

PEDRO MATIOTTI BASSAN

**Análise do comportamento mecânico do ABS de acordo com os aditivos
encontrados em filamentos para impressão 3D**

Pedro Matiotti Bassan

**Análise do comportamento mecânico do ABS de acordo com os aditivos
encontrados em filamentos para impressão 3D**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira
Hein

B317a	Bassan, Pedro Matiotti Análise do comportamento mecânico do ABS de acordo com os aditivos encontrados em filamentos para impressão 3D / Pedro Matiotti Bassan – Guaratinguetá, 2021. 39 f. : il. Bibliografia: f. 35-39 Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. Luis Rogério de Oliveira Hein 1. Materiais compostos. 2. Impressão tridimensional. 3. Aditivos. I. Título. CDU 620.1
-------	--

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

PEDRO MATIOTTI BASSAN

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS



Prof. Dr. JOSÉ VICTOR CÂNDIDO DE SOUZA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
UNESP-FEG



Prof. Anderson Zenken Nakazato
UNESP-FEG

Fevereiro 2021

AGRADECIMENTO

Agradeço,

À minha mãe por todo apoio e ajuda, além do exemplo pessoal e sempre servir como um pilar para meu crescimento pessoal e profissional. E toda minha família que colaborou e serviu de grande incentivo aos meus estudos.

Ao Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein, pelo apoio, dedicação nas orientações e exemplo como docente neste período de aprendizado, mostrando-se sempre disponível a ajudar da melhor maneira possível.

A todos docentes e técnicos da FEG-UNESP, que ofereceram ajuda e dedicaram seu tempo para ministrar aulas teóricas e práticas. Estendo também a todos funcionários desta faculdade, que sempre ofereceram a estrutura necessária para formação de dezenas de alunos todos os anos.

“Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação, conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho.”

Dalai Lama

RESUMO

Com o crescente uso da manufatura aditiva na última década, torna-se importante o estudo das características das peças construídas através desta técnica. A mais popular, por meio da fusão de filamentos poliméricos, já se encontra em uso doméstico fabricando peças que contribuem para o cotidiano. Entretanto, mesmo com essa popularização, a aplicação em indústrias e centros de pesquisa é notável e cada vez maior devido à facilidade e pouca estrutura que é necessária para usar esse método de manufatura aditiva.

Entre os polímeros mais comuns, se encontra o acrilonitrila butadieno estireno (ABS) que oferece boa resistência mecânica e química, além de temperatura de fusão alta em relação à temperatura ambiente, porém baixa se comparada a outros termoplásticos. Com o uso de diferentes aditivos é possível a fabricação de filamentos nas mais variadas cores, ponto onde esse trabalho encontra seu foco com o uso de técnicas como ensaios de tração, análise térmica, difratometria de raios-x e microscopia eletrônica e óptica. Esse trabalho estuda em 17 filamentos a influência desses aditivos no comportamento mecânico dessas peças criadas por impressoras 3D.

PALAVRAS-CHAVE: Impressão 3D. Manufatura aditiva. Polímeros. ABS. Fabricação por filamento fundido.

ABSTRACT

With the increasing use of additive manufacturing in the last decade, it is important to study the characteristics of the parts built by this technique. The most popular, fused filament fabrication is already in domestic use manufacturing parts that contribute to daily life, however, even with this popularization the application in industries and research centers is notable and growing due to the ease and little structure that is required to use this method of manufacturing polymeric parts.

Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) is one of the most popular polymers, it offers good mechanical and chemical resistance. In addition, it has a high melting temperature but low when compared to other thermoplastics. With the use of different additives, it is possible to produce filaments in the most varied colors, the point where this work finds its focus with the use of techniques such as tensile tests, thermal analysis, x-ray diffractometry and electron and optical microscopy. This work studies in 17 filaments the influence of these additives on the mechanical behavior of these specimens manufactured by 3D printers.

KEYWORDS: 3D printing. Additive manufacturing. Polymers. ABS. Fused filament fabrication.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - CDP Tipo V da norma ASTM D638-14.....	15
Figura 2 - Posição de construção do CDP na mesa de impressão	18
Figura 3 - Análise por EDS	19
Figura 4 - Ensaio de Tração.....	21
Figura 5 - Média e desvio padrão da $F_{m\acute{a}x}$ suportada pelos CDPs em cada cor.....	22
Figura 6 - Média da $F_{m\acute{a}x}$ em cada cor por ângulo de impressão.....	23
Figura 7 - Média da $F_{m\acute{a}x}$ suportada pelos CDPs em cada ângulo de impressão	24
Figura 8 – CDPs fraturados no ensaio de tração.	25
Figura 9 – Fratura de CDP cor Vermelho 1.....	29
Figura 10 – Gráfico: Variação da Dimensão X Temperatura.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Marcas e cores dos filamentos.....	17
Tabela 2 – Parâmetros de impressão.	18
Tabela 3 – Parâmetros da TMA.....	20
Tabela 4 – Resultados em destaque.....	22
Tabela 5 – Elementos químicos encontrados na EDS.	31
Tabela 6 – Quantidade de elementos químicos encontrados na EDS.	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

CAD – *Computer-aided design*

CDP – Corpo de Prova

CDPs – Corpos de Prova

DRX – Difractometria de Raios - X

DSC – Calorimetria Exploratória Diferencial

EDS – Espectroscopia por Energia Dispersiva

FFF – Fabricação por Filamento Fundido

F_{máx} – Força máxima suportada pelo CDP

MA – Manufatura Aditiva

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

TMA – Análise Termomecânica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	11
1.2	OBJETIVO.....	12
2	REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1	MANUFATURA ADITIVA.....	13
2.2	FABRICAÇÃO POR FILAMENTO FUNDIDO	14
2.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS	14
3	MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1	IMPRESSÃO	17
3.2	ENSAIOS DE TRAÇÃO	18
3.3	MICROSCOPIA	19
3.4	ANÁLISE TERMOMECÂNICA (TMA).....	19
3.5	DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X (DRX)	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1	ENSAIOS DE TRAÇÃO	21
4.2	MICROSCOPIA	24
4.2.1	Microscopia Óptica	24
4.2.2	Microscopia Eletrônica.....	28
4.3	ANÁLISE TERMOMECÂNICA (TMA).....	32
5	CONCLUSÕES	34
	REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A rápida disseminação da manufatura aditiva em ambientes fabris, educacionais e até domésticos dá-se pela eficiência em transformar a matéria-prima diretamente em peças complexas, produzindo pouco ou nenhum resíduo (HUANG, S. H.; LIU, P.; MOKASDAR, A.; HOU, L..). Além disso deve-se considerar o fato de, em suas variadas técnicas, produzir peças desde dimensões na casa de milímetros até metros (AMZA, C. G.; NIŢOI, D. F..), topologias precisas e peças em 3 dimensões a partir de dados em CAD (ALLEN, R. J. A.; TRASK, R. S..). Para este trabalho foi escolhida a técnica de Fabricação por Filamento Fundido (FFF).

A FFF foi apresentada pela primeira vez em 1991, mas a primeira impressora 3D que usava filamento de acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) foi lançada em 2000. Essas impressoras 3D, que eram conhecidas como “máquinas de nova geração” indicam o início da revolução da impressão 3D. No final de 2001 houve o embarque comercial da primeira impressora FFF capaz de produzir peças em ABS (WOHLERS, T.; GORNET, T..). Esta técnica ganhou maior popularidade por consequência do ótimo custo benefício que apresenta (GONZALEZ-GUTIERREZ, J.; GODEC, D.; GURAN, R.; SPOERK, M.; KUKLA, C.; HOLZER, C..).

O ABS é um copolímero composto pela combinação de acrilonitrila, butadieno e estireno, nos últimos anos ganhou popularidade no uso da técnica FFF. Proporciona excelente rugosidade, boa estabilidade dimensional, boa processabilidade e resistência, além de estabilidade química. Todas essas vantagens aliadas ao bom preço fizeram do ABS o termoplástico de engenharia mais vendido. Este polímero é um material rígido, leve, fácil de moldar, mas ainda assim resistente, oferecendo um bom equilíbrio entre resistência à tração, ao impacto e à abrasão. Normalmente uma peça de ABS pode ser curvada além do seu limite de elasticidade sem que chegue a se romper, embora enfraqueça por fadiga (KULICH, D. M.; GAGGAR, S. K.; LOWRY, V.; STEPIEN, R..).

Com a crescente popularidade desse material, é possível encontrar os filamentos nas mais variadas cores, porém, essa variedade de cores é oferecida pela inserção de aditivos no material. Ponto onde esse trabalho encontra seu foco, com o estudo da influência exercida por esses aditivos sobre as propriedades do material.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo investigar empiricamente a influência dos aditivos, que alteram a cor do filamento, sobre as propriedades mecânicas e térmicas, através dos seguintes testes:

- Ensaio de tração, através da norma D638-14 (ASTM.);
- Microscopia óptica e eletrônica;
- Análise térmica;
- Difractometria de Raios-X;

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MANUFATURA ADITIVA

Manufatura Aditiva (MA) é também popular através de termos tais como Impressão 3D, Fabricação Digital Direta, Fabricação de Forma Livre, Prototipagem Rápida, Fabricação aditiva e Fabricação de Camada Aditiva (WONG, K. V.; HERNANDEZ, A.. WILLIAMS, L. D.; WILLIAMS, L.. VITALE, M.; COTTELEER, M.; HOLDOWSKY, J..)

Em seu início a MA foi definida como um processo de união de materiais, uma camada por vez, formando uma peça tridimensional a partir de um modelo de dados (ASTM.). Ao contrário da usinagem, que começa a partir de um bloco e o material vai sendo retirado, na MA constrói-se a peça, camada por camada, usando material fundido, líquido ou pó (CAMPBELL, T.; WILLIAMS, C.; IVANOVA, O.; GARRETT, B..). Para polímeros, o método mais utilizado é através de filamentos (TRANCHARD, S. R., V..). Outro ponto no qual a MA se destaca quando comparado à usinagem é na produção de resíduos, que é significativamente menor (WILLIAMS, L. D.; WILLIAMS, L..).

Atualmente existem diversos processos diferentes quando se trata de MA, classificados em sete categorias: Extrusão de Material, Fotopolimerização VAT, Fusão de Pós, Jato de Aglutinante, Laminação de Folha, Jato de Material e Deposição de Energia Direcionada (GAO, W.; ZHANG, Y.; RAMANUJAN, D.; RAMANI, K.; CHEN, Y.; WILLIAMS, C. B.; WANG, C. C. L.; SHIN, Y. C.; ZHANG, S.; ZAVATTIERI, P. D.. KAZMER, D.. LEE, J.-Y.; AN, J.; CHUA, C. K..).

Em geral, o processo começa com o desenho de um modelo tridimensional em um *software* CAD (*Computer-aided design*) e este modelo é salvo em um arquivo no formato “.stl” (GRIMM, T..). Este arquivo é então aberto por um *software* que faz o recorte de cada camada que será impressa, de forma individual, e então envia para o dispositivo que fará a manufatura do material, popularmente conhecido como Impressora 3D. O dispositivo recebe os dados em forma de várias camadas bidimensionais as aplica uma sobre a outra, chegando então ao produto final: uma peça em três dimensões. Em alguns processos pode precisar de um acabamento, que pode ser pintura, cura, recozimento, polimento, entre outros (DE LEON, A. C.; CHEN, Q.; PALAGANAS, N. B.; PALAGANAS, J. O.; MANAPAT, J.; ADVINCULA, R. C.. VITALE, M.; COTTELEER, M.; HOLDOWSKY, J..).

2.2 FABRICAÇÃO POR FILAMENTO FUNDIDO

Quando esse processo foi inventado recebeu o nome de *Fused Deposition Modeling* (FDM), porém foi patenteado em 1989 por Scott Crump, co-fundador da Stratasys (CRUMP, S. S.). Por conta da grande popularização deste processo de MA e a rápida criação de outras fabricantes de Impressoras 3D deste tipo, fez-se a necessidade da criação de outro nome, de modo que estas novas companhias não precisassem arcar com custos da patente, começou então a ser utilizado o nome *Fused Filament Fabrication*, em português, Fabricação por Filamento Fundido (FFF) (WOHLERS, T.; GORNET, T..).

Impressoras 3D que utilizam o método FFF são as mais disseminadas e acessíveis não só em ambientes fabris, como também acadêmicos e domésticos. Estas usam filamentos poliméricos para construção de peças, onde os mais comuns são ABS, PLA (Ácido Polilático) e PC (Policarbonato) (DIZON, J. R. C.; ESPERA, A. H.; CHEN, Q.; ADVINCULA, R. C..). Entre os processos de MA baseada em extrusão, a FFF é uma técnica de fusão onde a impressora 3D é alimentada com um carretel de filamento que pode ter diferentes diâmetros (mais comuns são 1,75 mm e 3 mm). Estes filamentos são extrudados através de um bico aquecido. O material é fundido e depositado em uma plataforma onde é criada a primeira camada, posteriormente são depositadas as outras camadas uma sobre as outras, resultando em um objeto tridimensional (VAEZI, M.; SEITZ, H.; YANG, S..).

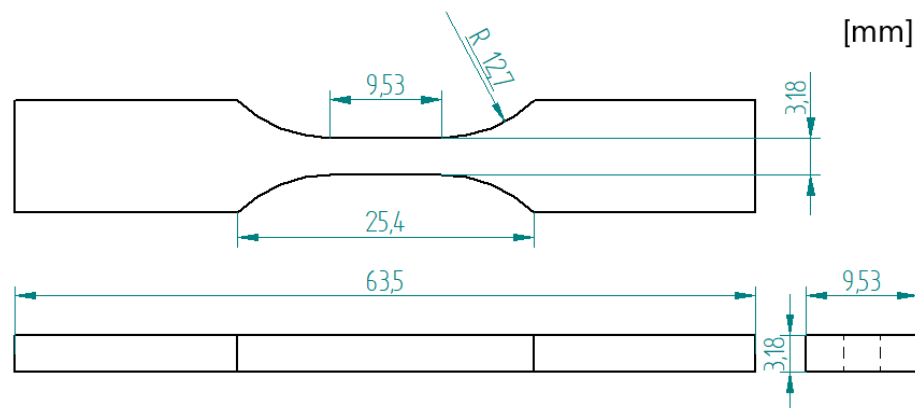
Devido ao seu mecanismo, o processo de FFF apresenta algumas limitações. O material é exposto à tensão, compressão e fusão, processos que são diretamente ligados à sua estabilidade mecânica e térmica, portanto, a fim de manter a qualidade de impressão, o filamento deve ser de alta qualidade. Imprimir objetos tridimensionais mais complexos iram necessitar de estruturas de suporte, que pode levar ao desperdício de material (DE LEON, A. C.; CHEN, Q.; PALAGANAS, N. B.; PALAGANAS, J. O.; MANAPAT, J.; ADVINCULA, R. C..). Em contrapartida, a técnica FFF é conhecida por ser capaz de altas velocidades de impressão, se comparadas à outras técnicas de MA, e por apresentar uma ótima relação custo-benefício (SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S..).

2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Dentre os trabalhos consultados, foi possível observar uma grande inclinação dos gupos de pesquisa ao uso da norma ASTM D638-14 (ASTM.) para ensaios de tração (AHN, S. H.; MONTERO, M.; ODELL, D.; ROUNDY, S.; WRIGHT PAUL, K.. LETCHER, T.;

WAYTASHEK, M.; WITTBRODT, B.; PEARCE, J. M.; MELENKA, G. W.; CHEUNG, B. K. O.; SCHOFIELD, J. S.; DAWSON, M. R.; CAREY, J. P.; CANTRELL, J. T.; ROHDE, S.; DAMIANI, D.; GURNANI, R.; DISANDRO, L.; ANTON, J.; YOUNG, A.; JEREZ, A.; STEINBACH, D.; KROESE, C.; BARDIYA, S.; JERALD, J.; SATHEESHKUMAR, V.; NOMANI, J.; WILSON, D.; PAULINO, M.; MOHAMMED, M. I.). Porém, alguns estudos utilizaram a norma ASTM D3039 (ASTM.), já que tiveram problemas durante a impressão devido à geometria do Corpo de Prova (CDP) e com falhas prematuras durante os ensaios (AHN, S. H.; MONTERO, M.; ODELL, D.; ROUNDY, S.; WRIGHT PAUL, K.; RANKOUHI, B.; JAVADPOUR, S.; DELFANIAN, F.; LETCHER, T.). Em outro trabalho foi utilizada uma terceira norma: ISO 527-2 (WENDT, C.; BATISTA, M.; MORENO, E.; VALERGA, A. P.; FERNÁNDEZ-VIDAL, S. R.; DROSTE, O.; MARCOS, M.).

Figura 1 - CDP Tipo V da norma ASTM D638-14



Fonte: Próprio autor

Em geral, os trabalhos consultados concentram sua discussão na relação de indicadores como força máxima, tensão máxima, escoamento, elasticidade e alongamento na falha e em como os CDPs são afetados por esses indicadores a partir da variação de seus parâmetros de impressão ou tipo de material. A maioria dessas literaturas apontou que as propriedades mecânicas variam com os parâmetros de impressão (AHN, S. H.; MONTERO, M.; ODELL, D.; ROUNDY, S.; WRIGHT PAUL, K.; LEE, B. H.; ABDULLAH, J.; KHAN, Z. A.; LEE, C. S.; KIM, S. G.; KIM, H. J.; AHN, S. H.; SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S.; SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S.; ZIEMIAN, C.; SHARMA, M.; ZIEMIAN, S.; DURGUN, I.; ERTAN, R.; LETCHER, T.; WAYTASHEK, M.; LETCHER, T.; RANKOUHI, B.; JAVADPOUR, S.; WITTBRODT, B.; PEARCE, J. M.; BARDIYA, S.; JERALD, J.; SATHEESHKUMAR, V.; NOMANI, J.; WILSON, D.; PAULINO, M.;

MOHAMMED, M. I. VĂLEAN, C.; MARŞAVINA, L.; MĂRGHITAŞ, M.; LINUL, E.; RAZAVI, J.; BERTO, F.).

Os estudos que apresentaram melhores resultados foram os CDPs fabricados com as linhas orientadas longitudinalmente, ou seja, paralelas à direção da força aplicada. Como esperado, nos CDPs com linhas impressas perpendiculares à direção da força, foram observadas as piores propriedades, devida à fraca ligação entre as linhas impressas (AHN, S. H.; MONTERO, M.; ODELL, D.; ROUNDY, S.; WRIGHT PAUL, K.. LETCHER, T.; WAYTASHEK, M.. LETCHER, T.; RANKOUHI, B.; JAVADPOUR, S.. TÜRK, D.-A.; BRENNI, F.; ZOGG, M.; MEBOLDT, M.).

O tipo de impressão mais comum para o processo FFF é em grade, ou seja, após uma camada ser impressa a próxima será perpendicular à essa e assim sucessivamente. As condições mais comuns são -45° , 45° e 0° , 90° . Na literatura é possível encontrar estudos que comparam esses CDPs que mostram resultados diferentes e até opostos. Letcher e Waytashek usaram PLA para impressão de CDPs, os fabricados em 45° apresentaram maior resistência do que os CDPs em 0° e 90° . Nos ensaios realizados por Valean, também com PLA, os CDPs em 45° apresentaram resistência menor que os CDPs em 0° e 90° , que apresentaram resultados muito próximos. Entretanto, para CDPs construídos em ABS, os melhores resultados foram observados para 0° , quando comparados com amostras em 45° e 90° (ZIEMIAN, C.; SHARMA, M.; ZIEMIAN, S.. LETCHER, T.; RANKOUHI, B.; JAVADPOUR, S.. ZIEMIAN, C. W.; ZIEMIAN, R. D.; HAILE, K. V..). Rankouhi demonstrou estatisticamente que a orientação de impressão ou grade afeta amplamente os resultados obtidos em ensaios de tração.

Quando se trata de ensaios realizados com CDPs construídos pelo método FFF, é possível encontrar estudos com diversos tipos de orientações. Esses CDPs apresentam menor resistência mecânica quando é carregado na direção perpendicular em relação às camadas (CANTRELL, J. T.; ROHDE, S.; DAMIANI, D.; GURNANI, R.; DISANDRO, L.; ANTON, J.; YOUNG, A.; JEREZ, A.; STEINBACH, D.; KROESE, C.. SONG, Y.; LI, Y.; SONG, W.; YEE, K.; LEE, K. Y.; TAGARIELLI, V. L..). De acordo com Dizon a orientação de construção da amostra pode representar de 10% a 73% da resistência de amostras de um mesmo material produzidas por injeção.

Outro parâmetro que é estudado na literatura é a altura da camada. Rankouhi comparou camadas de 0,4 mm e 0,2 mm, enquanto Nomani usou 4 variações: 0,2 mm, 0,4 mm, 0,6 mm e 0,8 mm, ambos estudos foram com ABS e concluíram que a camada na altura de 0,2 mm apresentou melhor resultado em ensaios mecânicos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 IMPRESSÃO

Todos os CDPs foram manufaturados com a impressora 3D PP3DP UP! Mini. Essa impressora possui uma dinâmica de impressão onde o cabeçote se movimenta no eixo X e a plataforma faz o movimento nos eixos Y e Z. Foram utilizados 17 filamentos de cores diferentes e fabricados por 3 diferentes marcas, distribuídos conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 – Marcas e cores dos filamentos.

Marca 1	Marca 2	Marca 3
Amarelo 1	Azul 1	Branco 2
	Vermelho 1	Azul 2
	Verde 1	Amarelo 2
	Branco 1	Vermelho 2
		Verde 2
		Preto
		Cinza
		Laranja
		Cristal
		Roxo
		Marrom
		Cru

Fonte: Próprio autor.

Todos os CDPs mencionados ao longo desse trabalho foram fabricados utilizando os parâmetros detalhados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de impressão.

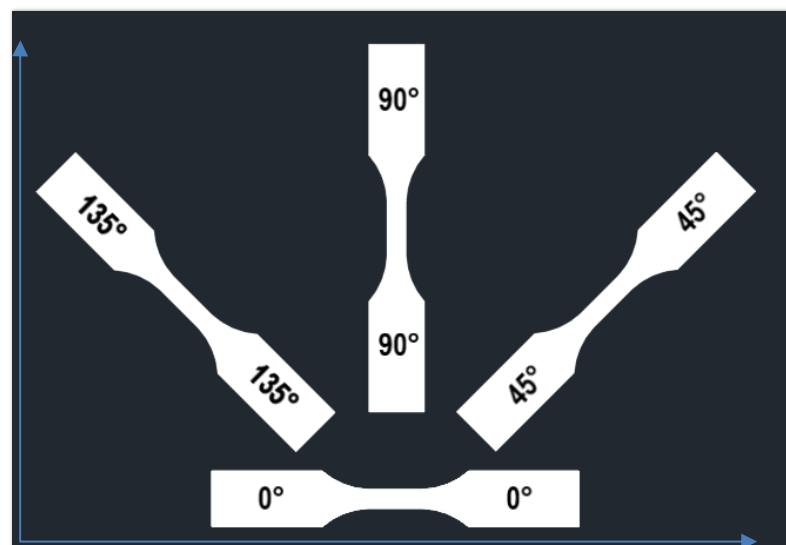
Parametros	Valor
Diâmetro do filamento	1.75 mm
Diâmetro do extrusor	0.40 mm
Altura da camada	0.20 mm
Preenchimento	100%
Temperatura do extrusor	210°C
Temperatura da plataforma	90°C
Tempo de pré aquecimento	15 min
Linha de contorno	1

Fonte: Próprio autor.

3.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram realizados na máquina Shimadzu AG-X, com uma célula de carga de 5kN. Os CDPs fabricados conforme o CDP tipo V (Figura 1) da norma D638-14 (ASTM.). Foram testados 18 CDPs de cada cor, divididos a partir do seu ângulo de impressão: 5 a 0°, 4 a 45°, 5 a 90° e 4 a 135°. Esses ângulos foram determinados a partir da plataforma de impressão, conforme Figura 2.

Figura 2 - Posição de construção do CDP na mesa de impressão

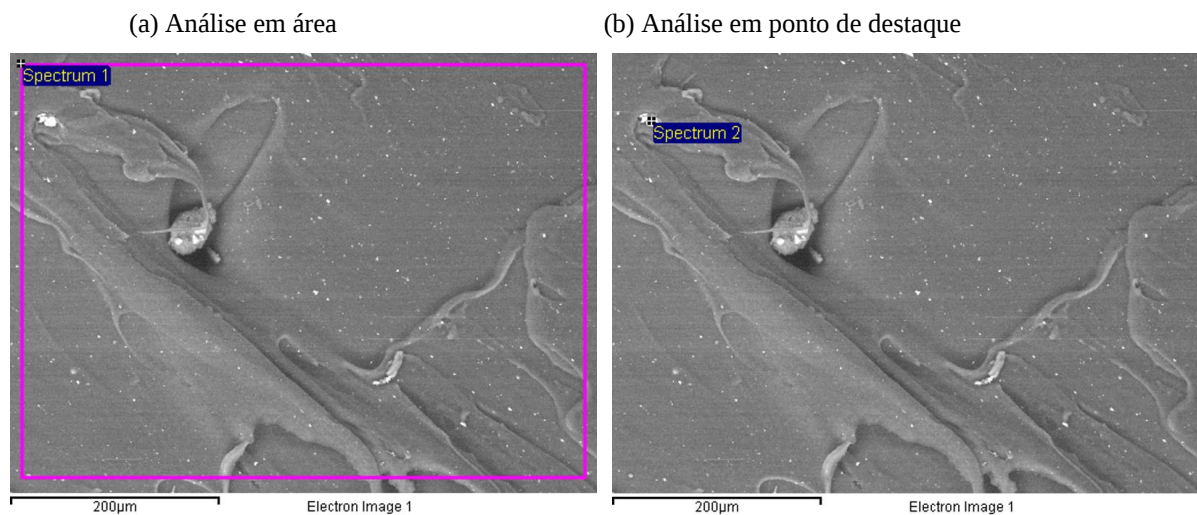


Fonte: Próprio autor

3.3 MICROSCOPIA

Após os ensaios de tração, as fraturas foram analisadas por microscopia óptica com o microscópio Zeiss Stemi 2000, dessa forma foi possível comparar os tipos de fratura em cada cor e analisar o preenchimento de cada camada. Além disso foram feitas também análises em MEV e EDS, com o microscópio Zeiss EVO LS15 em modo de baixo vácuo, para uma apuração mais precisa da composição química do material. Essa análise por EDS foi feita inicialmente por uma leitura em área seguida por uma leitura em pontos de destaque.

Figura 3 - Análise por EDS



Fonte: Próprio autor (LAImat FEG – UNESP).

3.4 ANÁLISE TERMOMECAÂNICA (TMA)

Neste trabalho foram realizados ensaios de análise termomecânica (TMA) com o equipamento SS6100 da SII EXSTAR6000. Onde foi possível observar as variações dimensionais e deformações de acordo com o aumento de temperatura. Para todos os ensaios foram utilizados os parâmetros detalhados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros da TMA.

Parâmetros	Valor
Temperatura Inicial	25 °C
Temperatura Final	130 °C
Velocidade de aquecimento	3 °C/min

Fonte: Próprio autor.

3.5 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X (DRX)

Por fim, foram realizadas algumas análises de DRX no equipamento Bruker D8 Advance Eco, porém não foi possível observar divergências significativas entre cada cor testada, já que a quantidade de aditivos no filamento não é grande o suficiente para apresentar alterações nos difratogramas. Por este motivo os dados obtidos através deste ensaio foram descartados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO

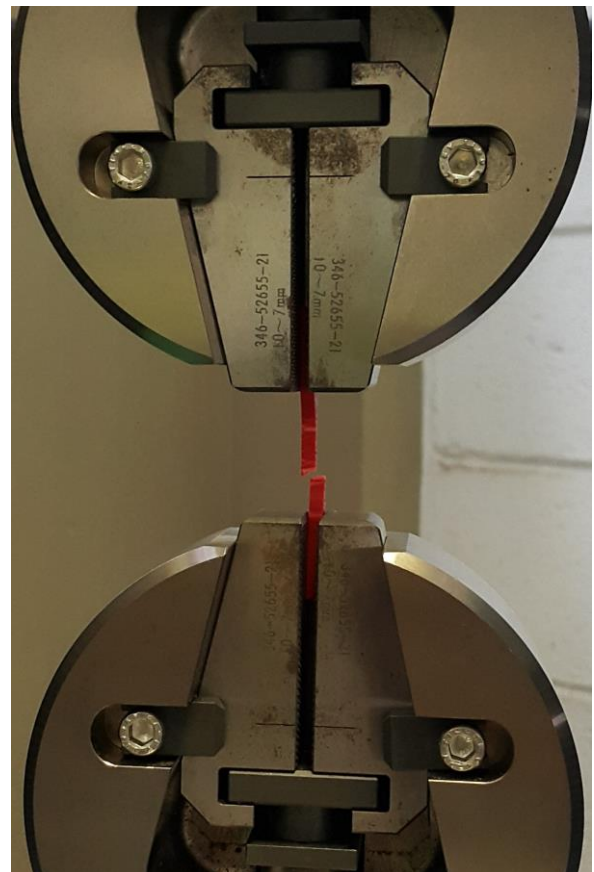
Após uma análise dos resultados obtidos foi feita a escolha de usar como padrão de comparação os valores médios de força máxima ($F_{\text{máx}}$) suportada, já que os CDPs não são maciços e o cálculo de tensão não apresentaria a precisão desejada.

Figura 4 - Ensaio de Tração

(a) Antes da fratura



(b) Depois da fratura



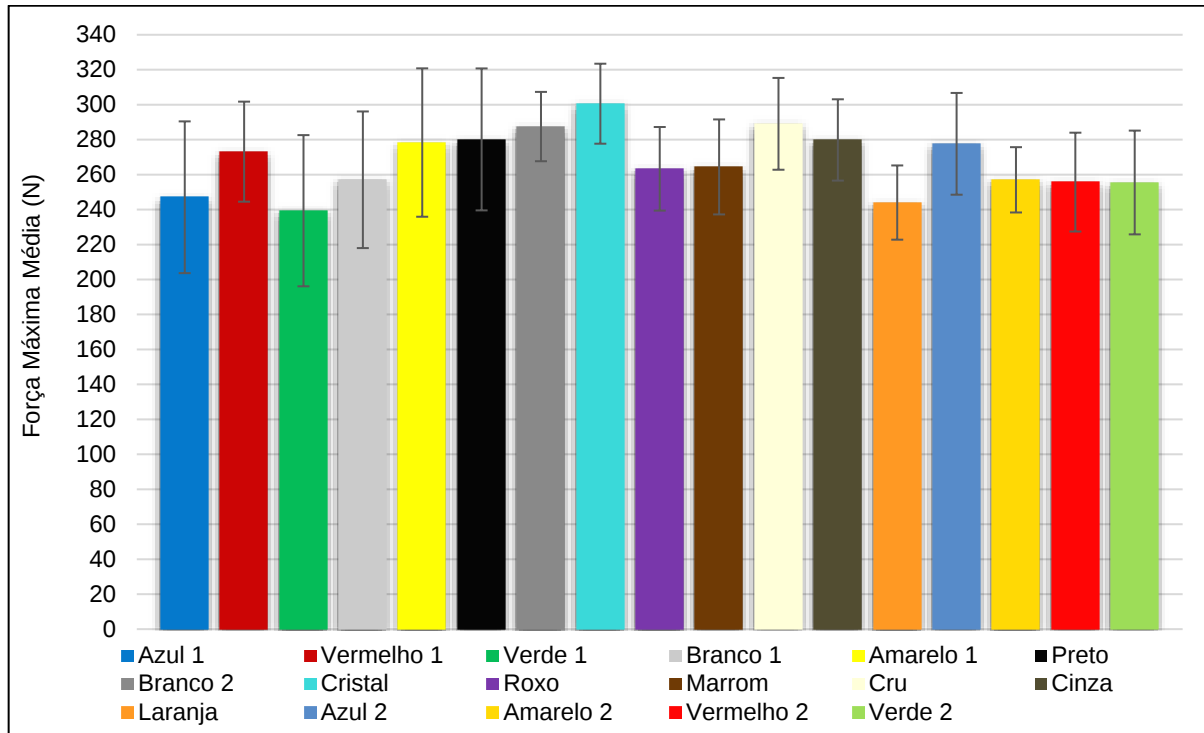
Fonte: Próprio autor

Inicialmente foi calculada a média e o desvio padrão com os dados obtidos nos ensaios dos 18 CDPs de cada cor. Estes resultados podem ser encontrados no gráfico da Figura 5.

A partir deste gráfico pode-se destacar alguns resultados de maior importância (Tabela 4). É possível observar que a cor cristal, apesar de apresentar a maior força, não apresenta a

melhor constância nos resultados, para este objetivo o correto seria utilizar o Amarelo 2, que apresentou menor desvio padrão.

Figura 5 - Média e desvio padrão da F_{máx} suportada pelos CDPs em cada cor



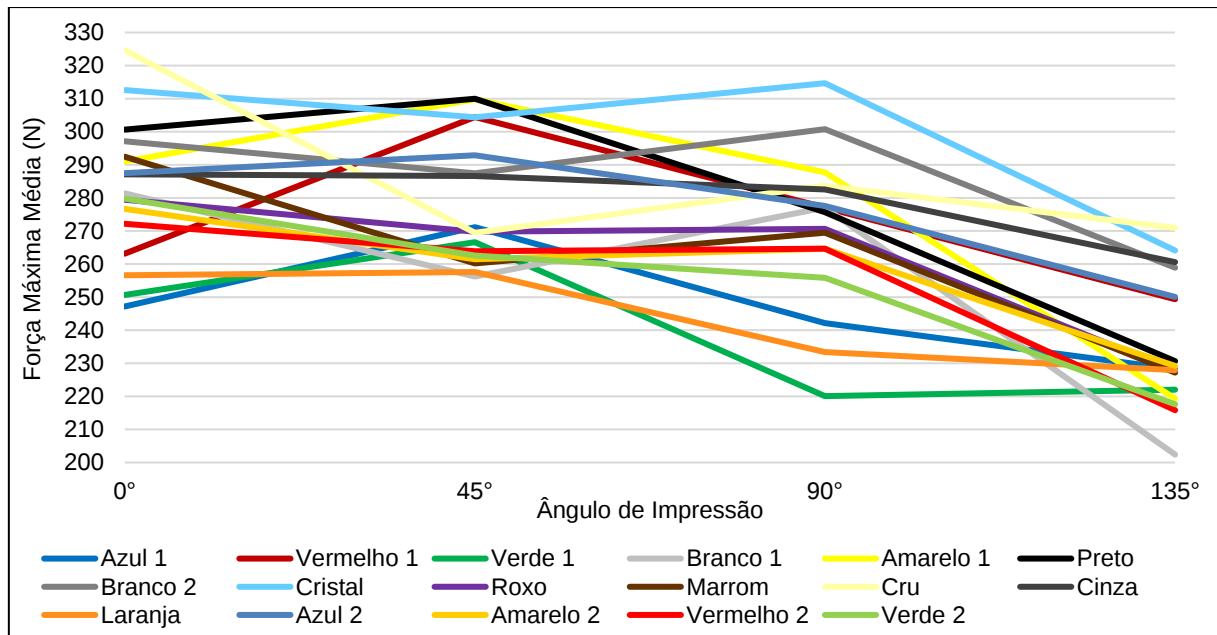
Fonte: Próprio autor

Tabela 4 – Resultados em destaque

		Cor	Valor
Força máxima (N)	Maior	Cristal	300,563 N
	Menor	Verde 1	239,351 N
Desvio padrão	Maior	Azul 1	43,408
	Menor	Amarelo 2	18,678

Fonte: Próprio autor.

Como segunda análise foi calculada a média dos resultados, porém agora fazendo a separação pelo ângulo de impressão e comparando por cor, conforme plotado no gráfico da Figura 6.

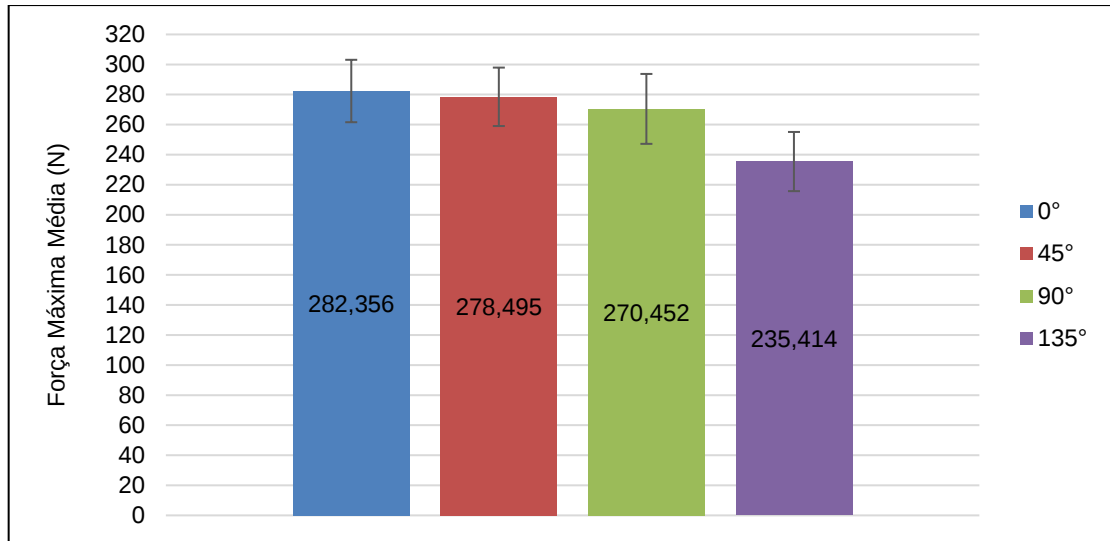
Figura 6 - Média da F_{máx} em cada cor por ângulo de impressão

Fonte: Próprio autor.

Observa-se então que, com exceção do verde 1, todas as cores mostram uma queda de resistência à tração nos CDPs impressos na posição 135°. Além disso, os CDPs impressos em 45° apresentam resultados mais similares, enquanto a comparação dos resultados em 90° mostra uma grande dispersão de resultados.

Por fim, na Figura 7, são apresentados os valores médios de todos os CDPs impressos em cada ângulo.

Figura 7 - Média da F_{máx} suportada pelos CDPs em cada ângulo de impressão



Fonte: Próprio autor.

Quando comparados com literatura similar, grupos que trabalharam com o ABS também registraram maiores valores para os CDPs impressos em 0° (ZIEMIAN, C.; SHARMA, M.; ZIEMIAN, S.. LETCHER, T.; RANKOUHI, B.; JAVADPOUR, S.. ZIEMIAN, C. W.; ZIEMIAN, R. D.; HAILE, K. V..). Em contrapartida, grupos que trabalharam com PLA encontraram resultados maiores para CDPs manufaturados em 45° (LETCHER, T.; WAYTASHEK, M.. VĂLEAN, C.; MARŞAVINA, L.; MĂRGHITAŞ, M.; LINUL, E.; RAZAVI, J.; BERTO, F..).

4.2 MICROSCOPIA

4.2.1 Microscopia Óptica

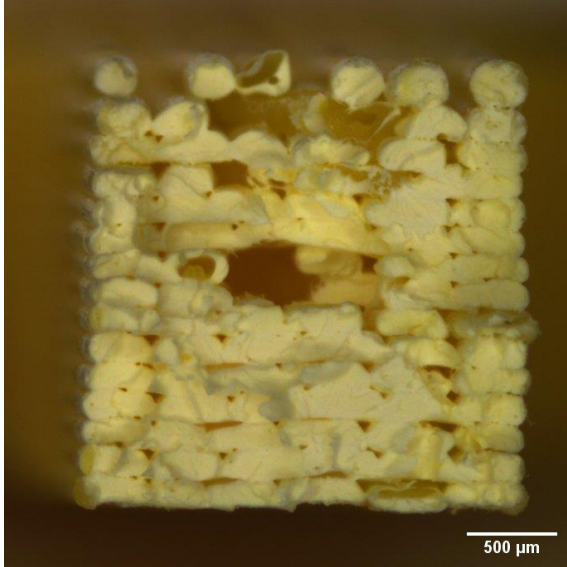
Tendo em vista que foram testadas algumas cores similares, porém de marcas diferentes, inicialmente é apresentado um comparativo direto das fraturas dessas cores na Figura 8.

Figura 8 – CDPs fraturados no ensaio de tração.

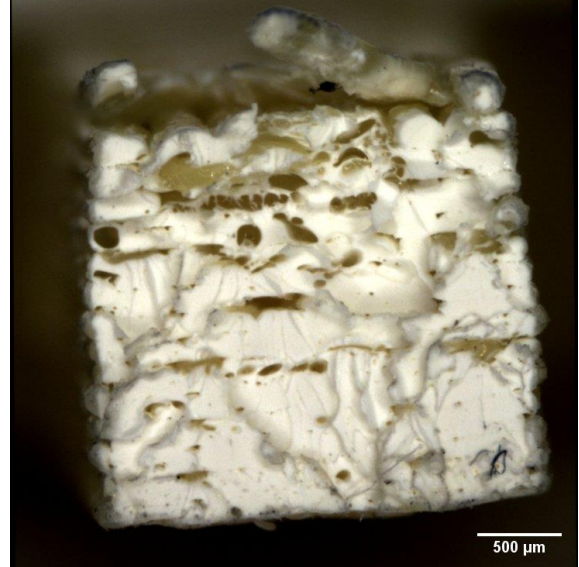
Para todas as imagens a linha superior é a primeira camada impressa.

(continua)

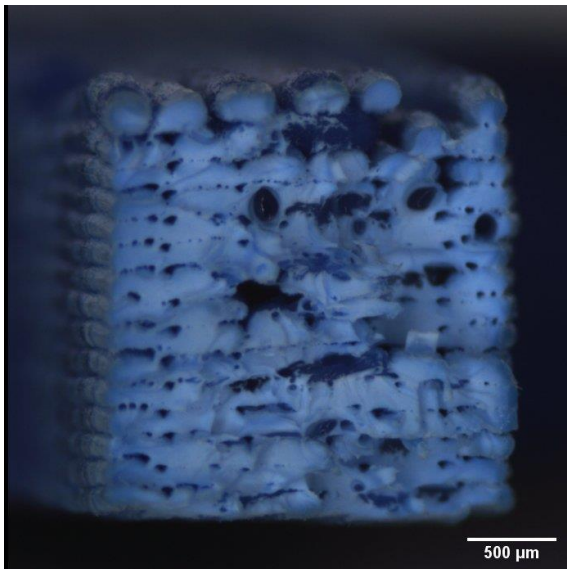
(a) Amarelo 1 ($F_{\text{máx}} = 278,345 \text{ N}$)



(b) Amarelo 2 ($F_{\text{máx}} = 257,022 \text{ N}$)



(c) Azul 1 ($F_{\text{máx}} = 247,048 \text{ N}$)



(d) Azul 2 ($F_{\text{máx}} = 277,615 \text{ N}$)

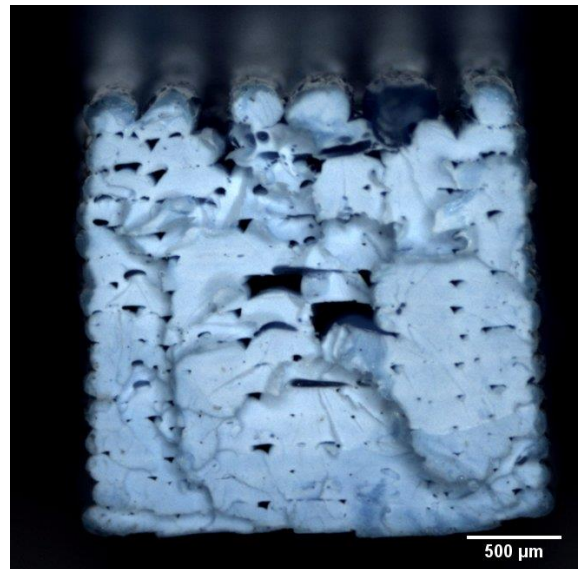
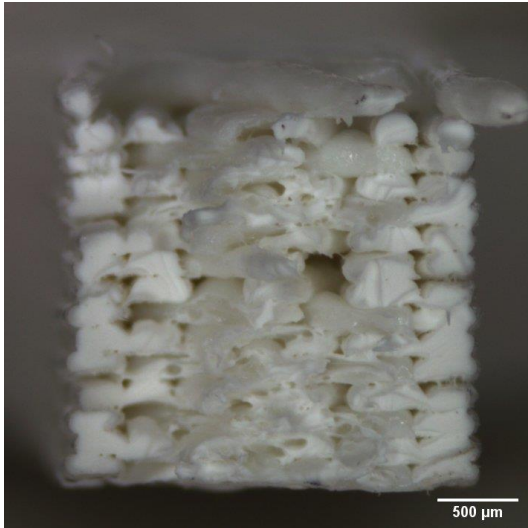


Figura 8 – CDPs fraturados no ensaio de tração.

Para todas as imagens a linha superior é a primeira camada impressa.

(continuação)

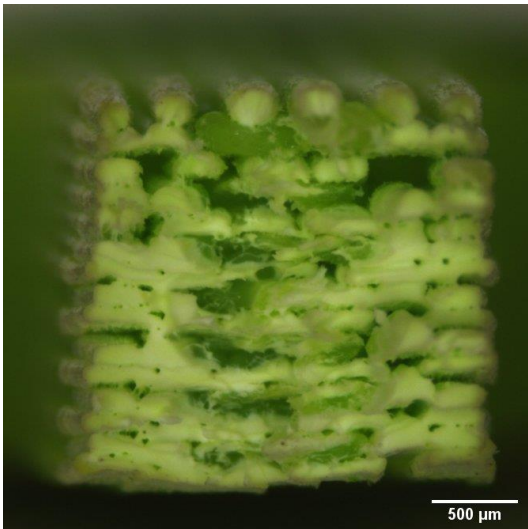
(e) Branco 1 ($F_{m\acute{a}x} = 257,046 \text{ N}$)



(f) Branco 2 ($F_{m\acute{a}x} = 287,482 \text{ N}$)



(g) Verde 1 ($F_{m\acute{a}x} = 239,351 \text{ N}$)



(h) Verde 2 ($F_{m\acute{a}x} = 255,498 \text{ N}$)

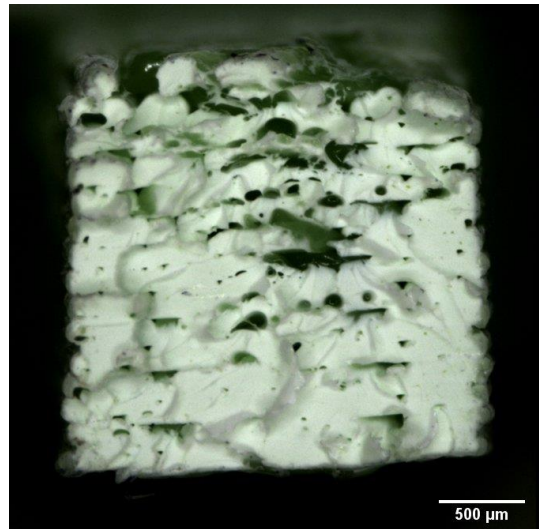
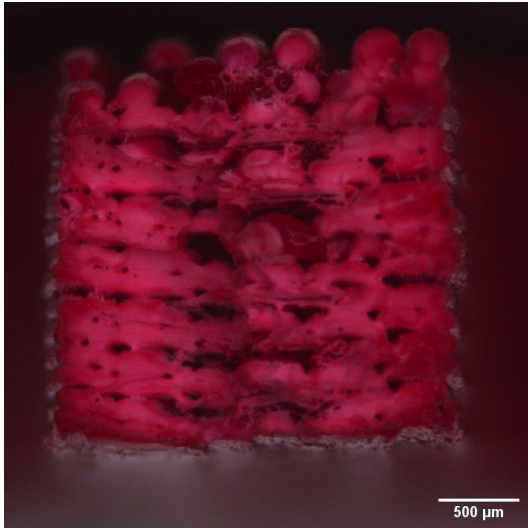


Figura 8 – CDPs fraturados no ensaio de tração.

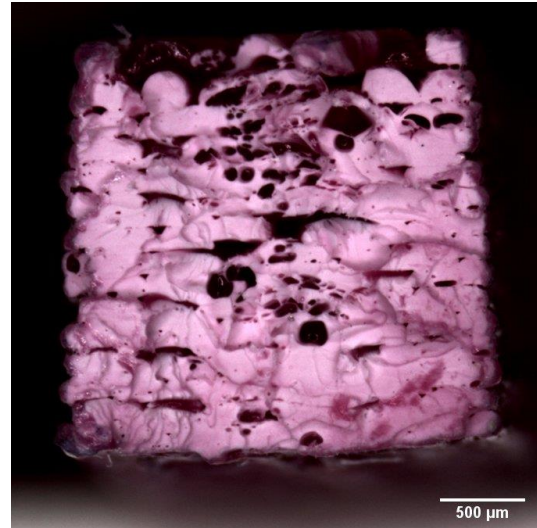
Para todas as imagens a linha superior é a primeira camada impressa.

(conclusão)

(i) Vermelho 1 ($F_{\text{máx}} = 273,131 \text{ N}$)



(j) Vermelho 2 ($F_{\text{máx}} = 255,716 \text{ N}$)



Fonte: Próprio autor (LAIMat FEG – UNESP).

A partir desse comparativo apresentado é possível fazer algumas comparações diretas entre as cores:

- AMARELO: A fratura (a) apresenta um preenchimento menor, com camadas bem distintas, um poro grande no meio e com textura mais reta, porém rugosa em alguns pontos. Já na fratura (b) tem-se poucas linhas definidas, o que mostra uma maior adesão entre as camadas, e com poros menores. Nesta fratura é possível observar textura de microfluxo e formação de escarpas, nas primeiras camadas impressas é possível observar características mais rugosas, maior presença de poros e com regiões mais escuras que apontam degradação do material. O Amarelo 1, apesar de não possuir uma boa ligação entre as camadas, apresentou uma maior resistência à fratura, fato que pode ser explicado pela presença de material degradado na fratura do Amarelo 2.

- AZUL: Na fratura (c) há poros por toda fratura e uma clara separação entre o comportamento das regiões laterais, que apresentaram fratura reta, e da região central, que se comportou como fratura mais rugosa, com maior presença de poros. Isso acontece por essas regiões apresentarem diferentes velocidades de resfriamento, a região central teve um resfriamento mais lento, já que a região periférica serviu de proteção térmica. Essa região periférica estava em contato direto com o ar e, por isso, teve um resfriamento mais rápido. Em

(d) observa-se um comportamento homogêneo com formação de escarpas, textura de microfluxo, pequenos poros espalhados por toda região periférica e poros maiores na região central. O Azul 2 apresentou uma maior ligação entre as camadas e, conseqüentemente, uma maior resistência à fratura.

Para BRANCO [(e) e (f)], VERDE [(g) e (h)] e VERMELHO [(i) e (j)], apesar de apresentarem valores diferentes de $F_{m\acute{a}x}$, as características das fraturas são similares à (c) e (d), respectivamente. Fato esperado já que temos comparação das mesmas duas marcas nessas quatro cores (azul, branco, verde e vermelho).

Além das cores Amarelo 2, Branco 2, Verde 2, Vermelho 2 e Azul 2 já citadas, tivemos características similares para todas as outras cores da Marca 3 (Preto, Cinza, Laranja, Cristal, Roxo, Marrom e Cru), tornando-se assim redundante a apresentação dessas imagens. Apenas os valores de $F_{m\acute{a}x}$ apresentaram uma diferença, conforme já discutido na seção 4.1.

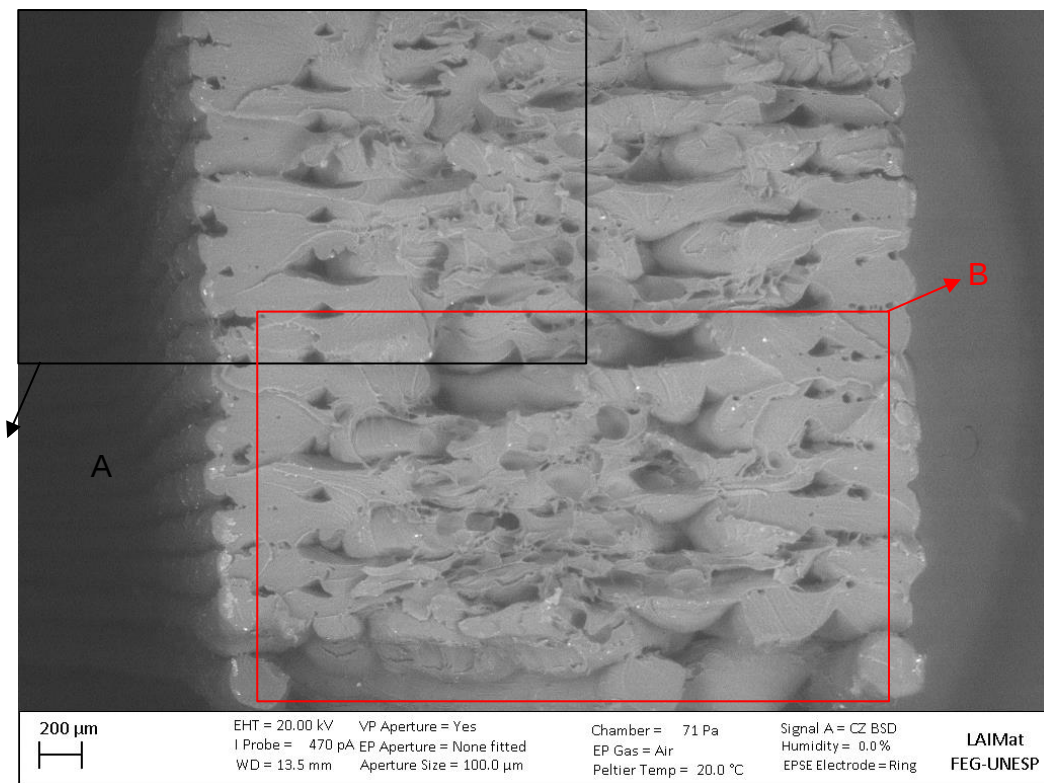
4.2.2 Microscopia Eletrônica

A partir da análise por MEV, pode-se confirmar as características observadas por microscopia óptica, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Fratura de CDP cor Vermelho 1

(continua)

(a) Fratura Completa



(b) Detalhe A

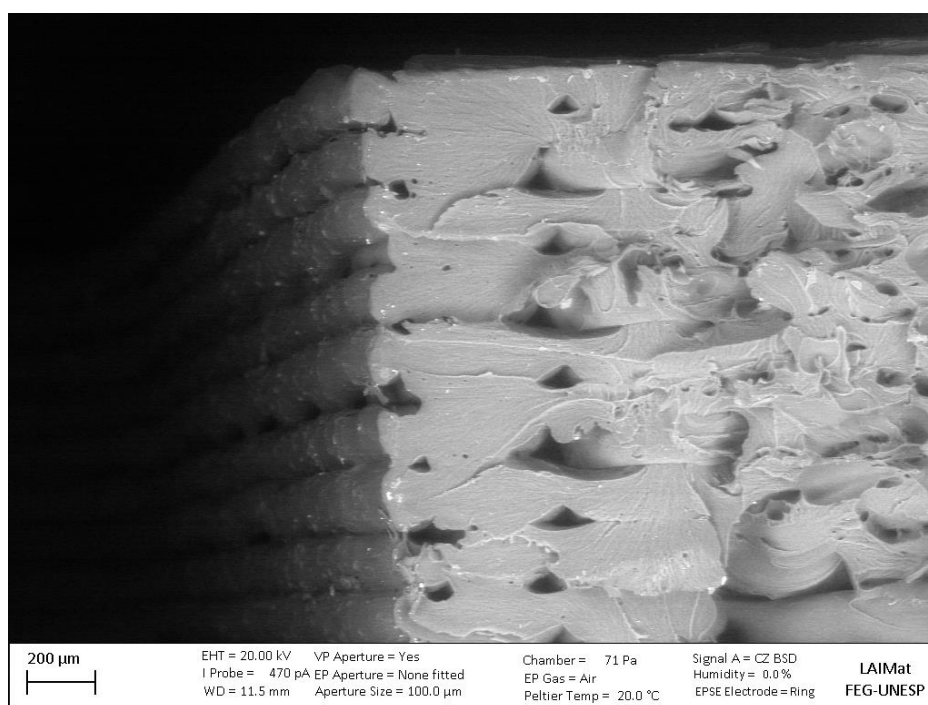
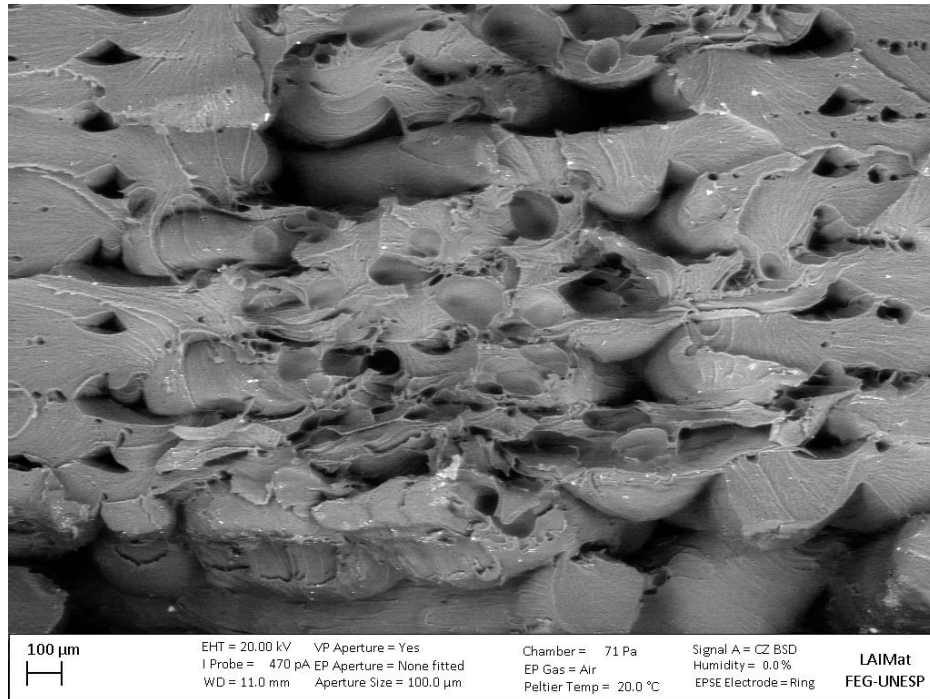


Figura 9 – Fratura de CDP cor Vermelho 1

(conclusão)

(c) Detalhe B



Fonte: Próprio autor (LAIMat FEG – UNESP).

Observa-se então, novamente, características como escarpas e textura de microfluxo nos cantos (b) e mais rugosa no meio (c). Esta análise foi feita apenas para fins de confirmar o que já havia sido observado e, por isso não se torna necessário apresentar aqui todas as fraturas, já que foram obtidas as mesmas conclusões para as respectivas cores já citadas na seção 4.2.1.

O ABS é formado apenas por carbono, hidrogênio e nitrogênio, seguindo a fórmula química $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$. A partir da análise de EDS foi possível observar nos 17 filamentos testados o total de 12 elementos e a sua recorrência está mostrada na Tabela 5. Apesar de o ABS ter nitrogênio em sua composição, foi utilizada atmosfera de gás nitrogênio na câmara do MEV, por este motivo o elemento não foi identificado durante a análise.

Com a observação da Tabela 6 é possível analisar a quantidade de elementos encontrados em cada um dos filamentos e, cruzando com os dados obtidos nos ensaios de tração, observamos que não é possível traçar um padrão entre essas duas informações, já que a qualidade da interface entre o polímero e o aditivo é o principal parâmetro de influência no comportamento mecânico e não a quantidade de elementos em si.

Tabela 5 – Elementos químicos encontrados na EDS.

Elemento	Recorrência
C	17
O	16
S	16
Ca	11
Si	7
Cl	6
K	5
Ti	5
Al	4
Na	3
Mg	3
Cd	1

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6 – Quantidade de elementos químicos encontrados na EDS.

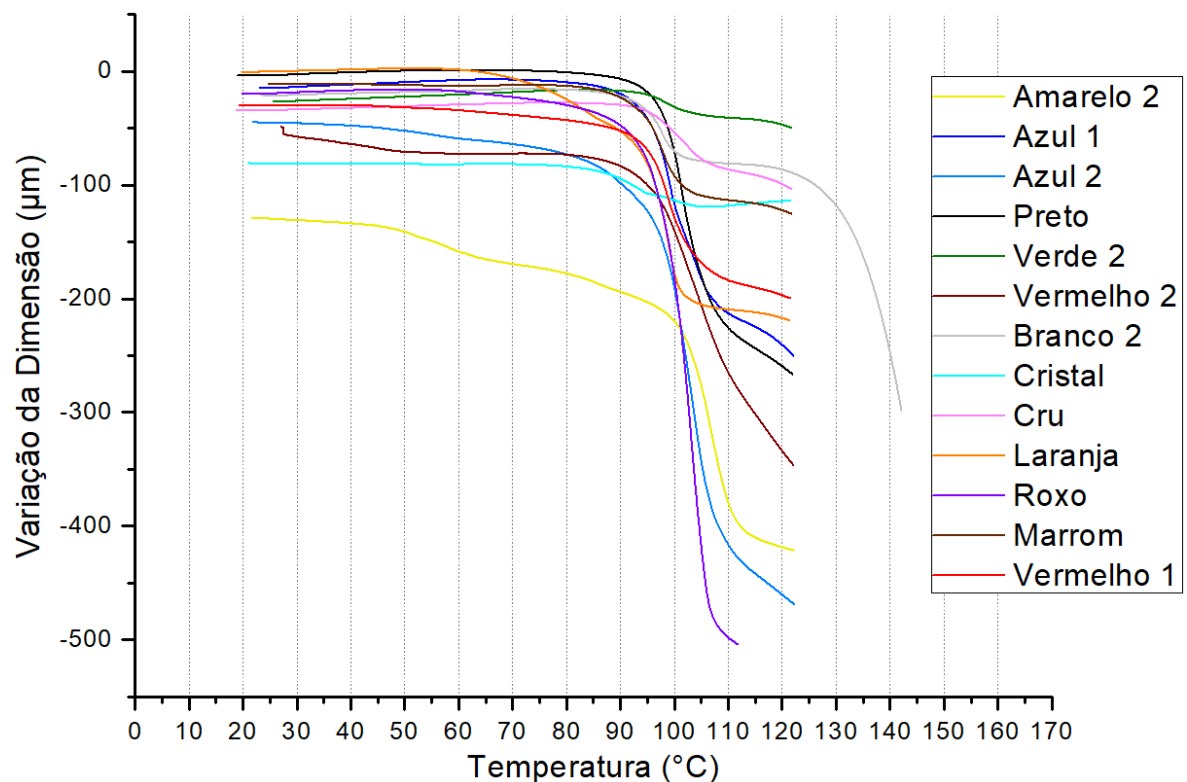
Filamento	Quantidade de Elementos	F_{máx} média (N)
Azul 1	6	247,048
Vermelho 1	9	273,131
Verde 1	9	239,351
Branco 1	10	257,046
Amarelo 1	5	278,345
Preto	4	280,132
Branco 2	10	287,482
Cristal	8	300,563
Roxo	4	263,325
Marrom	3	264,402
Cru	3	289,054
Cinza	4	279,837
Laranja	4	244,006
Azul 2	3	277,615
Amarelo 2	4	257,022
Vermelho 2	4	255,716
Verde 2	4	255,498

Fonte: Próprio autor.

4.3 ANÁLISE TERMOMECAÂNICA (TMA)

Neste ensaio foram testados 13 filamentos (por conta da pandemia não foi possível testar os filamentos Amarelo 1, Verde 1, Branco 1 e Cinza) e com esses resultados foi possível plotar o gráfico mostrado na Figura 10.

Figura 9 – Gráfico: Variação da Dimensão X Temperatura.



Fonte: Próprio autor.

Em geral é possível observar apenas uma variação onde temos a fusão do material. De todas as cores testadas, 12 delas têm esse processo ocorrendo entre 90°C e 110°C. Apenas o filamento Branco 2 apresentou a fusão começando em aproximadamente 115°C.

Outra particularidade observada no Branco 2 é a presença de uma outra curva bem definida, antes da fusão, em aproximadamente 90°C, que é uma curva característica do processo de transição vítrea. Um traço menos definido dessa primeira curva também pode ser observado nos filamentos Laranja, Cristal e Amarelo 2.

5 CONCLUSÕES

Por meio dos ensaios de tração foi possível uma análise mais detalhada de cada cor e ângulo de impressão e, a partir disso, concluir que a cor Cristal foi a que suportou maior carga, por uma diferença de 20,37% do menor valor. Já o Amarelo 2 apresentou menor desvio padrão, se mostrando mais confiável, e uma diferença de 61,58% do maior valor.

A partir da análise de falhas foi possível observar uma clara diferença entre as 3 marcas, porém, essa diferença é pequena quando se tratou de CDPs da mesma marca, mas cores diferentes. Com essa diferença é possível concluir que dependendo da marca ou cor utilizada deve-se adotar parâmetros diferentes, a fim de obter um produto com melhores propriedades. Além disso, a partir da comparação direta dos resultados dos ensaios de tração e EDS destaca-se que a qualidade da interface entre o polímero e o aditivo é o principal parâmetro de influência no comportamento mecânico.

Por fim, com a análise termomecânica a principal semelhança entre os resultados obtidos dá-se no processo de fusão ocorrendo entre 90°C e 110°C e alguns dos filamentos apontando uma leve característica da presença do processo de transição vítrea.

REFERÊNCIAS

- AHN, S. H.; MONTERO, M.; ODELL, D.; ROUNDY, S. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. **Rapid Prototyping Journal**, Bingley, UK, v. 8, n. 4, p. 248-257, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/13552540210441166>. Acesso em: 31 jan. 2021.
- ALLEN, R. J. A.; TRASK, R. S. An experimental demonstration of effective curved layer fused filament fabrication utilising a parallel deposition robot. **Additive Manufacturing**, New York, v. 8, p. 78-87, 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860415000445>. Acesso em: 31 jan. 2021.
- AMZA, C. G.; NIȚOI, D. F. Considerations on thermic and mechanic processes that appear when 3D printing using ABS fused deposition modelling technology. **AIP Conference Proceedings**, n. 1, p. 030001, 2018. Disponível em: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5024151>. Acesso em: 31 jan. 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638-14** : standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken, PA: ASTM, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ISO/ASTM 52900**: additive manufacturing, general principles, terminology. West Conshohocken, PA: ASTM, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3039**: standard test method for tensile properties of polymer matrix Composite Materials. West Conshohocken, PA: ASTM, 2017.
- BARDIYA, S.; JERALD, J.; SATHEESHKUMAR, V. The impact of process parameters on the tensile strength, flexural strength and the manufacturing time of fused filament fabricated (FFF) parts. **Materials Today: Proceedings**, 2020. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320333393>. Acesso em: 31 jan. 2021.
- CAMPBELL, T.; WILLIAMS, C.; IVANOVA, O.; GARRETT, B. Could 3D printing change the world. **Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing, Atlantic Council**, v.3, 2011. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/pdf/resrep03564.pdf?refreqid=excelsior%3Ae8c09a61e0e656681bbbf51314277897&seq=1>. Acesso em: 05 maio 2019.
- CANTRELL, J. T.; ROHDE, S.; DAMIANI, D.; GURNANI, R. Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts. **Rapid Prototyping Journal**, 2017. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-03-2016-0042/full/html?af=R&fullSc=1>. Acesso em: 18 abr. 2020.
- CRUMP, S. S. **Fast, precise, safe prototypes with FDM**. Atlanta, p. 53-60. 1991. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

0026369845&partnerID=40&md5=84fefc0a925bb2ffa96152287bd9d2fc. Acesso em: 01 fev. 2021.

DE LEON, A. C.; CHEN, Q.; PALAGANAS, N. B.; PALAGANAS, J. O. High performance polymer nanocomposites for additive manufacturing applications. **Reactive and Functional Polymers**, Ohio, 103, p. 141-155, 2016. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1381514816300657>. Acesso em: 01 fev. 2021.

DIZON, J. R. C.; ESPERA, A. H.; CHEN, Q.; ADVINCULA, R. C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. **Additive Manufacturing**, Cleveland, v.20, p. 44-67, 2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860417302749>. Acesso em: 09 jan. 2021.

DURGUN, I.; ERTAN, R. Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. **Rapid Prototyping Journal**, Bursa, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2012-0091>. Acesso em: 06 maio 2020.

GAO, W.; ZHANG, Y.; RAMANUJAN, D.; RAMANI, K. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. **Computer-Aided Design**, West Lafayette, IN, v. 69, p. 65-89, 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448515000469>. Acesso em: 01 fev. 2021.

GONZALEZ-GUTIERREZ, J.; GODEC, D.; GURAN, R.; SPOERK, M. **3D printing conditions determination for feedstock used in fused filament fabrication (FFF) of 17-4PH stainless steel parts**. 2017. p. 117-120. Disponível em: <https://hrcak.srce.hr/189379>. Acesso em: 01 fev. 2021.

GRIMM, T. **User's guide to rapid prototyping**. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2004.

HUANG, S. H.; LIU, P.; MOKASDAR, A.; HOU, L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 67, n. 5, p. 1191-1203, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>. Acesso em: 20 jan. 2021.

KAZMER, D. 28 - Three-dimensional printing of plastics. In: KUTZ, M. (ed.). **Applied plastics engineering handbook**. 2nd ed. Lowell, MA: William Andrew Publishing, 2017. p. 617-634.

KULICH, D. M.; GAGGAR, S. K.; LOWRY, V.; STEPIEN, R. Acrylonitrile–Butadiene–Styrene (ABS) Polymers. In: LEY, C. (ed.). **Kirk-othmer encyclopedia of chemical technology**. 15 th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

LEE, B. H.; ABDULLAH, J.; KHAN, Z. A. Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. **Journal of Materials Processing Technology**, Illinois, v.169, n. 1, p. 54-61, 2005. Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605003717>. Acesso em: 07 maio 2020.

LEE, C. S.; KIM, S. G.; KIM, H. J.; AHN, S. H. Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. **Journal of Materials Processing Technology**, Oakland, v. 187-188, p. 627-630, 2007. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013606011162>. Acesso em: 02 fev. 2021.

LEE, J.-Y.; AN, J.; CHUA, C. K. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. **Applied Materials Today**, Alberta, v. 7, p. 120-133, 2017. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352940717300173>. Acesso em: 05 dez. 2020.

LETCHER, T.; RANKOUHI, B.; JAVADPOUR, S. Experimental study of mechanical properties of additively manufactured ABS plastic as a function of layer parameters. **American Society of Mechanical Engineers Digital Collection**. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/IMECE2015-52634>. Acesso em: 05 maio 2020.

LETCHER, T.; WAYTASHEK, M. Material property testing of 3D-printed specimen in PLA on an entry-level 3D printer. **American Society of Mechanical Engineers Digital Collection**. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/IMECE2014-39379>. Acesso em: 05 maio 2020.

MELENKA, G. W.; CHEUNG, B. K. O.; SCHOFIELD, J. S.; DAWSON, M. R. Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures. **Composite Structures**, Alberta, v. 153, p. 866-875, 2016. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822316311497>. Acesso em: 14 jan. 2020.

NOMANI, J.; WILSON, D.; PAULINO, M.; MOHAMMED, M. I. Effect of layer thickness and cross-section geometry on the tensile and compression properties of 3D printed ABS. **Materials Today Communications**, v. 22, p. 100626, 2020. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492819300789>. Acesso em: 05 jan. 2021.

RANKOUHI, B.; JAVADPOUR, S.; DELFANIAN, F.; LETCHER, T. Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, Brookings, SD, v. 16, n. 3, p. 467-481, 2016. Disponível em: <https://rdcu.be/ceXyA>. Acesso em: 02 fev. 2021.

SONG, Y.; LI, Y.; SONG, W.; YEE, K. Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA. **Materials & Design**, v. 123, p. 154-164, 2017. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517302976>. Acesso em: 02 fev. 2021.

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

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909002945>. Acesso em: 01 fev. 2021.

SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. **Journal of Advanced Research**, Cairo, v. 3, n. 1, p. 81-90, 2012. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209012321100066X>. Acesso em: 01 fev. 2021.

TRANCHARD, S. R. V. **Manufacturing our 3D future**. 2015. Disponível em: <https://www.iso.org/news/2015/05/Ref1956.html>. Acesso em: 01 fev. 2021.

TÜRK, D.-A.; BRENNI, F.; ZOGG, M.; MEBOLDT, M. Mechanical characterization of 3D printed polymers for fiber reinforced polymers processing. **Materials & Design**, Oxford, UK, v. 118, p. 256-265, 2017. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517300679>. Acesso em: 04 abr. 2017.

VAEZI, M.; SEITZ, H.; YANG, S. A review on 3D micro-additive manufacturing technologies. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Southampton, v. 67, n. 5-8, p. 1721-1754, 2013. Disponível em: <https://rdcu.be/ceXy0>. Acesso em: 01 fev. 2021.

VĂLEAN, C.; MARŞAVINA, L.; MĂRGHITAŞ, M.; LINUL, E. Effect of manufacturing parameters on tensile properties of FDM printed specimens. **Procedia Structural Integrity**, v. 26, p. 313-320, 2020. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321620304480>. Acesso em: 25 jan. 2021.

VITALE, M.; COTTELEER, M.; HOLDOWSKY, J. An overview of additive manufacturing. **Defense AT&L**, Orlando, FL, nov./dec. 2016. Disponível em: <http://dau.dodlive.mil/2016/11/04/an-overview-of-additive-manufacturing/>. Acesso em: 30 jan. 2021.

WENDT, C.; BATISTA, M.; MORENO, E.; VALERGA, A. P. Preliminary design and analysis of tensile test samples developed by additive manufacturing. **Procedia Engineering**, Hamburg, GER, v. 132, p. 132-139, 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815044008>. Acesso em: 21 ago. 2019.

WILLIAMS, L. D.; WILLIAMS, L. **Additive manufacturing or 3D scanning and printing: manufacturing engineering handbook**. New York: McGraw-Hill, 2015.

WITTBRODT, B.; PEARCE, J. M. The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. **Additive Manufacturing**, v. 8, p. 110-116, 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860415000494>. Acesso em: 09 jan. 2021.

WOHLERS, T.; GORNET, T. History of additive manufacturing. In: WOHLERS, T. (ed). **Wohlers report**. Fort Collins, CO: Wohlers Associates Inc, 2014. p. 118.

WONG, K. V.; HERNANDEZ, A. A review of additive manufacturing. **International Scholarly Research Notices**, Illinois, 2012. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/208760/>. Acesso em: 01 fev. 2021.

ZIEMIAN, C.; SHARMA, M.; ZIEMIAN, S. **Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling**. Rijeka, Croatia: InTech, 2012. 2397 p. (Mechanical Engineering, v. 10.5772).

ZIEMIAN, C. W.; ZIEMIAN, R. D.; HAILE, K. V. Characterization of stiffness degradation caused by fatigue damage of additive manufactured parts. **Materials & Design**, v.109, p. 209-218, 2016. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127516309789>. Acesso em: 02 abr. 2017.