSÕES PARCIAIS

O processo MJF, patenteado pela HP, utiliza uma combinação de matéria prima virgem e reutilizada com agentes de impressão responsáveis pela fusão seletiva do material nas regiões onde foram depositados. Por esses insumos é que o processo também é conhecido como multi agentes. Um desses agentes (o de fusão) é responsável por absorver a energia de espectro infravermelho e fundir o material, o que faz com que as maiores temperaturas ocorram na região de onde o agente foi depositado. Apesar disso, a parede frontal, principalmente na região esquerda, apresenta maiores temperaturas do que a parede traseira o que faz com que os CP's de tal região apresentem uma maior quantidade de pó não fundido retido nas superfícies.

Do ponto de vista dimensional verifica-se que a porção central da parede traseira foi a que apresentou menores desvios, ou seja, a posição do grupo 5 se mostra mais estável dimensionalmente. Correlacionando esse fato com a distribuição de temperatura do leito verifica-se que a região é uma das mais frias (comparando com as regiões dos outros grupos). Entretanto o equipamento não permite medir e tão pouco extrair medidas reais de temperatura, o que dificulta uma conclusão mais assertiva apenas com estes dados. Observando-se os resultados verifica-se os maiores erros nas espessuras dos CP's, as quais chegam até a apresentar desvios na casa dos 10%. Dessa forma, deve-se tomar cuidado ao projetar, principalmente quando se trata de posições próximas a AR2, B90 e C90, pois esses desvios podem levar a uma variação da área da secção transversal e, por consequência, das tensões limites que o material pode ser submetido.

Outro ponto importante do aspecto dimensional é que os maiores desvios ocorrem quando há uma grandeza (comprimento, largura ou espessura) diretamente na direção de deposição dos agentes, ou seja, produzir peças com inclinações em todos os eixos é primordial para extrair peças com dimensões próximas do projeto.

Do ponto de vista do comportamento mecânico, o processo MJF apresenta pouca base de dados a respeito de propriedades obtidas em peças impressas em diferentes direções para certificar a declarada capacidade de produzir peças isotrópicas, ou seja, os estudos existentes apresentam dados apenas para posições ortogonais à mesa de impressão, lacuna esta que este estudo visa preencher ao variar as posições a cada 30°. Os CP's ensaiados até o momento tiveram o objetivo de validar o procedimento de tração e flexão desenhados em laboratório, porém já se pode fazer algumas considerações interessantes a respeito dos dados obtidos.

Nos ensaios de tração, para as propriedades do regime elástico, ou seja, para o módulo de elasticidade a 1% de deformação e tensão limite de escoamento com offset de 0,2% de

deformação, observam-se variações aproximadas de até 20% o qual é extremamente alto para se falar em isotropia destas propriedades. Para a tensão limite de resistência e alongamento os desvios são ainda maiores, atingindo até 25% e 54% respectivamente. Dentre as três amostras, uma apresentou grande discrepância em relação as outras, o que pode ser fruto de uma real anisotropia devido ao posicionamento na cuba ou uma variação do processo, o que será confirmado com os ensaios oficiais.

Outro aspecto importante de se ressaltar no ensaio de tração é que o mesmo não é tão preciso para se obter as propriedades do regime elástico, fato que pôde ser observado ao sobrepor a curva do ensaio a uma reta e verificar que não há grande aderência.

Para flexão observou-se, para as propriedades avaliadas (módulo de elasticidade a 1% de deformação e tensão limite de escoamento com offset de 0,2% de deformação), menores variações, porém, ainda assim são altas para se falar em isotropia de propriedades (9% para módulo de elasticidade e 23% para tensão limite de escoamento).

Entretanto, para as propriedades avaliadas (regime elástico), o ensaio de flexão se mostra mais preciso que o ensaio de tração, visto que há grande aderência dos pontos do ensaio até a deformação de 1% com uma reta.

7 PRÓXIMAS ETAPAS

Após apresentação e aprovação da banca no exame de qualificação, será dado prosseguimento aos ensaios de tração e flexão das amostras. O tratamento de dados ocorrerá semanalmente bem como a análise dos mesmos. Após término dos ensaios de tração, as superfícies de fratura serão avaliadas em lupa estereoscópica para correlacionar as propriedades obtidas com o mecanismo de fratura observado.

Análises de difração de raios X e ensaios térmicos serão realizados a fim de verificar a porcentagem de cristalinidade das amostras e correlacionar com as propriedades obtidas e a posição e angulação de impressão.

As atividades citadas seguirão segundo cronograma exposto na Tabela 23.

Tabela 23 – Cronograma de próximas etapas

Atividade	Meses - 2022					
	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Ensaio mecânicos - Flexão						
Ensaio mecânicos - Tração						
Análises de RX						
Análises Térmicas						
Análise dos resultados						
Elaboração do exame de qualificação						
Apresentação do exame de qualificação						
Elaboração da dissertação						

Fonte - Autor

REFERÊNCIAS

Adach, Martyna, Paweł Sokołowski, Tomasz Piwowarczyk, and Krzysztof Nowak. 2021. "Study on Geometry, Dimensional Accuracy and Structure of Parts Produced by Multi Jet Fusion" *Materials* 14, no. 16: 4510. <https://doi.org/10.3390/ma14164510>

ALL3DP. STL File Format: Everything you need to know. 2021. Disponível em: <https://all3dp.com/1/stl-file-format-3d-printing/>. Acesso em: 23/11/2021.

Alomarah, Amer; Ruan, Dong; Masood, Syed; Gao, Zhanyuan (2019). Compressive properties of a novel additively manufactured 3D auxetic structure. *Smart Materials and Structures*, (), -. doi:10.1088/1361-665X/ab0dd6

Altıparmak, S. C., & Xiao, B. (2021). A market assessment of additive manufacturing potential for the aerospace industry. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 728–738. doi:10.1016/j.jmapro.2021.05.072

Anisotropy of 3D printed Polymers, Veryst, [Online], 2017, Disponível: <http://www.veryst.com/project/Anisotropyof3DPrintedPolymers> [Accessed 19 NOVEMBRO 2021]

Bain, E. D. (2019). Polymer Powder Bed Fusion Additive Manufacturing: Recent Developments in Materials, Processes, and Applications. *Polymer-Based Additive Manufacturing: Recent Developments*, 7–36. doi:10.1021/bk-2019-1315.ch002

Bhuvanesh Kumar, M., & Sathiya, P. (2020). Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges. *Thin-Walled Structures*, 107228. doi:10.1016/j.tws.2020.107228

Calignano, F., Giuffrida, F., & Galati, M. (2021). Efeito da orientação de construção sobre o desempenho mecânico de peças poliméricas produzidas por fusão multi jato e sinterização seletiva a laser. *Journal of Manufacturing Processes*, 65, 271-282. doi:10.1016/j.jmapro.2021.03.018

Chatham, C. A., Long, T. E., & Williams, C. B. (2019). A Review of the Process Physics and Material Screening Methods for Polymer Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. *Progress in Polymer Science*. doi:10.1016/j.progpolymsci.2019.03.003

DESIGNING BUILDINGS. 3D printing in construction. 2021. Disponível em: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/3D_printing_in_construction. Acesso em: 05/12/2021

ENGINEERING PRODUCT DESIGN. Additive Manufacturing. Disponível em: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technology-works/>. Acesso em: 17/11/2021

G. Craft, J. Nussbaum, N. Crane, J.P. Harmon, Impact of extended sintering times on mechanical properties in PA-12 parts produced by powderbed fusion processes, *Additive Manufacturing* 22 (2018) 800-806.

Galati, M., Calignano, F., Defanti, S., & Denti, L. (2020). Disclosing the build-up mechanisms of multi jet fusion: Experimental insight into the characteristics of starting materials and finished parts. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 244–253. doi:10.1016/j.jmapro.2020.06.029

Hage Jr., Elias Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros. *Polímeros* [online]. 1998, v. 8, n. 2 [Acessado 25 Outubro 2021] , pp. 6-9. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0104-14281998000200003>>. Epub 03 Set 2010. ISSN 1678-5169. <https://doi.org/10.1590/S0104-14281998000200003>.

Haleem, A., & Javaid, M. (2019). Additive Manufacturing applications in Industry 4.0: A review. *Journal of Industrial Integration and Management*. doi:10.1142/s2424862219300011 Herderick, E.D. *Progress in Additive Manufacturing*. JOM 67, 580–581 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1323-x>

HP. Ficha de informação de segurança de produtos químicos. Disponível em: <http://h22235.www2.hp.com/hpinfo/globalcitizenship/environment/productdata/3dmsdspleng.html> DATA SHEET. Acesso em: 18/12/2021

HP 3D Printing materials for the HP Jet Fusion 4200 3D Printing Solution - Mechanical Properties, whitepaper HP, disponível em <https://www8.hp.com/us/en/printers/3d-printers/products/multi-jet-fusion-4200.html> acessado em 23/11/2021

HP 3D PRINTING SOLUTION. Unlock the full potential of MJF 3D printing technology. 2018. Disponível em: <https://www.hp.com/uk-en/printers/3d-printers/products/multi-jet-technology.html>. Acesso em: 15/12/2021

KAUPILLA - Multi Jet Fusion (MJF) 3D Printing – Simply Explained | All3DP Pro

Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F., & Newkirk, J. (2017). Aerospace applications of laser additive manufacturing. *Laser Additive Manufacturing*, 351–371. doi:10.1016/b978-0-08-100433-3.00013-0

MANUFACTUR3D. Understanding HP's Multi Jet Fusion (MJF) technology. 2018. Disponível em: <https://manufactur3dmag.com/understanding-hps-multi-jet-fusion-mjf-technology/>. Acesso: 17/12/2021.

MANUFACTUR3D. Understanding the difference between Pixel and Voxel. 2018.

Disponível em:

<https://manufactur3dmag.com/understanding-difference-pixel-voxel/>. Acesso: 15/12/2021.

Mele, M., Campana, G., Pisaneschi, G., & Monti, G. L. (2020). Investigation into effects of cooling rate on properties of polyamide 12 parts in the multi jet fusion process. *Rapid Prototyping Journal*, ahead-of-print(ahead-of-print). doi:10.1108/rpj-04-2020-0080

O'Connor, H. J., Dickson, A. N., & Dowling, D. P. (2018). Evaluation of the mechanical performance of polymer parts fabricated using a production scale multi jet fusion printing process. *Additive Manufacturing*, 22, 381–387. doi:10.1016/j.addma.2018.05.035

O' Connor, H. J., & Dowling, D. P. (2019). Comparison between the properties of polyamide 12 and glass bead filled polyamide 12 using the multi jet fusion printing process. *Additive Manufacturing*, 100961. doi:10.1016/j.addma.2019.100961

Pérez, M., Carou, D., Rubio, E. M., & Teti, R. (2020). Current advances in additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 88, 439–444. doi:10.1016/j.procir.2020.05.076

PITÁGORA, H.C.; ARAÚJO, K. de V. e A.. Ciclo de vida de patentes: uma análise do cenário global da manufatura aditiva a partir de 2009 e 2014.

V. Wong, Kaufui & Hernandez, Aldo (2012). A Review of Additive Manufacturing. doi:10.5402/2012/208760

Rosso, S., Meneghello, R., Biasetto, L., Grigolato, L., Concheri, G., & Savio, G. (2020). In-depth comparison of polyamide 12 parts manufactured by Multi Jet Fusion and Selective Laser Sintering. *Additive Manufacturing*, 101713. doi:10.1016/j.addma.2020.101713

Sagbas, B., Gümüş, B. E., Kahraman, Y., & Dowling, D. P. (2021). Impact of print bed build location on the dimensional accuracy and surface quality of parts printed by multi jet fusion. *Journal of Manufacturing Processes*, 70, 290–299. doi:10.1016/j.jmapro.2021.08.036

Scherer, B., Kottenstedde, I.L. & Matysik, FM. 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. *Monatsh Chem* 151, 1203–1215 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00706-020-02646-x>

SKA. Tecnologia Multi Jet Fusion. 2020. Disponível em:
<https://www.ska.com.br/blog/tecnologia-multi-jet-fusion/>. Acesso em: 16/12/2021

Vasquez, G. M., Majewski, C. E., Haworth, B., & Hopkinson, N. (2014). A targeted material selection process for polymers in laser sintering. *Additive Manufacturing*, 1-4, 127–138. doi:10.1016/j.addma.2014.09.003

Wiese, M., Leiden, A., Rogall, C., Thiede, S., & Herrmann, C. (2021). Modeling energy and resource use in additive manufacturing of automotive series parts with multi-jet fusion and selective laser sintering. *Procedia CIRP*, 98, 358–363. doi:10.1016/j.procir.2021.01.117

WISHBOX TECHNOLOGIES. Manufatura aditiva: O que é e como ela funciona. 2015. Disponível em:
<https://www.wishbox.net.br/blog/o-que-e-manufatura-aditiva>. Acesso em: 07/11/2021.

Xu, Zhiyao; Wang, Yue; Wu, Dingdi; Ananth, K. Prem; Bai, Jiaming (2019). The process and performance comparison of polyamide 12 manufactured by multi jet fusion and selective laser sintering. *Journal of Manufacturing Processes*, 47(), 419–426. doi:10.1016/j.jmapro.2019.07.014

3D LAB SOLUÇÕES EM IMPRESSÕES 3D. Primeira impressora 3D do mundo: Conheça a história. 2021. Disponível em:
<https://3dlab.com.br/a-primeira-impressora-3d-do-mundo>. Acesso em: 15/11/2021