

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SANTO ANDRÉ

Mecânica Automobilística

**Edson Delmondes de Lima
José Roberto dos Santos**

**Estudo sobre novos componentes fabricados pela indústria
automobilística com o auxílio da manufatura aditiva**

**Santo André
2018**

**Edson Delmondes de Lima
José Roberto dos Santos**

**Estudo sobre novos componentes fabricados pela indústria
automobilística com o auxílio da manufatura aditiva**

Monografia apresentada como exigência
para obtenção do grau de Tecnologia em
Mecânica Automobilística da Faculdade de
Tecnologia de Santo André.

Orientador: Me. Murilo Zanini de Carvalho

**Santo André
2018**

FICHA CATALOGRÁFICA

L732e

Lima, Edson Delmondes de
Estudo sobre novos componentes fabricados pela indústria automobilística com o auxílio da manufatura aditiva / Edson Delmondes de Lima, José Roberto dos Santos. - Santo André, 2018. – 90f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Mecânica Automobilística, 2018.

Orientador: Prof. Me. Murilo Zanini de Carvalho

1. Mecânica. 2. Prototipagem. 3. Desenvolvimento. 4. Manufatura. 5. Processos. 6. Indústria automobilística. 7. Ensaios mecânicos. I. Santos, José Roberto dos. II. Estudo sobre novos componentes fabricados pela indústria automobilística com o auxílio da manufatura aditiva.

LISTA DE PRESENÇA

SANTO ANDRÉ, 28 DE JUNHO DE 2018

LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA “ESTUDO
SOBRE NOVOS COMPONENTES FABRICADOS PELA
INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA COM O AUXÍLIO DA
MANUFATURA ADITIVA” DOS ALUNOS DO 6º SEMESTRE
DESTA U.E.

BANCA

PRESIDENTE:

PROF. MURILO ZANINI DE CARVALHO



MEMBROS:

PROF. ROBERTO BORTOLUSSI



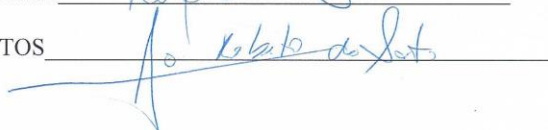
PROF. FERNANDO GARUP DALBO

ALUNOS:

EDSON DELMONDES DE LIMA



JOSÉ ROBERTO DOS SANTOS



AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos primeiramente a Deus, aos professores Murilo Zanini de Carvalho e Fernando Garup Dalbo pelo incentivo e auxílio na elaboração deste projeto e a todas as pessoas que colaboraram direta ou indiretamente para sua realização.

“Para realizar grandes conquistas, devemos não apenas agir, mas também sonhar; não apenas planejar, mas também acreditar. ”
Anatole France

RESUMO

Os processos de desenvolvimento e manufatura na indústria automobilística passaram por um grande processo de transformação nas últimas décadas. Prazos cada vez mais curtos conduziram à adoção de novos processos para atender esse novo cenário. O processo de prototipagem que anteriormente era realizada de forma manual passou a contar com as tecnologias de impressão 3D, conhecidas inicialmente como prototipagem rápida, o que possibilitou a redução de tempo e custos de projeto. Desenvolvimento de novos processos, materiais disponíveis, qualidade, etc., ampliaram a gama de aplicações dessas tecnologias que passaram a ser denominadas como manufatura aditiva. Neste trabalho realizou-se pesquisa bibliográfica sobre os processos de manufatura aditiva aplicados atualmente pela indústria automobilística. Inseridos nessa pesquisa abordamos a história da introdução dessa nova tecnologia até os momentos atuais, assim como futuras aplicações. Para avaliar o comportamento de peças produzidas com esse tipo de tecnologia, corpos de prova foram fabricados através de impressora 3D utilizando o PLA como matéria-prima pelo processo FDM. Parâmetros de impressão como padrão de preenchimento e densidade foram alterados para avaliação da sua influência na resistência mecânica à tração, resistência ao escoamento e alongamento. Espera-se que esses dados auxiliem na aplicação dessa tecnologia no âmbito acadêmico, podendo também, ser base para futuros trabalhos.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, indústria automobilística, FDM, PLA, ensaios mecânicos, impressão 3D.

ABSTRACT

The processes of development and manufacturing in the automobile industry have undergone a major process of transformation in recent decades. Increasingly shorter deadlines have led to the adoption of new processes to meet this new scenario. The prototyping process that was previously carried out in a manual way came to be accomplished with the aid of 3D printing technologies, known initially as rapid prototyping, which made it possible to reduce time and project costs. Development of new processes, available materials, quality, etc., have expanded the range of applications of these technologies that have been named as additive manufacturing. In this work, bibliographical research was carried out on the additive manufacturing processes currently applied by the automobile industry. Inserted in this research we address the history of introducing this new technology to current moments as well as future applications. To evaluate the behavior of parts produced with this type of technology, a series of test pieces were manufactured using a 3D printer using PLA as raw material by the FDM process. Print parameters as infill pattern and density were changed for evaluation of their influence on tensile strength, yield strength and elongation. It is expected that this data will help in the application of this technology in the academic scope, and may also be the basis for future work.

Keywords: Additive manufacturing, automobile industry, FDM, PLA, mechanical tests, 3D printing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos de Manufatura	17
Figura 2 - Gráfico comparativo de custos de peças por processos	18
Figura 3 - À esquerda impressora desktop Mojo, à direita impressora profissional Fortus 380mc	20
Figura 4 - Modelo em 3D CAD à esquerda e convertido para STL à direita	22
Figura 5 - Remoção dos suportes de peça produzida pelo processo SLA	23
Figura 6 - Etapa de pós-processamento em câmara UV	24
Figura 7 - Desenho esquemático do processo SLA	29
Figura 8 - Funcionamento do processo SLS	31
Figura 9 - Esquema funcionamento do processo SLM	32
Figura 10 - Esquema de funcionamento do equipamento EBM	33
Figura 11 - Esquema de funcionamento do equipamento de LOM	34
Figura 12 - Esquema de funcionamento do equipamento de 3DP	36
Figura 13 - Esquema simplificado do equipamento de FDM	37
Figura 14 - Fases de implementação da Manufatura Aditiva na indústria automobilística	39
Figura 15 - Zonas de peça impressa em FDM	44
Figura 16 - Orientação de impressão	46
Figura 17 - Etapas para impressão dos corpos de prova	47
Figura 18 - Padrão linear com (a) 5%, (b) 20% e (c) 50%	49
Figura 19 - Padrão retilíneo com (a) 5%, (b) 20% e (c) 50%	49
Figura 20 - Estrutura química do monômero de PLA	50
Figura 21 - Impressora Voolt3D da Fatec Santo André	52
Figura 22 - Corpo de prova fixo ao equipamento de ensaios WDW-100E da Fatec Santo André	53
Figura 23 - Gráfico força x deslocamento	55
Figura 24 - Variação percentual da tensão de escoamento (linear)	57
Figura 25 - Variação percentual da tensão de escoamento (retilíneo)	57
Figura 26 - Gráfico boxplot da tensão de escoamento	58
Figura 27 - Gráfico tensão de escoamento x densidade	58
Figura 28 - Variação percentual da tensão limite de resistência (linear)	60
Figura 29 - Variação percentual da tensão limite de resistência (retilíneo)	60
Figura 30 - Gráfico tensão limite de resistência x densidade	61
Figura 31 - Gráfico boxplot da tensão limite de resistência	61
Figura 32 - Comparativo da fratura dos corpos de prova retilíneo e linear com 20%	63
Figura 33 - Fratura dos corpos de prova retilíneo com 50%	64
Figura 34 - Gráfico força x deslocamento (retilíneo com 50%)	64
Figura 35 - Variação percentual do alongamento (linear)	65
Figura 36 - Variação percentual do alongamento (retilíneo)	65
Figura 37 - Variação percentual da massa (linear)	66
Figura 38 - Variação percentual da massa (retilíneo)	67
Figura 39 - Gráfico massa x densidade	67
Figura 40 - Gráfico boxplot da massa	68
Figura 41 - Gráfico resistência/massa x densidade	69
Figura 42 - Gráfico tensão limite de resistência x densidade (linear)	71
Figura 43 - Gráfico tensão limite de resistência x densidade (retilíneo)	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Processos de Manufatura Aditiva.....	28
Quadro 2 - Parâmetros Fixos do Processo FDM.....	48
Quadro 3 - Propriedades Mecânica do corpo de prova impresso com 2 cores distintas.....	54
Quadro 4 - Medidas de Largura e Espessura das amostras ensaiadas (mm)	55
Quadro 5 - Valores de Tensão de Escoamento	56
Quadro 6 - Valores de Tensão limite de resistência.....	59
Quadro 7 - Valores de comprimento inicial das amostras ensaiadas (mm)	62
Quadro 8 - Valores de Alongamento	62
Quadro 9 - Valores de Massa.....	66
Quadro 10 - Valores de resistência/massa	68
Quadro 11 - Comparativo de valores para os preenchimentos retilíneo e linear.....	70
Quadro 12 - Valores de tensão limite de resistência	72

LISTA DE ABREVIATURAS

3DP	Three Dimensional Printing - Impressão Tridimensional
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene – Acrilonitrila Butadieno Estireno
ASTM	American Society for Testing and Materials – Sociedade Americana para Ensaaios de Materiais
CAD	Computer Aided Design – Desenho assistido por computador
CAM	Computer Aided Manufacturing – Manufatura auxiliada por computador
CAE	Computer Aided Engineering – Engenharia auxiliada por computador
EBM	Electron Beam Melting - Fusão por Feixe de Elétrons
FST	Flame, smoke and toxicity – Fogo, fumaça e toxidade
FDM	Fused Deposition Modeling - Modelagem por Deposição de Material Fundido
LOM	Laminated Object Manufacturing - Manufatura de Objetos em Lâminas
MA	Manufatura Aditiva
MIT	Massachusetts Institute of Technology
ORNL	Oak Ridge National Laboratory
PC-ABS	Polycarbonato/Acrilonitrilo- Butadieno- Estireno
PET	Politereftalato de Etileno
PLA	Poli Ácido Láctico
PP	Polipropileno
PPSF	Polyphenylsulfone – Polifenilsulfona
PS	Poliestireno
STL	Standard Tessellation Language
SLA	Laser-Stereolithography - Estereolitografia
SLM	Selective Laser Melting - Fusão Seletiva à Laser
SLS	Selected Laser Sintering - Sinterização Seletiva à Laser
ULTEM	Polieterimida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Motivação.....	15
1.2	Organização do trabalho.....	16
2	PROCESSOS DE MANUFATURA.....	17
3	MANUFATURA ADITIVA.....	19
3.1	O processo de manufatura aditiva	20
3.1.1	Modelamento em CAD.....	21
3.1.2	Conversão para STL e manipulação	21
3.1.3	Construção	22
3.1.4	Remoção	23
3.1.5	Pós-processamento.....	24
3.2	Aplicação	24
3.3	Vantagens	25
3.4	Desvantagens	26
4	PROCESSOS.....	28
4.1	Estereolitografia (SLA -Laser-Stereolithography).....	29
4.2	Sinterização Seletiva à Laser (SLS – Selected Laser Sintering).....	30
4.3	Fusão Seletiva à Laser (SLM – Selective Laser Melting).....	32
4.4	Fusão por Feixe de Elétrons (EBM - Electron Beam Melting).....	33
4.5	Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM - Laminated Object Manufacturing)	34
4.6	Impressão Tridimensional (3DP).....	35
4.7	Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM - Fused Deposition Modeling)	37
5	MANUFATURA ADITIVA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.....	39
5.1	Contexto Atual.....	39
5.2	Tendências Futuras	41
6	Materiais e Métodos	43
6.1	Escolha do Processo	43
6.2	Caracterização do processo	43
6.3	Modelamento em CAD.....	47
6.4	Fatiamento e Seleção dos Parâmetros de Impressão	47
6.5	Material de Impressão (PLA)	50
6.6	Corpos de Prova	51
6.7	Impressão dos Corpos de prova	52

6.8 Ensaio de Tração	53
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
7.1 Tensão de Escoamento	56
7.2 Tensão Limite de Resistência	59
7.3 Alongamento	62
7.4 Massa	65
7.5 Relação Resistência/massa.....	68
7.6 Comparativo padrão de preenchimento	69
7.7 Estimativa Tensão limite de resistência	70
8 CONCLUSÃO.....	73
REFERÊNCIAS.....	76
APÊNDICE A – DESENHO CORPO DE PROVA	79
APÊNDICE B – ENSAIO TRAÇÃO LINEAR 5% (DADOS)	80
APÊNDICE C – ENSAIO DE TRAÇÃO LINEAR 5% (GRÁFICO)	81
APÊNDICE D – ENSAIO DE TRAÇÃO RETILÍNEO 5% (DADOS)	82
APÊNDICE E – ENSAIO DE TRAÇÃO RETILÍNEO 5% (GRÁFICO).....	83
APÊNDICE F – ENSAIO DE TRAÇÃO LINEAR 20% (DADOS)	84
APÊNDICE G – ENSAIO DE TRAÇÃO LINEAR 20% (GRÁFICO)	85
APÊNDICE H – ENSAIO DE TRAÇÃO RETILÍNEO 20% (DADOS)	86
APÊNDICE I – ENSAIO DE TRAÇÃO RETILÍNEO 20% (GRÁFICO)	87
APÊNDICE J – ENSAIO DE TRAÇÃO LINEAR 50% (DADOS).....	88
APÊNDICE K – ENSAIO DE TRAÇÃO LINEAR 50% (GRÁFICO).....	89
APÊNDICE L – ENSAIO DE TRAÇÃO RETILÍNEO 50% (DADOS).....	90
APÊNDICE M – ENSAIO DE TRAÇÃO RETILÍNEO 50% (GRÁFICO)	91

1 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva passou por enorme transformação nas últimas décadas. Essa transformação ocorreu tanto no seu método produtivo com a utilização de novos materiais, introdução de novos métodos de manufatura, mudanças na cadeia produtiva (indústria 4.0), como também no produto em si, com a incorporação de novos recursos de consumo, melhorias no design, etc. A globalização forçou a adoção de plataformas globais por parte de algumas montadoras, fazendo com que peças e componentes sejam compartilhados em vários modelos diferentes, entretanto existe no mercado enorme demanda por personalização e customização. (CREGGER, 2015)

A manufatura aditiva (conhecida também como prototipagem rápida ou impressão 3D) está em expansão na indústria automotiva. Possui grande potencial de influenciar no design e fabricação do veículo, assim como amplia as possibilidades para a sua customização. (CREGGER, 2015)

Para Hilton (2000) o grande interesse da indústria automotiva na tecnologia de prototipagem rápida advém da mudança no processo de desenvolvimento de produto. Segundo ele há necessidade para que esse processo aconteça cada vez mais rápido e cita como exemplo que o tempo de desenvolvimento de um veículo que há 10 anos atrás durava 60 meses hoje em dia leva em torno de 18 meses. Segundo Kai (2003) para se atender os prazos cada vez mais curtos, muitos dos processos envolvidos no projeto, teste, fabricação e comercialização dos produtos foram otimizados tanto em termos de material como de recursos.

O objetivo principal da prototipagem é a obtenção de uma imagem física de um novo conceito de projeto. Dessa forma é necessária antes do início da produção final. A fabricação de protótipos pode ser realizada por diversas formas: remoção de material, fundição, moldes, junção com adesivos, etc., e construído com materiais distintos: madeira, alumínio, zinco, etc. (KAI, 2003)

A prototipagem, entretanto, não é uma prática nova tendo passado por três fases, com o surgimento da segunda e terceira fases tendo acontecido nos últimos 30 anos. A primeira é a fase da prototipagem manual, as técnicas utilizadas para sua fabricação eram artesanais o que era extremamente trabalhoso. Nesta fase inicial os protótipos não eram muito sofisticados e o tempo para sua fabricação era elevado. A medida que as aplicações em CAD/CAM/CAE se difundiram ocorreu a transição para

a segunda fase que é a prototipagem virtual. A prototipagem virtual possibilita que modelos computacionais possam ser testados, analisados e modificados. A prototipagem rápida é a terceira fase com a diminuição do tempo de execução e possibilidade de construção de modelos complexos. (KAI, 2003)

A possibilidade de construção de um protótipo em pouco tempo, com características dimensionais idênticas ao idealizado pelos projetistas a partir de um desenho em CAD facilita o desenvolvimento do projeto. Anteriormente, quando as técnicas de impressão 3D não existiam, a fabricação de protótipos necessitava de uma série de operações, muitas vezes complexas. O tempo para a sua produção, a depender da situação, e somando-se a execução do próprio serviço como também o necessário para seleção dos fornecedores poderia ser superior a um mês. (SANT'ANNA, 2016)

As primeiras aplicações comerciais das técnicas de impressão 3D aconteceram no final dos anos 80. Nesse período a empresa 3D Systems foi a pioneira ao comercializar a primeira impressora com a tecnologia de estereolitografia. No setor automotivo a GM foi a primeira a adotar a nova tecnologia com o programa beta SLA-1. (GIBSON, 2015)

As primeiras empresas a adotarem a manufatura aditiva para fabricação de protótipos, logo perceberam seus benefícios, como por exemplo: melhoria da visualização, possibilidade de detecção de falhas na fase inicial de projeto, redução do tempo de fabricação do protótipo e redução expressiva dos custos tendo em vista a possibilidade de desenvolver projetos corretos de forma rápida. (GIBSON, 2015)

Percebeu-se a possibilidade de fabricação de protótipos para realização de testes funcionais em aplicações diversas. A Chrysler, por exemplo, realizou vários testes para validação de designs de êmbolos em 1992. Foi construído o modelo da geometria da cabeça do êmbolo em estereolitografia, instalados as molas e válvulas e então realizados os ensaios em bancada de teste, o que proporcionou uma melhoria de 38%. A Porsche em 1994, utilizando dessa mesma técnica de fabricação, ensaiou modelos de motor para estudar as características fluidodinâmicas do líquido de arrefecimento. (GIBSON, 2015)

Dado o ambiente exposto, o objetivo escolhido para este trabalho foi caracterizar peças impressas utilizando o material PLA seguindo a norma ASTM D638. Ensaios de tração foram realizados com diferentes padrões de preenchimento e densidade do material com o objetivo de avaliar o efeito da estrutura interna do

componente em relação as propriedades mecânicas (tensão de escoamento, tensão limite de resistência e alongamento).

1.1 Motivação

O processo de manufatura aditiva vem crescendo nos últimos anos em termos de materiais utilizados, novos processos, finalidade entre outros. Possui enorme aplicação em diversas áreas tais como: bioengenharia, aeroespacial, aeronáutica, automobilística, arquitetura, educacional, etc.

No início do seu desenvolvimento sua aplicação era restrita a fabricação de protótipos, porém isso tem mudado ao longo dos anos. Empresas do setor aeronáutico como Boeing e Airbus já possuem aviões comercializados com peças fabricadas por essa tecnologia.

O processo possui várias vantagens como a fabricação de peças complexas, economia de matéria-prima, manufatura direta (do desenho em CAD ao modelo físico), etc. Nas grandes montadoras de veículos ainda possui utilização quase que restrita a fabricação de protótipos, porém, isso tende a mudar nos próximos anos ou décadas com a ampliação de novos materiais, desenvolvimentos de impressoras com maior capacidade/velocidade de produção, criação de novas técnicas, etc.

Em relatório recentemente publicado pela empresa de auditoria PWC, a impressão 3D (juntamente com tecnologias como internet das coisas, big data, computação em nuvem, etc.) é vista como uma das tecnologias colaborativas para a implantação da indústria 4.0.

A transição dos meios produtivos para a indústria 4.0 e introdução das fábricas inteligentes que visam uma maior automação, interconexão entre os processos, maior agilidade, etc., torna os processos de manufatura aditiva extremamente importantes neste cenário.

A Royal Academy of Engineering (2013) declarou que a manufatura aditiva não é somente uma tecnologia disruptiva com potencial para substituir os processos de manufatura tradicionais, mas também é uma tecnologia que possibilita novos modelos de negócios, novos produtos e o surgimento de novas cadeias de suprimentos. (JIANG, 2017)

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em 8 capítulos, o capítulo 1 apresenta uma introdução as técnicas de prototipagem, que foram os primeiros passos para a aplicação da impressão 3D pela indústria automobilística. A história do desenvolvimento da manufatura aditiva foi descrita desde o seu início no final da década de 80 até os dias atuais. Foi discutido de forma breve como estes processos evoluíram ao longo dos anos e seus benefícios no processo produtivo.

Os três tipos de manufatura (formativa, subtrativa e aditiva) são apresentados e descritos no capítulo 2.

O capítulo 3 foi dedicado à abordagem sobre a definição de manufatura aditiva, o processo em si e suas principais aplicações, vantagens e desvantagens. Abordamos também como é realizado o processo como um todo desde o desenho em CAD até a obtenção do componente final.

No capítulo 4 é descrito sucintamente o modo de funcionamento, materiais de aplicação e finalidade dos principais processos: SLA, SLS, SLM, EBM, LOM, 3DP e FDM.

O capítulo 5 apresenta como as principais montadoras globais vêm aplicando as técnicas de manufatura aditiva nos seus processos produtivos e os benefícios adquiridos por essa postura.

No capítulo 6 é apresentado a metodologia de ensaio e descritos a escolha do processo de impressão, confecção dos corpos de prova e seleção dos parâmetros de impressão.

O capítulo 7 apresenta os resultados dos ensaios de tração e foram discutidos como a densidade e tipo preenchimento influenciaram as propriedades de tensão de escoamento, tensão limite de resistência, alongamento, massa e a relação resistência/massa.

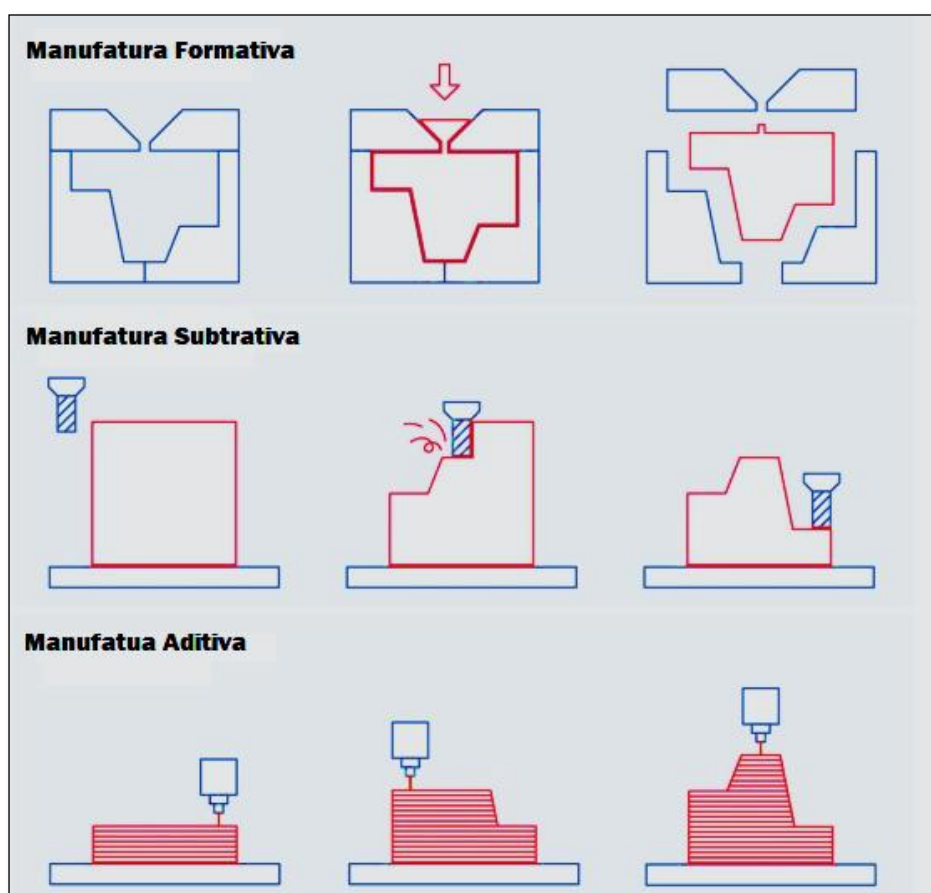
No último capítulo é apresentado as conclusões e propostas para trabalhos futuros. São apresentadas as referências para a construção do trabalho e seus apêndices.

2 PROCESSOS DE MANUFATURA

Os processos de manufatura, exemplificados na figura 1, podem ser divididos basicamente em três grandes grupos:

- Manufatura formativa
- Manufatura subtrativa e
- Manufatura Aditiva

Figura 1 - Processos de Manufatura



Fonte: REDWOOD,2017

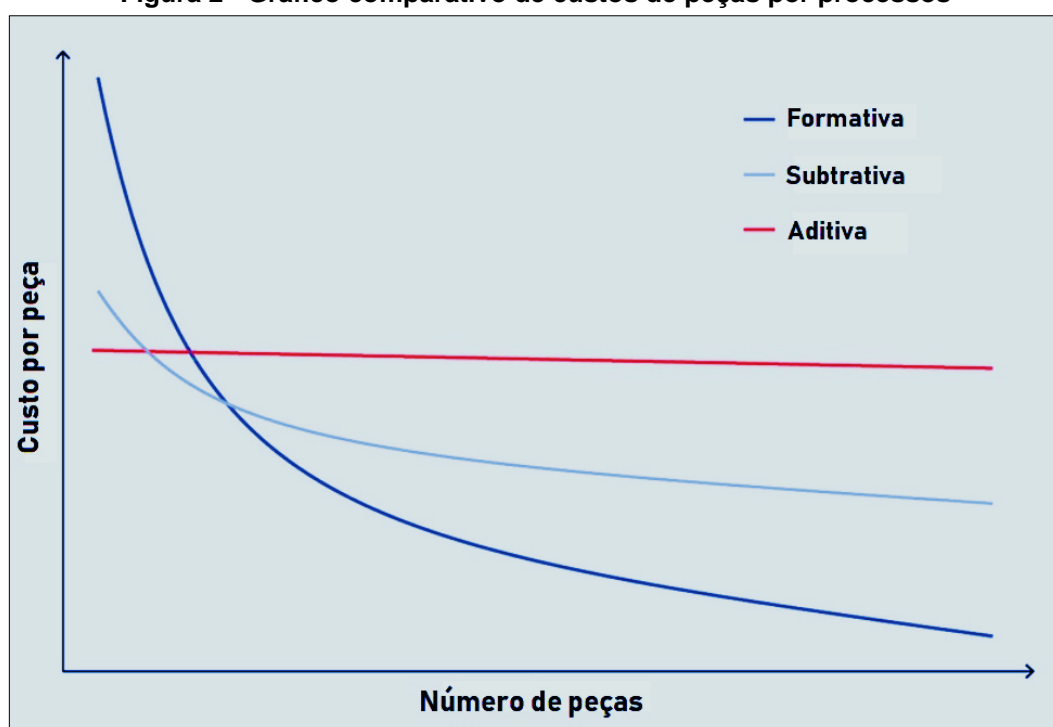
Na manufatura formativa se obtém a geometria desejada da peça por meio da aplicação de esforços externos ou calor, pode-se citar como exemplos: forjamento, laminação, extrusão, etc. É indicado para peças com alto volume de produção, uma vez que, são exigidos grandes investimentos iniciais em ferramental (moldes). Esse ferramental além do seu alto custo e complexidade demanda tempo para o seu projeto e confecção, o que aumenta os prazos. (REDWOOD, 2017)

Na manufatura subtrativa a geometria desejada da peça é obtida por meio da remoção de material tais como nos processos de fresamento e torneamento. É capaz de produzir peças com alta precisão e acabamento superficial, sendo que a maioria dos materiais podem de alguma forma serem usinados. Entretanto, para fabricação das peças existe um grande desperdício de material. (REDWOOD, 2017)

De acordo com Ford (2016) o processo de manufatura aditiva é definido como “processo de união de materiais para criação de objetos a partir de dados do modelo em 3D geralmente camada após camada, em oposição aos métodos de manufatura subtrativa” segundo a ASTM. Redwood (2017) descreve que as peças podem ser fabricadas sem limitação de geometria, não necessitam de ferramental, o que reduz os prazos de desenvolvimento. O referido autor aponta que as peças produzidas, no entanto, possuem geralmente propriedades mecânicas inferiores aos outros dois processos.

O custo é um fator importante para definição do método de fabricação das peças. Este está atrelado ao número de peças a serem produzidos, como pode ser visto na figura 2. Para pequenas quantidades de peças, por exemplo, a melhor alternativa é a manufatura aditiva, já para grandes quantidades a melhor opção é manufatura formativa.

Figura 2 - Gráfico comparativo de custos de peças por processos



Fonte: REDWOOD,2017

3 MANUFATURA ADITIVA

Durante muito tempo o termo prototipagem rápida era designado para descrever o processo produtivo direto por meio de desenho em software computacional. Entretanto, recentes desenvolvimentos nessa área, relacionados principalmente a questões de qualidade, possibilitam inclusive a fabricação de peças como produto final. Devido a isso, percebeu-se que a denominação prototipagem rápida não atendia de forma correta a grande variedade de processos e aplicações atreladas a essa tecnologia. (GIBSON, 2015)

Diante desse fato, a ASTM resolveu adotar a terminologia Manufatura Aditiva (“*Additive Manufacturing*” em inglês) para ser referir a esse tipo de processo a partir de 2009, por meio do comitê F42. Todavia, como leva tempo até que novos termos sejam assimilados pela indústria vários termos ainda estão em uso como prototipagem rápida e impressão 3D. (GEBHARDT, 2011)

Tendo-se explicitado a terminologia pode-se detalhar o seu princípio, que é a fabricação da peça elaborada em software CAD de forma direta, ou seja, sem a necessidade um processo produtivo como acontece com os produtos fabricados pelas técnicas tradicionais. Neste processo cada camada é uma seção transversal de pequena espessura baseada no desenho em CAD. Como a espessura da camada possui uma espessura finita o objeto criado, pode-se assim dizer que é uma aproximação da peça desenvolvida. Ao se diminuir a espessura da camada, mais o objeto criado se aproxima do projeto concebido. (GIBSON, 2015)

Segundo Gorni (2013) a abordagem baseada na adição camada por camada evita desperdício de material inerentes aos processos usuais de manufatura que geralmente são baseados na remoção de material a partir de uma peça semiacabada, o que dispensa também a adoção de moldes, ferramentas e periféricos. No período de três décadas de desenvolvimento comercial, de acordo com Gibson (2015), aconteceu enorme evolução nos seguintes aspectos: precisão, propriedades mecânicas, variedade de aplicações, redução de custos dos equipamentos e tipos de peças produzidas.

Apesar de todos os processos de manufatura aditiva partilharem do mesmo princípio (deposição de camadas), existem diferenças entre os materiais utilizados, criação de camadas e união entre as mesmas. Essas diferenças serão determinantes

na precisão dimensional e propriedades mecânicas da peça final. Também, serão determinadas por fatores com velocidade de fabricação, necessidade de acabamento posterior, tamanho do equipamento e custo total de fabricação. (GIBSON, 2015)

Atualmente existem no mercado vários tipos de equipamentos, desde impressoras domésticas até as profissionais, conforme podem ser vistos na figura 3. Estes equipamentos possuem capacidade para produção de peças com design complexo, coloridas, fabricadas em operação única, com uma variedade enorme de materiais que vão desde resinas plásticas a ligas metálicas. (SANT'ANNA, 2016)

Figura 3 - À esquerda impressora desktop Mojo, à direita impressora profissional Fortus 380mc



Fonte: Stratasys

3.1 O processo de manufatura aditiva

O processo de fabricação através da manufatura aditiva envolve várias etapas que são comuns a todos os processos. Cada tecnologia possui suas particularidades, entretanto, de um modo geral pode-se dividir o processo em cinco etapas, que são: modelamento em CAD, conversão para STL e manipulação, construção, remoção e pós-processamento. (REDWOOD, 2017)

3.1.1 Modelamento em CAD

A modelagem em 3D é a etapa inicial para qualquer um dos processos de MA. A utilização de modeladores geométricos comumente conhecidos como sistemas CAD, é uma das maneiras para a sua obtenção. Este modelamento viabiliza a construção de modelos volumétricos ou de superfície fechada que deverão ser interpretados como um objeto único e consistente. (VOLPATO, 2006)

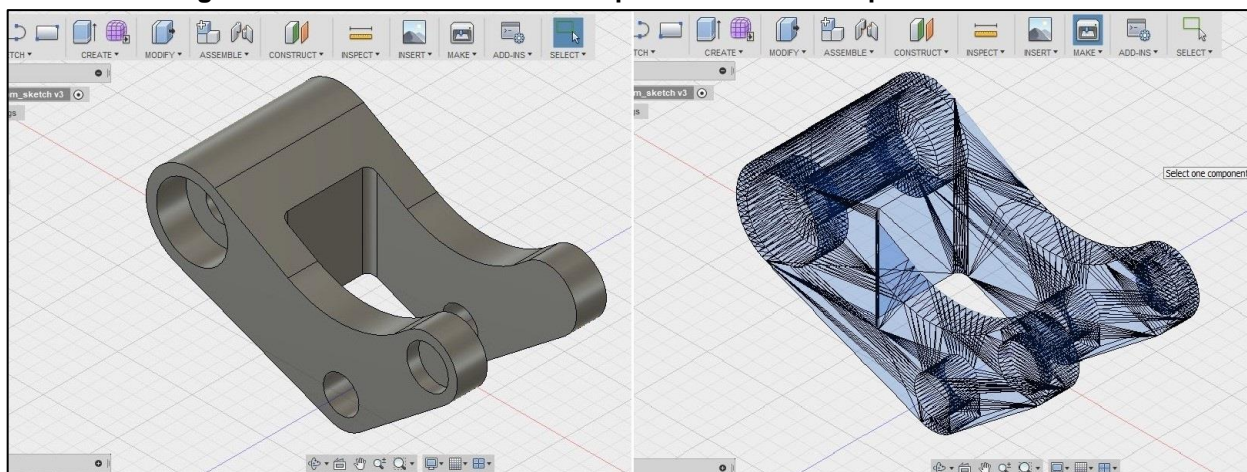
Os modeladores sólidos, em geral, garantem a consistência do objeto criado, entretanto com os modeladores de superfície existe a necessidade de maior atenção. As superfícies que definem o modelo precisam apresentar interseções bem definidas, evitando assim quebras ou falhas nas conexões e superposições das superfícies. A peça que foi modelada em superfície deverá ser totalmente fechada, formando um volume único o qual comporá a peça. (VOLPATO, 2006)

Outra maneira de obter o modelo em 3D é através da engenharia reversa, por meio de scanners que copiam a geometria do objeto físico gerando dados que são tratados e convertidos em superfícies. Este método é aplicável, principalmente para produtos antigos que já estão fora de linha, quando não existe a disponibilidade do arquivo em CAD. (VOLPATO, 2006)

3.1.2 Conversão para STL e manipulação

A próxima etapa é a conversão do arquivo em CAD para o formato STL, a Figura 4 mostra a conversão de um modelo em CAD para STL. Este formato representa o modelo tridimensional por meio de pequenos triângulos irregulares que formam uma malha que recobre por completo o objeto. O formato STL se tornou um padrão nos equipamentos de manufatura aditiva e está presente na quase totalidade dos softwares CAD atuais. (VOLPATO, 2006)

Figura 4 - Modelo em 3D CAD à esquerda e convertido para STL à direita



Fonte: Os autores, 2018.

O processo de conversão é realizado de maneira automática na maior parte dos softwares, porém existe a possibilidade de ocorrerem erros durante este processo. Atualmente, já existem no mercado softwares específicos para resolução desse tipo de problema. (VOLPATO, 2006)

Após a geração do arquivo STL, este é importado para o programa de fatiamento. Existem no mercado desde fatiadores gratuitos como o Slic3r e o Ultimaker Cura, como também versão pagas como o SIMPLIFY3D®. Redwood (2017) relata que o software de fatiamento permite que o usuário defina parâmetros de construção como, por exemplo: necessidade e localização de suporte, altura de camada e orientação da peça, etc.

O arquivo gerado pelo software de fatiamento está no formato G-Code, sendo este uma linguagem de programação de controle numérico. Inseridos no arquivo G-code existem instruções de movimentação geométrica da cabeça de impressão nos três eixos cartesianos além de outros parâmetros necessários para o funcionamento do equipamento como velocidade de impressão, temperaturas, etc. (REDWOOD, 2017)

3.1.3 Construção

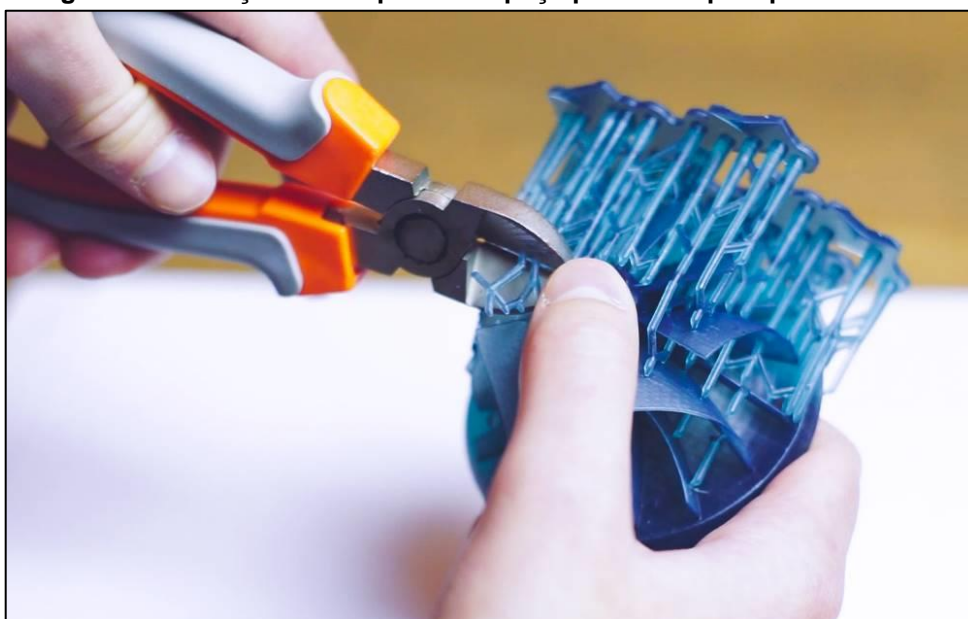
Nesta etapa as peças serão construídas pela adição de camada após camada. Em todos os equipamentos existe uma sequência de controle de camada, ajuste de

deslocamento da plataforma, deposição de material e formação de camada. Alguns equipamentos combinam a deposição de material e formação de camada simultaneamente enquanto em outros isso acontece em etapas diferentes. Como este é um processo automático, não existe a necessidade supervisão por parte do usuário sendo somente necessária sua intervenção quando acontece algum problema no equipamento como falta de material, falta de energia, por exemplo. (GIBSON, 2015)

3.1.4 Remoção

Finalizada a etapa de construção a peça pode ser retirada do interior do equipamento. Nesta etapa, de acordo com Gibson (2015) poderá ser exigido a necessidade de remoção de excesso de material de construção e/ou suportes que foram introduzidos durante a etapa de construção. Também relata que todos os processos exigem algum procedimento nesta fase diferenciando-se somente no seu nível de exigência. Volpato (2006) descreve que os suportes podem ser removidos manualmente por remoção mecânica ou por meio de quebra de estruturas frágeis (figura 5), dissolução através de agentes corrosivos ou detergentes, ou fusão por temperatura.

Figura 5 - Remoção dos suportes de peça produzida pelo processo SLA



Fonte: Site 3Dhubs.com

3.1.5 Pós-processamento

O pós-processamento é uma etapa geralmente manual onde são realizados procedimentos de lixamento, polimento ou aplicação de revestimento. Alguns processos necessitam de infiltração/revestimento de superfície, ou processos térmicos, como mostrado na figura 6, para que as peças fabricadas adquiram a resistência mecânica necessária, como por exemplo, no processo de estereolitografia. (GIBSON, 2015)

Figura 6 - Etapa de pós-processamento em câmara UV



Fonte: Site Formlabs.com

3.2 Aplicação

As técnicas de MA podem ser divididas em duas aplicações principais: prototipagem rápida e manufatura rápida. Prototipagem rápida descreve todas as aplicações que possibilitam a construção de protótipos, modelos, amostras ou mockup's, enquanto que na manufatura rápida peças finais ou mesmo o produto são fabricados. (GEBHARDT, 2011)

A prototipagem rápida pode ser subdividida em dois tipos: modelagem conceitual e protótipos funcionais. A modelagem conceitual se aplica para verificação de um

conceito básico, serve para que se tenha uma visão tridimensional visualizando assim a sua aparência e proporções. Os protótipos funcionais são utilizados para verificação de uma ou mais funções de um produto futuro ou para tomar decisões de produção embora não possam ser destinados como peça final. (GEBHARDT, 2011)

Manufatura rápida descreve todos os processos que têm por finalidade a fabricação de produto final ou peças finais que ao serem montadas se tornam um produto. Uma peça produzida por MA é considerada produto ou peça final se apresentar todas as características e funções definidas em projeto. Caso a peça seja um molde ou ferramenta o processo é denominado “Ferramenta Direta”, caso contrário é chamado “Manufatura Direta”. (GEBHARDT, 2011)

A manufatura direta possibilita a fabricação de peças de uso final proveniente direto dos equipamentos de manufatura aditiva. Atualmente existe uma grande quantidade de materiais disponíveis para esta finalidade: plásticos, metais e cerâmicos. Não existe a necessidade que os materiais disponíveis apresentem as mesmas propriedades daqueles oriundos dos métodos tradicionais de manufatura, entretanto as propriedades obtidas com o material em determinado processo de manufatura devem atender os requisitos definidos em projeto. (GEBHARDT, 2011)

3.3 Vantagens

De acordo com Campbell (2011) a manufatura aditiva oferece várias vantagens em relação aos processos tradicionais que são relatadas a seguir:

- Produção de peças mais complexas que não poderiam ser fabricados por outros processos. Os processos de MA permitem aos projetistas a inserção de material somente em locais onde são necessários, podendo elaborar designs inspirados, por exemplo, em formas da natureza (corais, madeira, osso, etc.), esse tipo de estrutura ao mesmo tempo que são leves possuem elevada resistência;
- Design e fabricação digital, para todos os processos de MA a fabricação das peças têm como base os dados provenientes do arquivo STL. No processo como um todo não existe necessidade de pessoal altamente qualificado e a interação humana necessária com o equipamento é mínima;

- Devido os processos de MA utilizarem o conceito de fabricação de camada por camada, somente o material necessário para a fabricação da peça é utilizado. Isso resulta em praticamente zero desperdício. Contrasta-se com as técnicas de manufatura tradicionais as quais realizam a retirada de material, como por exemplo na usinagem onde se parte do material de base e são realizadas várias operações de desbaste para obtenção da peça final;
- O desenho em formato digital pode ser enviado para qualquer parte do mundo através da internet e fabricado (impresso) localmente onde existe a demanda do produto, ao invés do seu envio, o que acarreta perda de tempo e despesas decorrentes;
- Os produtos podem ser impressos conforme a sua demanda sem a necessidade de gastos com estoque;
- Determinado equipamento é capaz de impressão de uma grande variedade de produtos sem que exista a necessidade de substituição de ferramenta, podendo cada impressão ser customizada sem a necessidade de custos adicionais.

3.4 Desvantagens

As principais desvantagens do processo de manufatura aditiva de acordo com Volpato (2016) são descritas a seguir:

- A aplicação das peças fabricadas possui limitações tanto em relação a ainda pouca disponibilidade de materiais que podem ser utilizados como em relação às propriedades mecânicas que geralmente são anisotrópicas devido ao método de deposição camada por camada;
- A precisão dimensional e o acabamento superficial são inferiores àqueles encontrados em peças produzidas por usinagem. Devido ao seu método construtivo uma das características de superfície das peças produzidas por esses processos é o serrilhado proveniente do efeito escada em regiões inclinadas e curvas. Este efeito acaba gerando desvios de geometria em relação ao modelo gerado em CAD;
- Existe uma limitação, devido aos custos envolvidos, da quantidade de peças a serem produzidas. Geralmente é viável economicamente somente para

pequenas quantidades de peças;

- Problemas relacionados à empenamento, distorções e inchamento podem ser observados em alguns processos devido à sua natureza térmica/química, porém, estes problemas vêm sendo minimizados ao longo do tempo.

4 PROCESSOS

Cada processo de manufatura aditiva apresenta características próprias, porém todos se baseiam no mesmo princípio (adição de camadas sucessivas). Pode-se separá-los em função do estado inicial da matéria-prima em três grupos: baseados em sólidos, líquidos e pós. No quadro 1 estão mostrados os processos, o estado inicial do material, como também suas aplicações típicas. Ao longo deste capítulo será descrito o funcionamento de cada um.

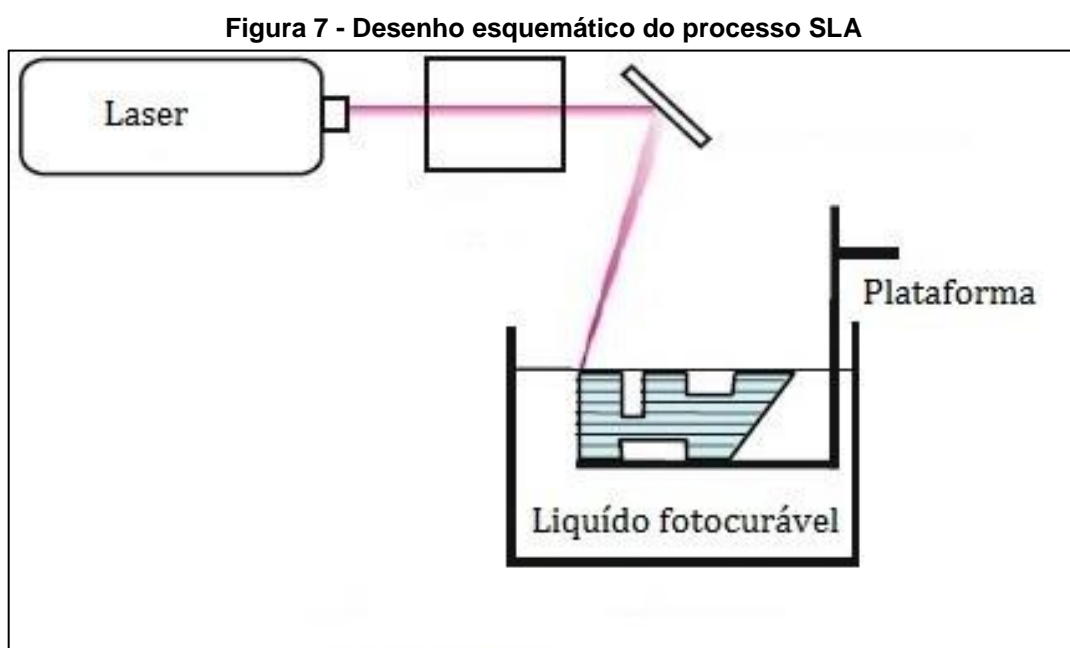
Quadro 1 - Processos de Manufatura Aditiva

Estado Inicial do Material	Processo	Técnica de Fabricação da camada	Materiais típicos	Aplicações
Líquido	Esteriolitografia - SLA	Varredura por fonte de laser	Resina curável por UV, a base de acrilatos ou epóxi	Protótipos, moldes de fundição (casting patterns), soft tool (molde para o processo de injeção)
Pó	Sinterização Seletiva à Laser - SLS	Varredura por fonte de laser	Termoplásticos, pó metálico, pó cerâmico	Protótipos, moldes de fundição (casting patterns), pré-formas de metal e cerâmica (para ser sinterizado e infiltrado).
	Fusão Seletiva à Laser - SLM	Varredura por fonte de laser	Metal	Ferramenta e peças funcionais
	Fusão por Feixe de Elétrons - EBM	Varredura por feixe de elétrons	Metal	Ferramenta e peças funcionais
	Impressão Tridimensional 3DP	Ligação de pó através de aglutinantes	Polímeros, metal, cerâmica	Protótipos, molde de fundição (casting shells), ferramenta
Sólido	Manufatura de Objetos em Lâminas - LOM	Alimentação e ligação de folhas finas com adesivos	Papel, plástico, metal	Protótipos, molde de fundição (casting models)
	Modelagem por Deposição de Material Fundido - FDM	Extrusão contínua e deposição de material fundido	Termoplásticos	Protótipos, molde de fundição (casting patterns)

Fonte: GUO, 2013 (adaptado)

4.1 Estereolitografia (SLA -Laser-Stereolithography)

O processo de estereolitografia foi o primeiro processo de manufatura aditiva a ser desenvolvido. As peças são fabricadas pela polimerização de um líquido foto curável. Uma fonte de laser UV, direcionada de acordo com o contorno de cada camada, transforma o líquido em sólido, conforme mostrado na figura 7. (VOLPATO, 2006)



Fonte: GIBSON, 2015 (adaptado).

O equipamento de estereolitografia possui uma câmara preenchida com o líquido foto curável e uma fonte de laser montada na sua parte superior, a qual é movimentada ao longo dos eixos X e Y por meio de um conjunto ótico. Na câmara de construção há uma plataforma móvel que se desloca ao longo do eixo Y conforme a espessura da camada subjacente. Exposta ao feixe de laser a camada se polimeriza, mudando o seu estado de líquido para sólido e gerando uma camada. O procedimento é repetido para camada um nível superior, que se adere a camada anterior, repetindo-se este processo até a finalização da peça. (VOLPATO, 2006)

Após a sua construção as peças são limpas e levadas para uma câmara de raios UV para a pós-cura. As peças produzidas por esse processo necessitam de suporte, por isso, a sua orientação no momento da construção deve ser cuidadosamente escolhida. (GEBHARDT, 2011)

Os materiais atualmente empregados neste processo são resinas à base de acrilatos (acrílica) e epóxi. As resinas com base epóxi são as que possuem maior aplicação atualmente devido a sua menor contração e melhores propriedades mecânicas e térmicas. (VOLPATO, 2006)

Suas principais vantagens em relação aos outros processos são a qualidade dimensional e superficial em combinação com propriedades mecânicas moderadas. Essas propriedades levam à sua utilização como modelos para testes de montagem (*part as form, fit*) e em menor escala como protótipos funcionais. (GIBSON, 2015)

Podemos citar como suas deficiências: necessidade de suporte em algumas regiões não conectadas, necessidade de pós-processamento para retirada dos suportes, pós-cura para finalização do processo de polimerização e assegurar resistência mecânica, pouca disponibilidade de materiais e toxicidade da resina utilizada. (VOLPATO, 2006)

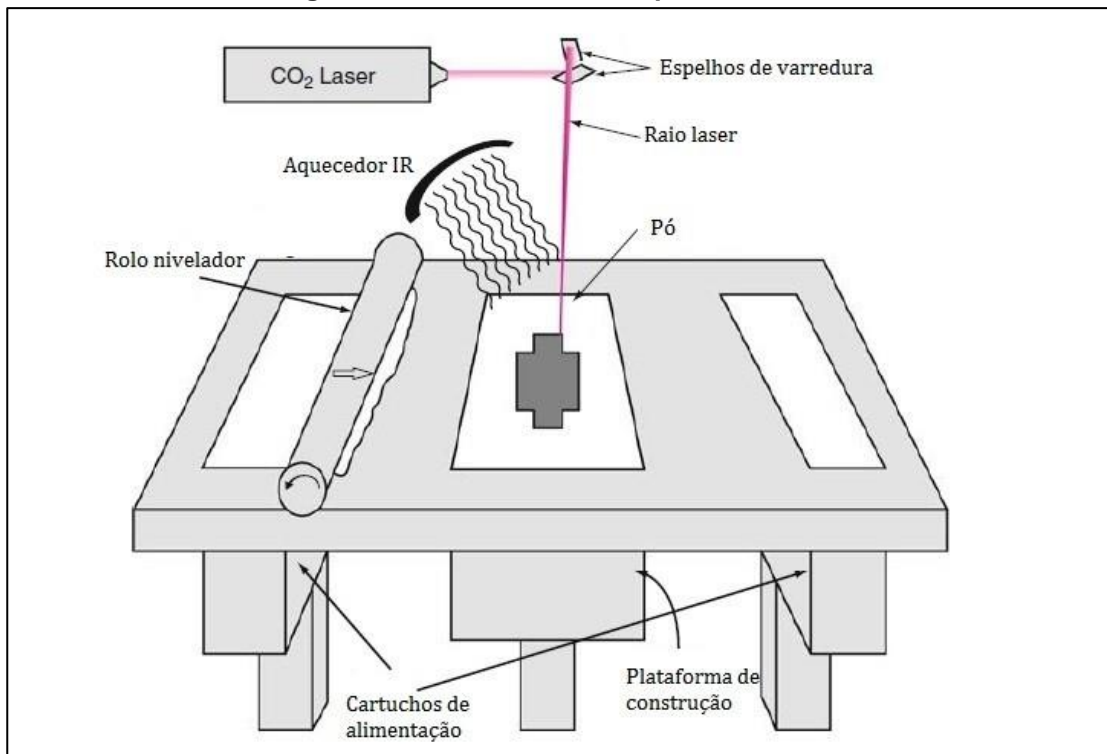
4.2 Sinterização Seletiva à Laser (SLS – Selected Laser Sintering)

O processo SLS, mostrado na figura 8, sinteriza o material em forma de pó através de um laser CO₂ de média potência (25 a 100W). O pó é espalhado e nivelado por meio de um rolo nivelador ao redor da plataforma de construção. Apesar de se utilizar o termo sinterização na denominação deste processo, muitas vezes o material é levado ao ponto de fusão. (VOLPATO, 2006)

O processo de construção acontece no interior de uma câmara fechada preenchida com nitrogênio, com isso evita-se a oxidação. Aquecedores por infravermelho estão espalhados pela área de construção para manter uma temperatura elevada em seu entorno, como também sobre os cartuchos de alimentação para pré-aquecer o pó. (GIBSON, 2015)

A fonte de laser é direcionada sobre o material em pó que é sinterizado, o material residual em volta permanece solto servindo como base para peça, dessa forma, dispensa a necessidade de suporte. Quando a construção de uma camada é finalizada a plataforma desce um nível, o que correspondente a espessura de uma camada e o rolo espalha o pó pela plataforma. O laser, então sinteriza uma próxima camada, este processo se repete até que a peça esteja formada. (GIBSON, 2015)

Figura 8 - Funcionamento do processo SLS



Fonte: GIBSON, 2015 (adaptado).

O pó não sinterizado é removido após o término do processo por meio de escova, ar comprimido ou aspirador de pó. Este pó pode ser utilizado até um certo limite, pois o mesmo se degrada com o reuso ao longo do tempo. (VOLPATO, 2006)

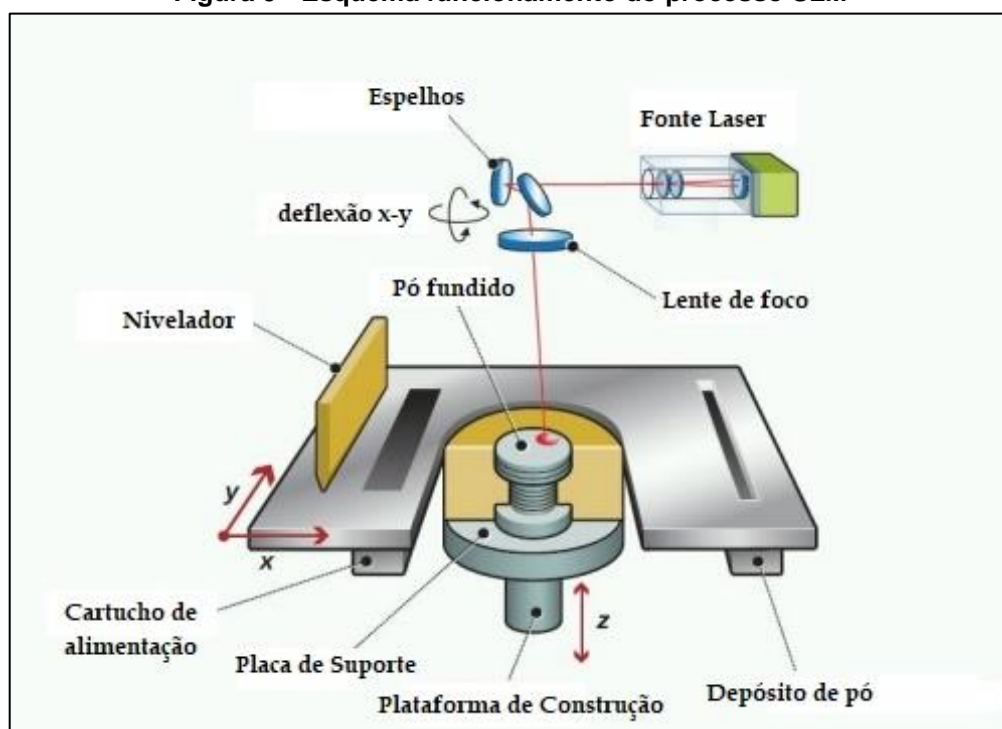
Neste processo os materiais utilizados são diversos: polímeros, metais, cerâmicos. As peças em plástico fabricadas por esse processo geralmente são porosas e precisam passar por um processo de infiltração com um material ligante, caso necessário podem ser envernizadas e recebem tratamento superficial. Peças fabricadas em plástico apresentam propriedades mecânicas semelhantes as encontradas em peças fabricadas em injeção, podem ser utilizadas como protótipo ou peça final. (GEBHARDT, 2011)

A possibilidade de utilização de vários materiais em um mesmo equipamento, necessidade de pouco pós-processamento (a depender do material) e possibilidade de fabricação de várias peças ao mesmo tempo são algumas das suas vantagens. Alto custo do equipamento, consumo elevado de energia e acabamento superficial não muito elevado devido ao tamanho das partículas são algumas das suas limitações. (VOLPATO, 2006)

4.3 Fusão Seletiva à Laser (SLM – Selective Laser Melting)

De acordo com Gebhardt (2011) o processo SLM (fusão seletiva à laser), mostrado na figura 9, é muito similar ao processo SLS, porém as peças produzidas por esse processo apresentam densidade superior a 99%. A fonte de laser funde completamente o pó o que resulta em uma peça completamente densa após a solidificação. A depender do fabricante esta tecnologia recebe diferentes denominações como Laser Cusing e Direct Metal Laser Sintering, conforme descrito por Gibson (2015).

Figura 9 - Esquema funcionamento do processo SLM



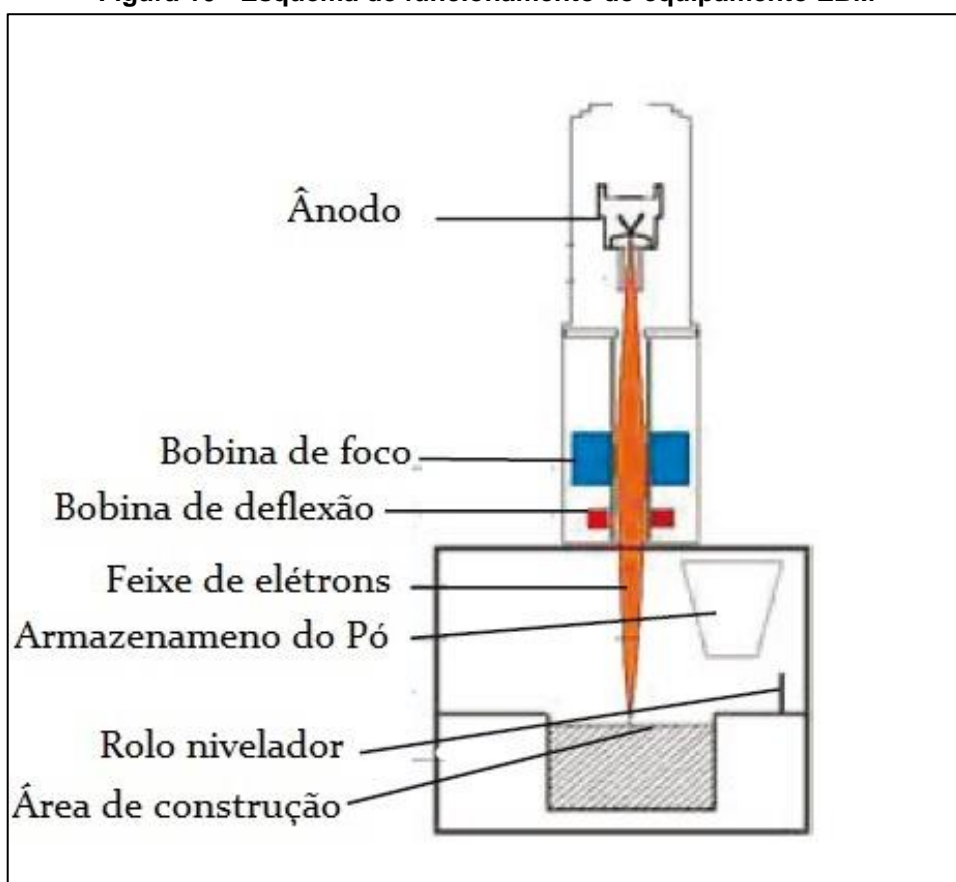
Fonte: Site stampa3D-forum.it

O seu princípio de funcionamento se assemelha ao SLS, porém utiliza *fiber laser* ao invés do laser CO₂. Além disso a sua câmara é preenchida com gás inerte o que previne a oxidação de materiais como o titânio. Pode-se citar o aço comum ao carbono, aço inoxidável, CoCr, titânio, alumínio além de outras ligas proprietárias, como os materiais que esse processo utiliza. A peças fabricadas por esse processo se destinam ao produto final ou seus componentes. (GEBHARDT, 2011)

4.4 Fusão por Feixe de Elétrons (EBM - Electron Beam Melting)

No processo EBM, mostrado na figura 10, um feixe de elétrons de alta potência promove a fusão de pó metálico, segundo Gibson (2015). A penetração do feixe de elétrons no pó metálico é profunda e sua configuração permite uma velocidade de varredura alta o que torna o processo rápido, para tanto existe a necessidade da utilização de uma câmara de vácuo, conforme descrito por Gebhardt (2011).

Figura 10 - Esquema de funcionamento do equipamento EBM



Fonte: GEBHARDT, 2011 (adaptado)

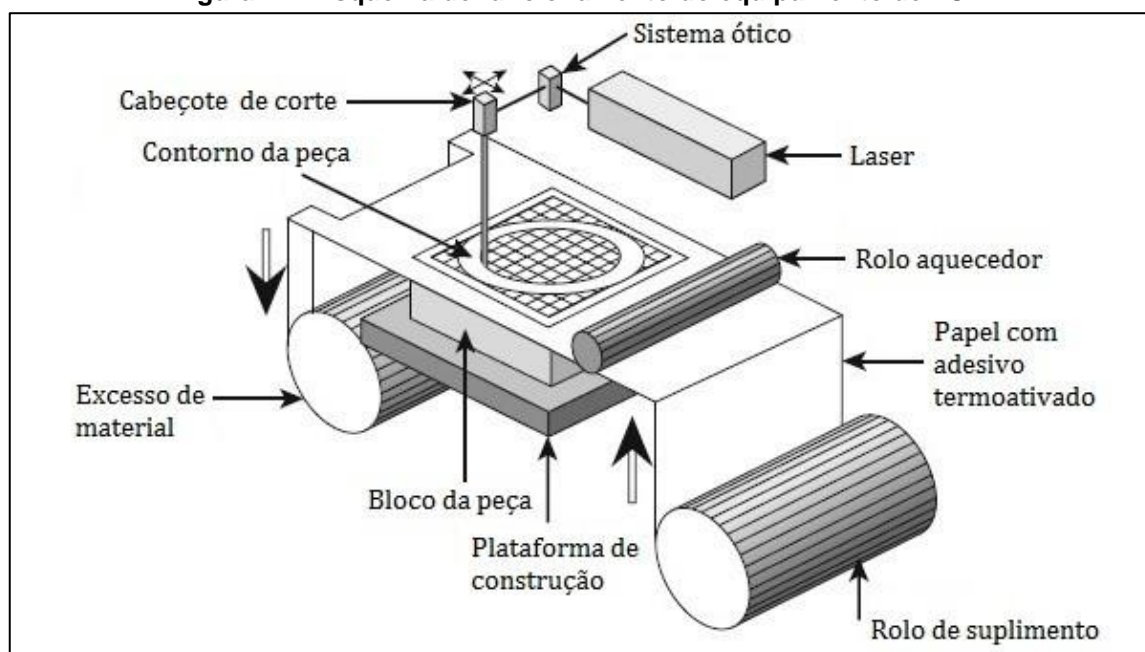
A energia presente no feixe de elétrons é mais difusa em consequência a área de pó fundida é maior, assim como a zona afetada pelo calor. Por esse motivo a resolução e a qualidade superficial das peças produzidas por esse processo são melhores do que as produzidas pelo processo SLM. (GIBSON, 2015)

Segundo a Arcam AB (2017), fabricante de equipamentos com esta tecnologia, os materiais atualmente utilizados incluem ligas de titânio, Cobalto-Cromo (ASTM F75) e Inconel 718.

4.5 Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM - Laminated Object Manufacturing)

No processo LOM (manufatura de objetos em lâminas) se utiliza de papel bobinado com aproximadamente 0,2mm de espessura revestido com adesivo termicamente ativado para fabricação das peças. O equipamento, mostrado na figura 11, é composto por uma mesa de construção que pode se mover na direção Z, um mecanismo para desenrolar o papel posicioná-lo na mesa e enrolar o papel restante no lado oposto. (GEBHARDT, 2011)

Figura 11 - Esquema de funcionamento do equipamento de LOM



Fonte: GIBSON, 2015 (adaptado)

Como relatado por Gebhardt (2011) para fabricação da peça, o papel é posicionado na mesa de construção e fixado por um rolo aquecido, ativando o adesivo da parte inferior do papel e unindo-o ao anterior. De acordo com Volpato (2006) o contorno é cortado por um feixe de laser, o qual é direcionado por um conjunto de espelhos controlados por um sistema de deslocamento em X-Y, que ajusta a profundidade de corte em função da espessura do papel.

O restante de papel é então enrolado na bobina do lado oposto. O material que permanece no interior da peça serve como apoio sendo cortado em pequenos quadrados para facilitar a remoção posterior da peça. Terminado uma camada a

plataforma desce um nível (movimentação em Z) e uma nova seção de material avança. O processo é repetido até a finalização da peça. Ao final obtém-se um bloco retangular com a peça no seu interior que necessita ser retirada manualmente. Posteriores etapas de acabamento superficial tais como lixamento, pintura e polimento podem ser necessárias. (VOLPATO, 2006)

Há a necessidade de aplicação de resina epóxi, uretano ou silicone sobre a superfície do papel para selagem do papel e assim evitar a absorção de umidade. O material mais comumente utilizado é o papel tipo Kraft com adesivo termicamente ativado à base de polietileno, porém neste processo também estão disponíveis lâminas de vários materiais tais como plástico, cerâmica e folhas metálicas. (VOLPATO, 2006)

A possibilidade de fabricação de peças grandes rapidamente, os custos relativamente baixos do material para fabricação e equipamento são algumas das suas vantagens. O processo possui limitações tais como: a maioria das peças necessita de revestimento para prevenir absorção de umidade ou desgaste excessivo, o controle dimensional no eixo Z é difícil devido ao inchaço do material ou inconsistência na sua espessura, as propriedades mecânicas e térmicas não são homogêneas. (GIBSON, 2015)

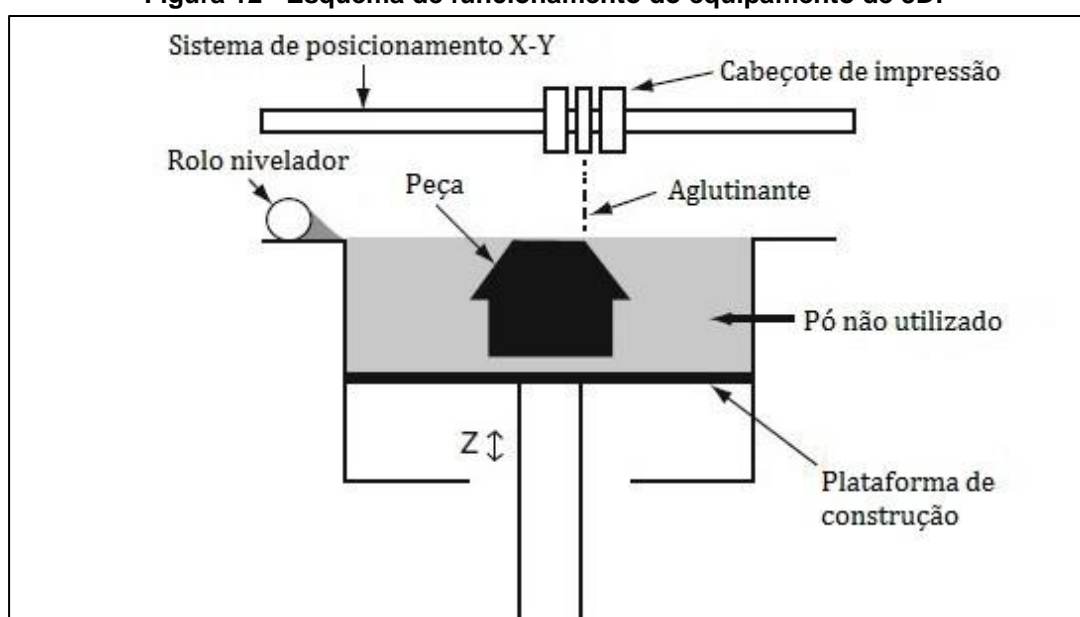
4.6 Impressão Tridimensional (3DP)

A ligação camada por camada de partículas de pó por meio de um aglutinante é chamado “Three Dimensional Printing - 3DP” (Impressão Tridimensional). Este processo foi desenvolvido em 1990 pelo MIT e licenciado para várias companhias. Atualmente existem equipamentos que processam materiais plásticos, metálicos ou cerâmicos. Para a maioria deles existe a necessidade de infiltração pós fabricação, principalmente em metais. Para obtenção de propriedades mecânicas adequadas as peças passam por tratamento térmico e sinterização. (GEBHARDT, 2011)

O equipamento possui uma câmara de construção que contém o pó, esta câmara está montada sobre um pistão móvel e um rolo para nivelamento conforme mostra a figura 12. Na parte superior do equipamento está montada uma cabeça de impressão, semelhante as utilizadas nas impressoras domésticas. (GEBHARDT, 2011)

A cabeça movimenta-se pela área de construção, conforme o contorno da peça, depositando o material ligante no pó. As partículas da camada atingidas pelo ligante são unidas enquanto que o pó em volta serve como suporte para a peça. Após a solidificação de uma camada, o pistão se desloca o equivalente a espessura de uma camada, o espaço vazio é recoberto com uma nova camada proveniente da câmara de alimentação e espalhado pelo rolo nivelador. Finalizado o processo a peça pode ser retirada do equipamento e o excesso de material é retirado por escova ou jato de ar. (GEBHARDT, 2011)

Figura 12 - Esquema de funcionamento do equipamento de 3DP



Fonte: GIBSON, 2015 (adaptado)

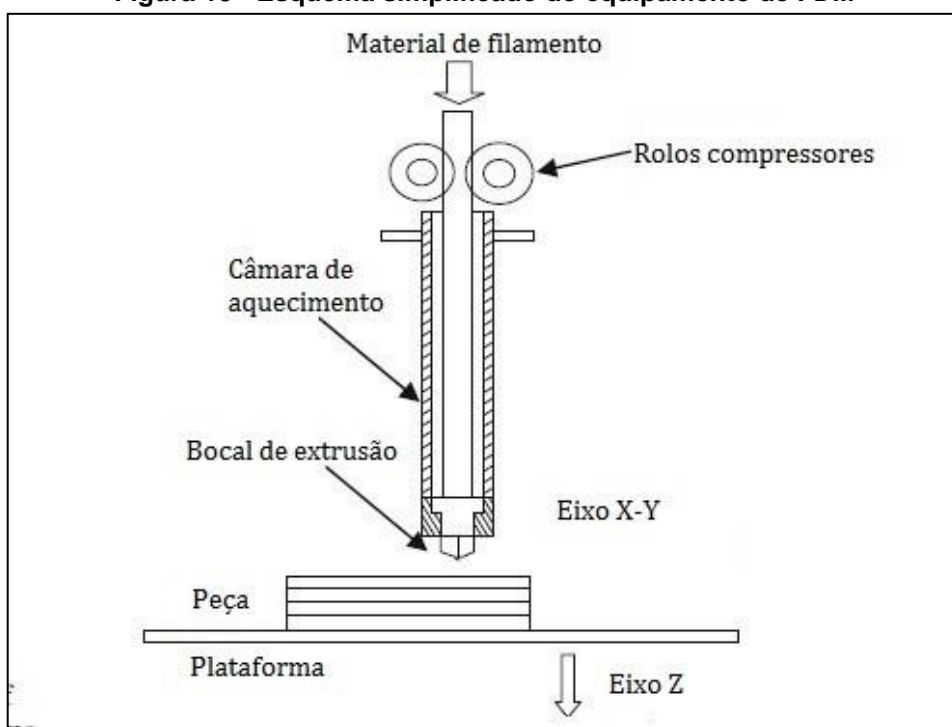
Os componentes fabricados por esse processo são geralmente modelos conceituais, podendo ser monocromáticos ou coloridos. A qualidade superficial geralmente é inferior aos obtidos pelo processo de estereolitografia mas pode ser melhorada através de pós processamento. (GEBHARDT, 2011)

A não utilização de fonte laser, não precisar de suporte, alta velocidade de fabricação, possibilidade de reutilização do pó e fabricação de peças coloridas são suas vantagens. Pouca diversidade de material, necessidade de pós processamento para melhoria da resistência mecânica e limitação quanto as finalidades das peças são consideradas como desvantagens desse processo. (VOLPATO, 2006)

4.7 Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM - Fused Deposition Modeling)

No processo FDM, esquematizado na figura 13, uma câmara de aquecimento é utilizada para liquefazer um termoplástico que alimenta o sistema por meio de um filamento. O filamento é forçado a adentrar no interior da câmara de aquecimento por um conjunto mecânico que gera a pressão de extrusão. (GIBSON, 2015)

Figura 13 - Esquema simplificado do equipamento de FDM



Fonte: GIBSON, 2015 (adaptado).

O filamento é um material pré-fabricado enrolado que é armazenado no equipamento. Este alimenta continuamente a cabeça extrusora onde é parcialmente fundido por um sistema de aquecimento elétrico e extrudado através de um bocal. Normalmente o diâmetro do fio que sai do bocal vai de 0,1mm até 0,25mm. A plataforma onde é depositado o fio é móvel e o seu movimento (eixo Z) define a espessura da camada. Após a adição da primeira camada, esta se solidifica através de troca de calor com o ambiente, a plataforma então se move e a próxima camada é depositada, este processo é repetido até a conclusão da peça. (GEBHARDT, 2011)

As peças fabricadas, a depender da geometria e disposição na plataforma de impressão, podem necessitar de suporte geralmente feito por um segundo bocal de

um material com baixa resistência que pode ser destacável após a sua construção. (GEBHARDT, 2011)

Há vários materiais plásticos disponíveis para este tipo de processo como o ABS, PLA, PC-ABS, PC-ISO, ULTEM 9085 e PPSF. O ULTEM 9085 possui níveis favoráveis de FST (chama, fumaça e toxicidade) o que o torna adequado para aplicações na área aeronáutica, marinha e automotiva, além de possuir excelentes propriedades mecânicas, térmicas e químicas. Se a aplicação necessita de um material com melhores valores de deflexão térmica então a opção é o PPSF que possui uma deflexão térmica de 264 psi a 189°C. (GEBHARDT, 2011; GIBSON, 2015; STRATASYS, 2017).

As peças fabricadas por esse processo apresentam propriedades mecânicas semelhantes a encontradas em peças injetadas, entretanto possuem comportamento anisotrópico que pode ser reduzido por ajustes dos parâmetros construtivos. Pode ser utilizado para fabricação de modelos conceito, protótipos funcionais ou manufatura direta. (GEBHARDT, 2011)

A aparência das peças mostra texturas de superfície típicas dos processos por extrusão e conforme a espessura da camada e a orientação da peça, ficam mais ou menos visíveis. O pós-processamento requer a remoção dos suportes que pode ser realizado manualmente ou por intermédio de dispositivo específico. (GEBHARDT, 2011)

As vantagens desse processo são: não há necessidade de pós-cura, não utiliza laser, pode ser utilizado em ambiente de escritório. Suas desvantagens são: precisão dimensional não é alta, necessidade de suporte, pós-processamento para retirada dos suportes e baixa velocidade de construção. (VOLPATO, 2006)

5 MANUFATURA ADITIVA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

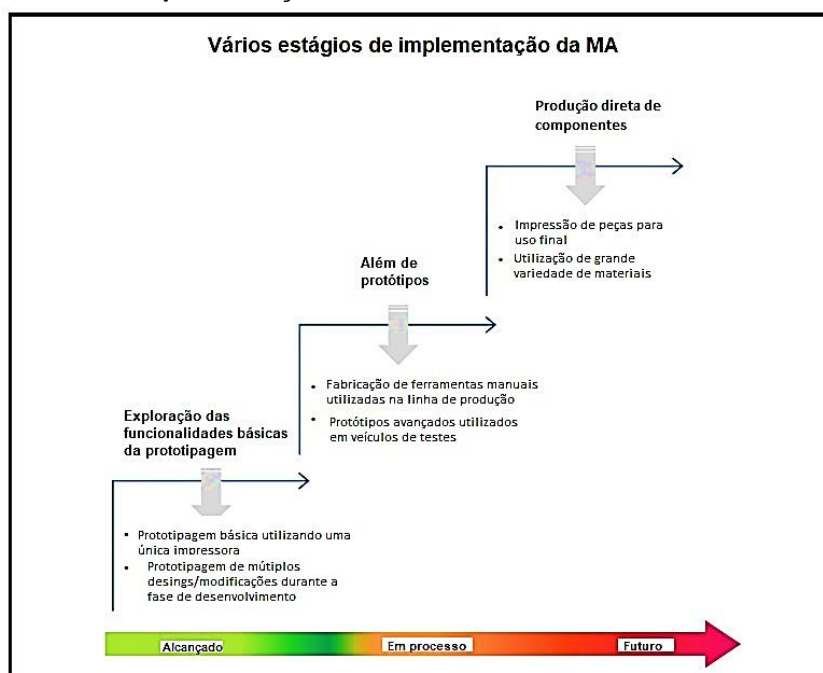
Ao longo deste capítulo, os pontos principais da utilização da manufatura aditiva na indústria automotiva e suas tendências foram abordados.

5.1 CONTEXTO ATUAL

Melhorias expressivas nos processos de manufatura aditiva, nas últimas décadas tem transformado como os produtos são projetados, desenvolvidos, produzidos e distribuídos. Isso tem possibilitado o desenvolvimento de produtos com novos designs, diminuição de massa, diminuição do tempo de desenvolvimento e menores custos. (GIFFI, 2014)

No início da implantação das técnicas de manufatura aditiva pela indústria automobilística sua aplicação era quase que restrita a produção de protótipos. Nos últimos anos embora as impressoras 3D ainda sejam utilizadas para esta finalidade, os fabricantes têm avançado para os próximos estágios de implementação conforme pode ser visualizado na figura 14. (BARDHAN, 2015)

Figura 14 - Fases de implementação da Manufatura Aditiva na indústria automobilística



Fonte: BARDHAN, 2015 (adaptado).

Os primeiros passos para aplicações com estes novos fins já começaram a aparecer. A fabricação de protótipos, que viabilizem ensaios com o propósito de verificar o seu funcionamento, já são utilizados por grandes fabricantes como a Ford. Uma outra utilização implantada é a manufatura de ferramentas para auxílio da produção, equipamentos e gabaritos para aumento de eficiência na linha de produção. (BARDHAN, 2015)

O volume de produção da indústria automotiva é alto, o que inviabiliza a adoção da manufatura aditiva na sua linha de produção, pelos menos atualmente, ao contrário da indústria aeronáutica. Atualmente, a maioria dos fabricantes de automóveis ainda não produzem peças com essa tecnologia para veículos produzidos em massa. Entretanto, pode ser viável para produção de algumas peças em veículos de luxo com baixo volume de produção ou para reposição de peças de veículos antigos. (GIBSON, 2015)

Pode-se citar como exemplo, a fabricante de veículos esporte de luxo, Koenigsegg (2017), que utiliza no seu modelo One: 1 um turbocompressor de geometria variável desenvolvido pela empresa e fabricado graças aos processos de manufatura aditiva devido a sua complexidade. Neste caso como o volume de produção deste modelo é baixo, e a complexidade do componente é alta, existe viabilidade econômica na utilização das técnicas de MA.

Dawson (2013) relata que esta tecnologia vem sendo utilizada pela Ford por meio do Ford's Rapid Technology Centre, localizado na Europa, no processo de desenvolvimento que compreende desde a fase inicial de concepção até o protótipo desde 1992. Como exemplo cita que a impressão 3D foi utilizada para o desenvolvimento da cabeça dos cilindros, disco de freios e eixo traseiro para testes em veículos e durante os testes iniciais do motor Escape Ecoboost 4 cilindros e do F-150 3.5L Ecoboost.

A GM utiliza das técnicas SLS (selective laser sintering) e SLA (stereolithography) durante o processo de concepção, processo de fabricação e prototipagem de cerca de 20 mil peças. A Ford, umas das primeiras a adotar esta tecnologia, possui cinco centros de prototipagem sendo três nos Estados Unidos e dois na Europa, somente em um desses centros localizado em Michigan (EUA) produz cerca de 20 mil protótipos por ano (BARDHAN, 2015)

A incorporação dos processos de MA nas linhas de montagem vem sendo

utilizado pela BMW como forma de aumentar a sua produtividade. Ferramentas manuais são produzidas com design ergonômico e utilizadas em testes e montagem, sendo 72% mais leves e reduzindo custos e tempo de projeto. (GIFFI, 2014)

Segundo informações da STRATASYS (2017), empresa fabricante de impressoras 3D, a equipe de fórmula 1 McLaren Racing utiliza dos seus produtos para fabricação de protótipos funcionais e visuais, ferramentas de produção e customização. Isso permite que a equipe aumente a sua produtividade e performance nas suas operações de design e manufatura.

5.2 Tendências Futuras

Como já citado anteriormente, as tecnologias de MA ainda não foram capazes principalmente em termos econômicos para utilização em larga escala na fabricação de peças de uso final. Tal cenário, entretanto, está prestes a mudar, os equipamentos têm sofrido melhorias relevantes, tendo como fator impulsionador a expiração de patentes. (CURRAN, 2016)

Processos de manufatura aditiva atuais trabalham com uma taxa de deposição de 30 cm³/min, pesquisadores do ORNL (Oak Ridge National Laboratory) desenvolveram um processo semelhante ao FDM que trabalha com uma taxa de deposição superior a 16000 cm³/min. Esse é só um exemplo das inovações que têm surgido nesta área. (BABU, 2015)

No entanto, os equipamentos ainda devem sofrer melhorias em três áreas para alcançarem um maior nível de aplicação: desempenho, fabricação em multi-material e produtos acabados. (CURRAN, 2016)

- Desempenho: melhoria de desempenho em relação a velocidade de impressão, resolução, confiabilidade e repetibilidade;
- Fabricação em multi-material: possibilidade de fabricação de componentes com vários materiais em peça única;
- Produtos acabados: Capacidade da fabricação de sistemas funcionais que incorporem vários módulos como sensores, eletrônica, baterias, entre outros.

Em artigo recente sobre as consequências econômicas e sociais para o ano de

2030 prevê mudanças no sistema produtivo referente a fabricação de peças de reposição. A utilização da manufatura aditiva para fabricação de componentes simplificará a logística envolvida (produção realizada localmente) e reduzirá custos uma vez que não há necessidade de manutenção de grandes estoques. (JIANG, 2017)

Prevê-se também quantidade expressiva de componentes fabricados por manufatura aditiva com multi-materiais e/ou com eletrônica embutida permitindo uma gama ampla de aplicações. Produtos que combinem os dois tipos de produção (aditiva e subtrativa ou tradicional) se tornarão comuns. Caso essas previsões se confirmem isso causará um aumento na gama de aplicações da MA assim como causará grande impacto no modo produtivo. (JIANG, 2017)

A liberdade de design oferecida pela MA permite a modificação deste em produtos e componentes. Várias peças feitas de materiais diferentes podem ser substituídas por um único componente integrado, o que reduz custos, tempo e problemas de qualidade inerentes a operações de montagens. (Ford, 2016)

Como descrito por Ford (2016) a modificação no design pode possibilitar uma relação ótima entre massa e resistência mecânica capaz de proporcionar funcionalidade com o mínimo de material utilizado. Tendo em vista que a diminuição da massa e conseqüentemente a melhoria no consumo de combustível tem sido um dos principais objetivos da indústria automobilística, essa qualidade tende a ser explorada.

Outro ponto a ser considerado diz respeito ao inventário de peças que certas organizações precisam manter para reposição. Isso além de possuir custo elevado as perspectivas sob a sua demanda posterior são incertas. A produção sob demanda utilizando as técnicas de manufatura tradicionais nem sempre é viável, porém para a MA isso não é um problema sendo o arquivo da peça em 3D enviado onde existe demanda de produção. (Ford, 2016)

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados para a elaboração dos corpos de prova, assim como a seleção dos parâmetros de impressão foram listados a seguir. Os resultados obtidos nas etapas descritas são sumarizados no capítulo seguinte.

6.1 Escolha do Processo

A disseminação das tecnologias de manufatura aditiva teve como grande impulsionador a expiração de patentes, os movimentos *open source* (código aberto) relacionados tanto ao software quanto ao hardware, e do surgimento de sites que possibilitam o compartilhamento de arquivos para impressão entre seus usuários. Devido a isso houve um aumento na quantidade de empresas que comercializam esse tipo de equipamento, como também, possibilitou que o próprio usuário com alguma noção em eletrônica e mecânica construa o seu próprio equipamento. (SANTANA, 2015)

Dentro deste contexto a tecnologia mais difundida é a FDM, presente desde versões profissionais para grandes empresas até em versão desktop para usuários domésticos. Este fato se deve ao baixo custo tanto do equipamento como do material utilizado, se comparados a outros tipos de tecnologia.

Diante do exposto e levando em consideração que a Fatec adquiriu recentemente uma impressora com este tipo de tecnologia para fins acadêmicos, o que facilitaria o tipo de estudo pretendido neste trabalho se optou por utilizar este tipo de tecnologia.

6.2 Caracterização do processo

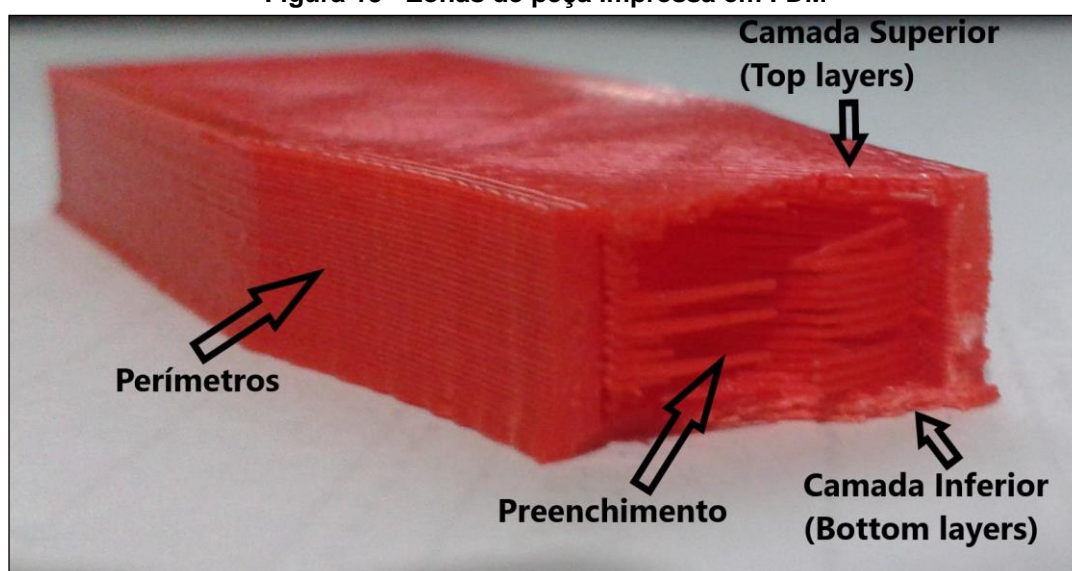
No processo de manufatura aditiva FDM, como já explicado anteriormente, um filamento termoplástico é forçado pelo cabeçote extrusor para o interior de uma câmara aquecida. O filamento semi-fundido é então depositado de maneira controlada através do bico de deposição na mesa de impressão. Os movimentos do bico são

controlados pelos comandos inseridos no código G-Code, que são interpretados pelo equipamento. (FERNANDEZ-VICENTE, 2016)

As peças fabricadas pelo processo FDM possuem quatro zonas distintas que estão mostradas na figura 15. A primeira zona que o equipamento deposita é composta por camadas sólidas que formam a área na parte de baixo da peça (camada inferior – *bottom layers*). Os contornos da peça são delimitados por camadas de filamentos ao longo do perímetro. O interior da peça é composto por preenchimento de densidade (*fill density*) e mesoestruturas ou padrão de preenchimento (*fill pattern*) que são selecionadas pelo usuário. Essas mesoestruturas geralmente são padrões geométricos e mudam conforme o software de fatiamento utilizado. Ao final é aplicada uma camada sólida que fecha o interior da peça (camada superior – *top layers*). (FERNANDEZ-VICENTE, 2016)

No software Slic3r, adotado no presente estudo, tanto a camada que delimita os contornos da peça (perímetros), como as camadas inferior e superior podem ser definidas com valor zero. Isso significa dizer que a peça não terá nem a camada de contorno como também não terá as camadas sólidas que a encerram. Os contornos da peça, nesse caso passam a ser irregulares e o padrão de preenchimento se torna visível.

Figura 15 - Zonas de peça impressa em FDM



Fonte: Os autores, 2018

A densidade de preenchimento pode ser definida como 0%, nesse caso a peça é completamente oca no seu interior. Sendo composta somente pela parte sólida

superior e inferior e o perímetro de contorno.

O padrão de preenchimento (mesoestrutura), no software Slic3r, pode ser selecionado de maneira independente para o interior da peça (fill pattern) e as camadas sólidas superior e inferior (top/bottom fill pattern). Porém, enquanto para o interior da peça estão disponíveis 8 tipos diferentes, para as camadas superior e inferior este número está limitado a 5 tipos.

A estrutura dos componentes fabricados pelo processo FDM é bastante semelhante aos compósitos fabricados reforçados com fibra, conforme descrito por Fernandez-Vicente (2016). Este diz que a estrutura da peça proveniente deste processo é composta por camadas empilhadas verticalmente de polímeros e ar. Santana (2015) relata que a maior resistência é encontrada na direção axial no filamento individual assim como nas fibras de um compósito. Porém, na região de adesão entre filamentos a resistência é menor.

De acordo com Santana (2015), existem duas formas de ligação entre as camadas:

- Dentro das camadas (*intra layer*), ou seja, a união acontece entre filamentos que pertencem a uma mesma camada;
- Adesão entre camadas (*inter layer*), neste caso a união acontece entre duas camadas sucessivas, no caso particular das primeira e última camadas esta ligação é restrita a camada superior e inferior respectivamente.

No processo FDM um filamento sólido é extrudado no estado semi-fundido e solidificado a uma temperatura abaixo de T_g (temperatura de transição vítrea) do material. A mudança de temperatura de T_f (temperatura de fusão) para T_g acontece no intervalo de 0,55 s. Apresenta como consequência a contração volumétrica do componente, desenvolvendo uma ligação fraca entre as fibras com alta porosidade da estrutura. (FERNANDEZ-VICENTE, 2016, pg 184, tradução e texto entre parênteses nossos.)

A ligação entre as fibras do componente fabricado está relacionada intimamente com as condições ambientais do local, assim como aspectos de troca térmica entre a peça e o seu entorno. O modo deposição aplicado pelo bico de extrusor será determinante nos efeitos de tensões e deflexões da peça. Defeitos como deslaminção entre camadas e rachaduras podem ser causados por condições adversas. (FERNANDEZ-VICENTE, 2016)

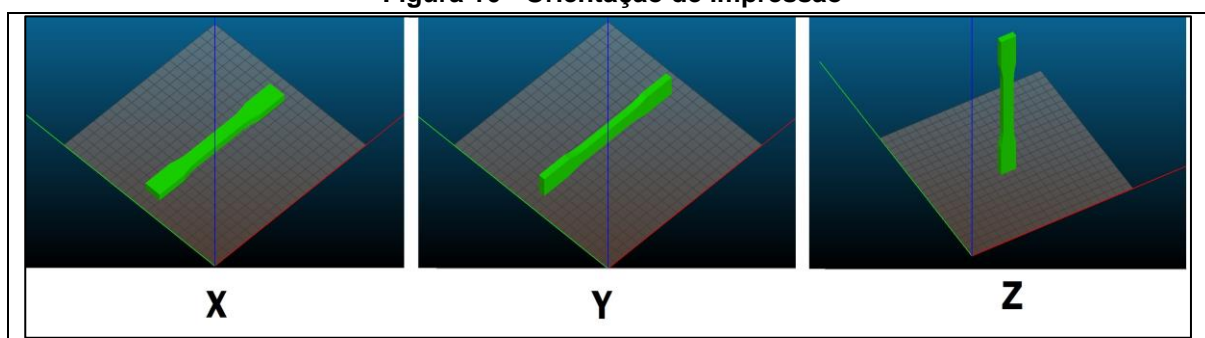
Na avaliação da peça final obtida pelo processo FDM pode-se levar em conta

aspectos técnicos (precisão dimensional, resistências à tração, flexão ou impacto, etc.) ou econômicos (tempo de fabricação, tipo e quantidade de material utilizado, etc.). Esses aspectos são influenciados por parâmetros de processo, os quais são selecionados direta ou indiretamente pelo usuário. (SANTANA, 2015)

Os principais parâmetros que afetam a qualidade e propriedades das peças, de acordo com Santana (2015) são: orientação de construção, ângulo de varredura, espessura de camada, largura de varredura, largura de contorno, número de contornos, espaçamento entre varreduras e entre contornos e varredura.

As peças fabricadas pelo processo FDM possuem como característica de processo, como relatado anteriormente, anisotropia, ou seja, as características mecânicas são diferentes a depender da orientação da tensão aplicada. Sabe-se que a orientação na vertical (eixo Z), mostrado na figura 16, possui a menor resistência. A configuração adotada neste trabalho foi a configuração na direção horizontal (eixo X)

Figura 16 - Orientação de impressão

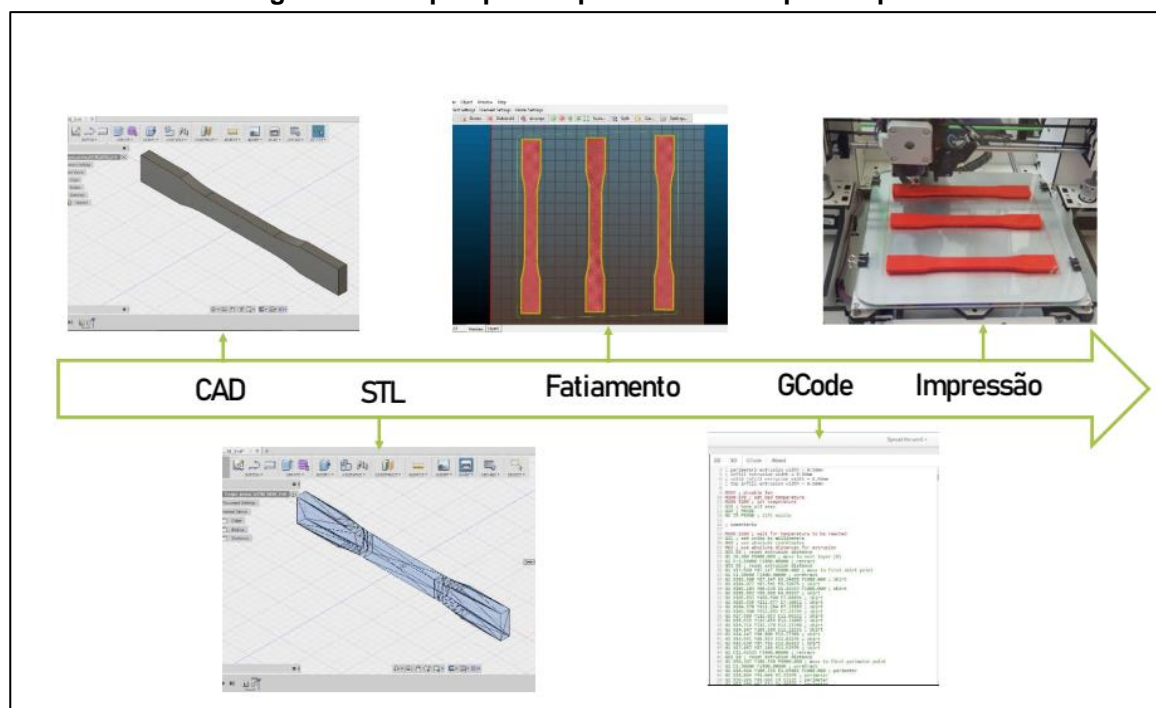


Fonte: Os autores, 2018

As seguintes etapas, mostradas na figura 17, foram realizadas para a fabricação dos corpos de prova pelo processo FDM:

- Modelamento em CAD (Software Autodesk Fusion);
- Conversão para STL (Software Autodesk Fusion);
- Fatiamento (Software Sli3cr);
- Geração de arquivo G-code (Software Sli3cr);
- Impressão dos corpos de prova (Impressora Voolt3D).

Figura 17 - Etapas para impressão dos corpos de prova



Fonte: Os autores, 2018

6.3 Modelamento em CAD

O modelamento do corpo de prova foi realizado utilizando o software Autodesk Fusion 360, a sua desenvolvedora Autodesk (2018) o define como ferramenta CAD/CAM/CAE baseada em computação em nuvem para desenvolvimento colaborativo. Os projetos desenvolvidos pelo software são salvos na nuvem podendo ser compartilhados instantaneamente com outras pessoas.

Após o modelamento do corpo de prova em 3D CAD foi realizado a conversão para o formato STL através de ferramenta disponibilizado pelo próprio Fusion 360, denominada 3D print. As configurações pré-estabelecidas no programa não foram modificadas, o grau de refinamento foi mantido como médio obtendo-se com isso um total de 124 elementos.

6.4 Fatiamento e Seleção dos Parâmetros de Impressão

O arquivo em formato STL foi fatiado em camadas por meio do software Slic3r.

O Slic3r, segundo seu site oficial, é um programa de código aberto criado em 2011 para disseminar as tecnologias de impressão 3D de forma livre através da colaboração de várias pessoas ao redor do mundo para o desenvolvimento e melhoria do programa.

Existem várias configurações disponíveis ao usuário relacionados à construção da peça tais como velocidade, espessura de camada, densidade de preenchimento, padrão de preenchimento, orientação da peça, geração de suporte, ângulo de varredura (fill angle), quantidade de camadas sólidas em volta do objeto (vertical shells) entre outros. O quadro 2 apresenta os principais parâmetros com os respectivos valores adotados na construção de todos os corpos de prova. Demais valores excluindo o padrão de preenchimento e densidade, não foram alterados sendo estes deixados com os valores padrão do software.

Quadro 2 - Parâmetros Fixos do Processo FDM

Parâmetros Fixos		Valor
Temperatura mesa impressão	1ª camada	70 °C
	Demais camadas	65 °C
Temperatura bico impressão	1ª camada	200 °C
	Demais camadas	195 °C
Espessura de camada		0,2 mm
Perímetros		3
Camadas sólida superior (Solid top layers)		3
Camadas sólida inferior (Solid bottom layers)		3
Preenchimento Sup./inf. (Infill pattern top/bottom)		retilíneo
Diâmetro filamento		1,75 mm

Fonte: Os autores, 2018

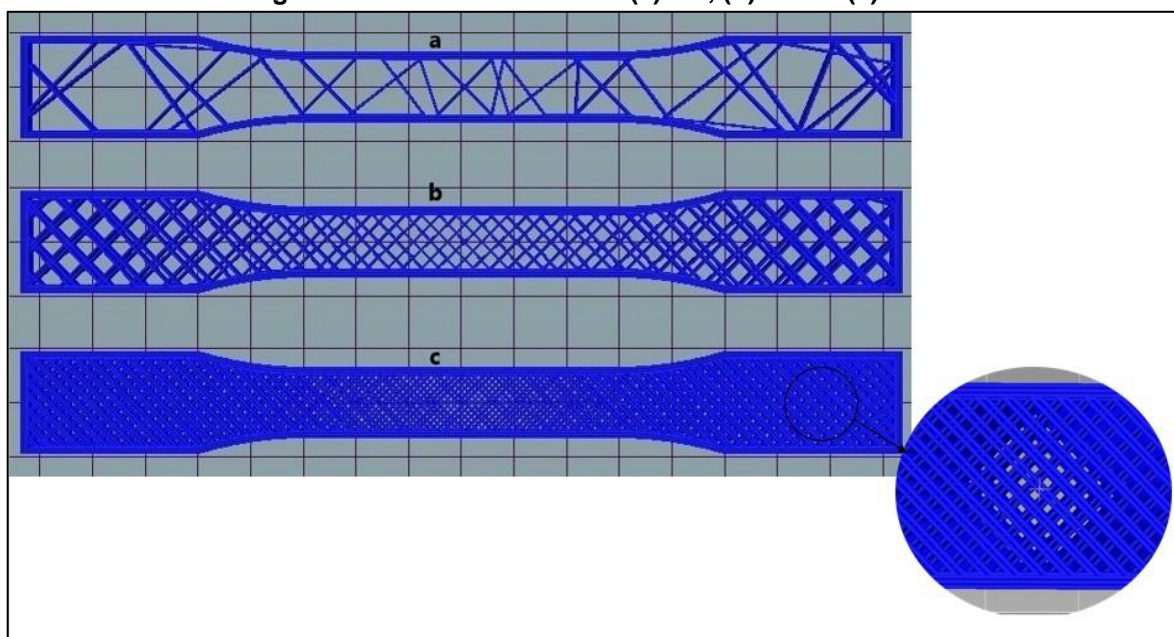
A espessura de camada define a quantidade de camadas necessárias para a construção da peça, quanto menor é a camada melhor é a resolução da peça, porém maior é o tempo de impressão. O padrão de preenchimento (mesoestrutura) está relacionado com o padrão geométrico do desenho interno da peça, o software apresenta oito configurações diferentes (*Line, Rectilinear, Concentric, Honeycomb, 3D Honeycomb, Hilbert Curve, Archimedian Chords e Octagram Spiral*).

A densidade de preenchimento, representa a quantidade de material necessário para a construção da peça, ou seja, 50% de preenchimento significa que a metade da peça será composta de material e a outra metade será de espaços vazios. Quanto maior a densidade de preenchimento maior será a quantidade de

material utilizado para o mesmo volume de peça, assim como maior será o tempo necessário para a sua impressão.

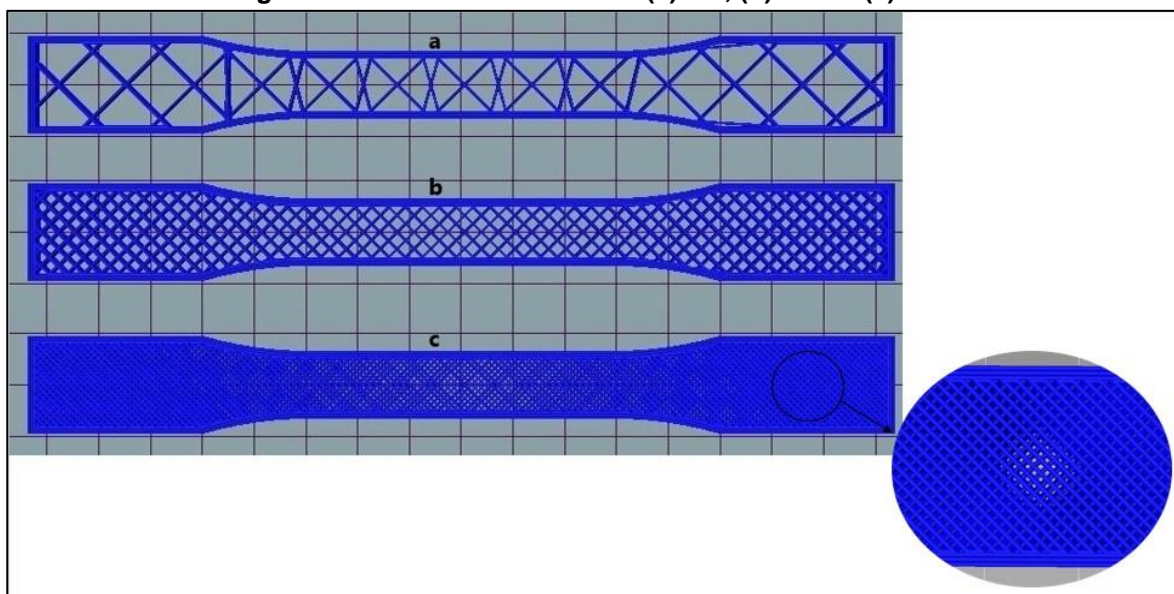
Neste trabalho optou-se por se analisar os parâmetros densidade de preenchimento e padrão de preenchimento, tendo em vista que a gama ampla de variações disponíveis tornaria inviável a avaliação proposta e fugiria do escopo deste trabalho. Os padrões de preenchimento utilizados foram o linear e retilíneo (*line* e *rectilinear*) e densidade de: 5, 20 e 50%, mostrados na figura 18 e figura 19.

Figura 18 - Padrão linear com (a) 5%, (b) 20% e (c) 50%



Fonte: Os autores, 2018

Figura 19 - Padrão retilíneo com (a) 5%, (b) 20% e (c) 50%



Fonte: Os autores, 2018

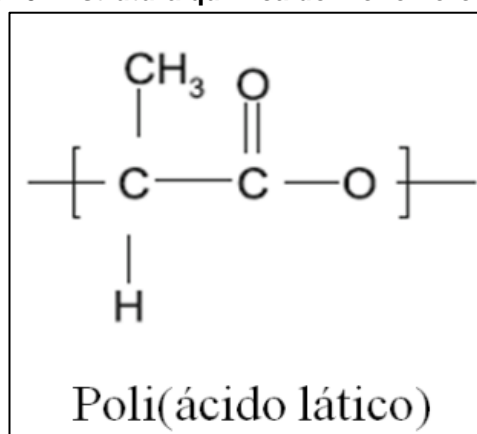
Visualiza-se nas figuras 18 e 19 que para densidade de 50% os corpos de prova se assemelham bastante, sendo as seções de maior largura as regiões onde são perceptíveis alguma diferença conforme mostrado no detalhe.

Ao final da seleção dos parâmetros de impressão foi gerado o arquivo G-Code que posteriormente foi enviado à impressora. Este formato de arquivo como já exposto anteriormente apresenta instruções para movimentação da cabeça de impressão além de outras informações para construção das peças como velocidade de impressão, temperatura de aquecimento, etc.

6.5 Material de Impressão (PLA)

O PLA (Poli Ácido Lático) foi o material selecionado para construção dos corpos de prova. É um biopolímero termoplástico que apresenta como características ser: semicristalino ou amorfo, biocompatível, biodegradável e baixo nível de toxicidade. Sua produção é realizada através da síntese química do ácido lático originado de fontes naturais e renováveis como trigo, arroz e outros. A sua estrutura química está apresentada na figura 20. (SANTANA, 2015)

Figura 20 - Estrutura química do monômero de PLA



Fonte: Coutinho, 2017

As suas propriedades mecânicas, óticas e térmicas são semelhantes as encontradas nos polímeros comerciais: PET (politereftalato de etileno), PP (polipropileno) e PS (poliestireno) (COUTINHO, 2017)

Possui algumas limitações em suas propriedades mecânicas tais como: baixa tenacidade (menos de 10% de alongamento), flexibilidade e resistência ao impacto.

Existem pesquisas para aprimoramento destas propriedades como modificação do PLA por meio de copolimerização, preparação de blendas com outros polímeros, composição pela adição de fibras ou nanopartículas. (COUTINHO, 2017; SANTANA, 2015)

As temperaturas de transição vítrea (T_g) é de cerca de 55 °C e fusão (T_f) em torno de 175 °C. Apresenta como característica a sua grande versatilidade já que pode ser processado pelos principais métodos de conformação plástica: injeção, moldagem por extrusão e sopro, termoformagem, etc. (SANTANA, 2015)

Os filamentos de PLA apresentam uma maior facilidade de impressão se comparado ao ABS, o que explica a sua maior aceitação pelos usuários. A temperatura do bico de impressão está entre 160 a 220 °C, já a temperatura da mesa aquecida em torno de 70 °C. (SANTANA, 2015)

Pode ser encontrado no mercado na forma de carretéis em versões de 250 g, 500 g ou 1 Kg, com diversas cores e diâmetro de impressão de 1,75 mm e 2,85 mm. O diâmetro de impressão deve ser selecionado conforme o equipamento a ser utilizado. O PLA utilizado no ensaio foi o de 1,75 mm de diâmetro e cor vermelha.

Atualmente não existe padronização dos filamentos comercializados no mercado, podendo existir grande variação das propriedades encontradas em produtos de marcas diferentes. (SANTANA, 2015)

6.6 Corpos de Prova

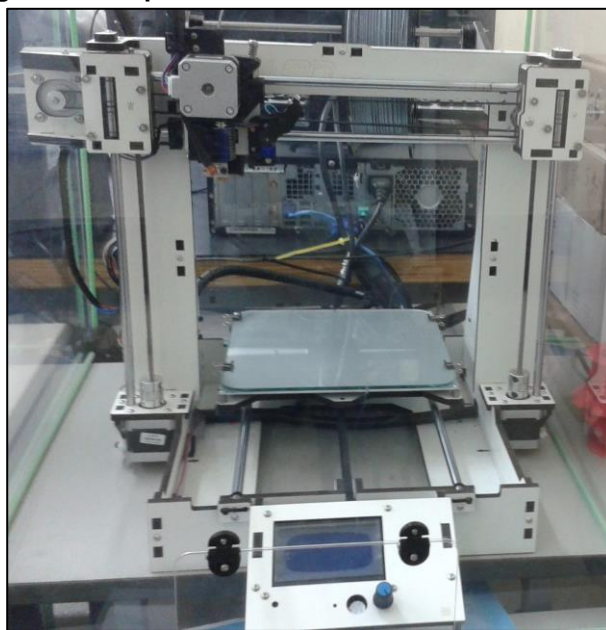
A geometria do corpo de prova assim como as suas dimensões foram baseados na norma ASTM D638, as suas características dimensionais podem ser consultadas no APÊNDICE A

A presente norma especifica vários tipos de corpos de prova (5 no total), porém estabelece preferência pelo tipo I, podendo ser utilizado os demais quando existir restrições quanto a espessura ou quando o mesmo não sofrer fratura na região correta. Pelos motivos descritos optou-se por se utilizar o corpo de prova do tipo I.

6.7 Impressão dos Corpos de prova

Uma série de corpos de provas foram produzidos com a impressora Voolt3D Gi3, mostrada na figura 21, disponível na instituição de ensino. Os corpos de prova foram impressos através do arquivo G-Code gerados no software Slice3r.

Figura 21 - Impressora Voolt3D da Fatec Santo André



Fonte: Os autores, 2018

O arquivo G-Code enviado a impressora continha 3 corpos de prova a serem impressos simultaneamente pelo equipamento, ou seja, o arquivo de impressão foi utilizado duas vezes para que o total de 6 corpos de prova para cada variação fossem adquiridos. Somente nas primeiras amostras impressas (densidade de preenchimento de 5%) foi impresso uma amostra por vez tendo em vista a falta de material inicialmente.

Essa quantidade foi selecionada para avaliar a dispersão dos resultados dentro das amostras com variáveis idênticas, assim como atender os requisitos da norma (esta estipula número mínimo de 5 amostras).

Todos os corpos de prova foram fabricados na horizontal, nessa direção além de apresentar uma boa resistência à tração, também dispensa a necessidade de suporte para a sua construção. O total de 35 camadas são formadas para a construção da peça nessa configuração.

6.8 Ensaio de Tração

O ensaio foi realizado pelos autores deste trabalho com auxílio de funcionário da instituição responsável pelo laboratório com os equipamentos e procedimentos baseados na norma citada e de acordo com manual do equipamento.

Os ensaios de tração foram realizados com equipamento universal de ensaios modelo WDW-100E fabricada pela empresa TIME GROUP INC, com capacidade máxima de 100 kN.

Antes da realização dos ensaios as massas dos corpos de prova foram medidas para posterior análise da relação entre a massa e a tensão limite de resistência.

As dimensões da parte útil e comprimento de cada corpo de prova foram medidos em vários locais e a média desses valores foi introduzida no computador vinculado ao equipamento de ensaio para o cálculo das tensões limite de resistência e escoamento.

Posteriormente cada corpo de prova foi fixado ao equipamento com as garras corretas para o tipo de ensaio (tração; corpo de prova retangular), conforme pode ser visualizado na figura 22. A velocidade de ensaio foi estipulada em 5 mm/min, conforme especificada na norma já referida. Iniciado o teste, o equipamento traciona o corpo de prova até a sua ruptura ou até que a força de tração atingia o mínimo de 40% da força máxima. No decorrer do ensaio o equipamento registra os valores de força e deslocamento obtidos pela sua célula de carga instantaneamente, sendo visível na tela do computador durante o ensaio podendo ser plotado ao final.

Figura 22 - Corpo de prova fixo ao equipamento de ensaios WDW-100E da Fatec Santo André



Fonte: Os autores, 2018

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na impressão dos corpos de prova dos corpos retilíneos com 5% de densidade ocorreu a falta de material quando o 2º corpo de prova estava sendo impresso. O material de impressão foi substituído pelo PLA de cor branca. Este apresentou as melhores propriedades mecânicas entre as amostras com mesma densidade e padrão de preenchimento. Avaliamos, porém, que a impressão de um mesmo corpo de prova de dois materiais com propriedades distintas cor/fabricante introduziria uma variável que não era objeto de análise, por isso, optamos em não considerar os seus valores no presente estudo. Essa amostra está presente nos APÊNDICES D e E (tabela de dados e gráfico), como amostra de número 2. Apresentamos em separado os valores das suas propriedades no quadro 3.

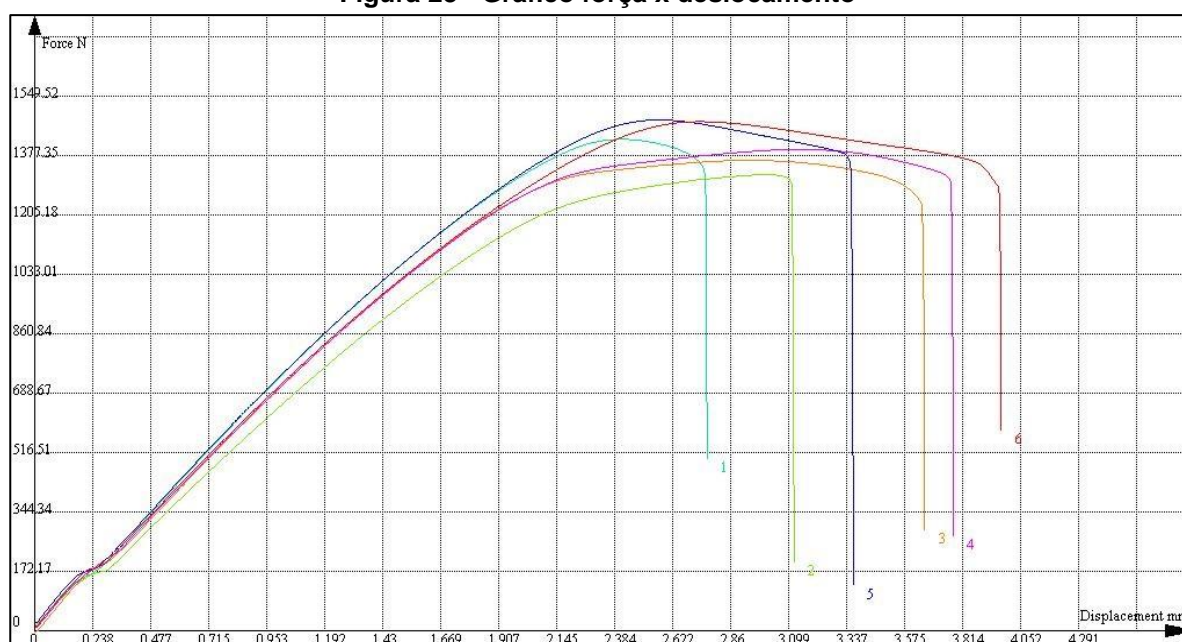
Quadro 3 - Propriedades Mecânica do corpo de prova impresso com 2 cores distintas

Força (kN)	Tensão de Esc. (MPa)	Tensão Res. (MPa)	Alongamento (%)	massa (g)	res/massa (MPa/g)
1,47	10,43	16,47	1,19	8,408	1,96

Fonte: Os autores, 2018

Para cada grupo de amostras ensaiadas com mesma densidade e padrão de preenchimento, ao final do ensaio foi obtido um gráfico de força x deslocamento, como mostrado na figura 23, este gráfico, assim como os demais estão disponíveis nos apêndices no final do trabalho. Estes valores são obtidos de forma direta pelo equipamento, já os valores da tensão de escoamento, tensão limite de resistência e alongamento são calculados pelo equipamento em função dos valores de comprimento, espessura e largura introduzidos pelo operador do equipamento.

Figura 23 - Gráfico força x deslocamento



Fonte: Os autores, 2018

No quadro 4 estão mostradas as medidas de espessura e largura da parte útil do corpo de prova para todas as amostradas ensaiadas. Estes valores foram introduzidos no software do equipamento de ensaio para o cálculo da área inicial.

Quadro 4 - Medidas de Largura e Espessura das amostras ensaiadas (mm)

Amostr a	Densidade 5%				Densidade 20%				Densidade 50%			
	Linear		Retilíneo		Linear		Retilíneo		Linear		Retilíneo	
	Larg.	Esp.	Larg.	Esp.	Larg.	Esp.	Larg.	Esp.	Larg.	Esp.	Larg.	Esp.
1	13,03	6,91	13,09	6,81	12,89	6,69	13,51	6,83	12,91	6,96	12,97	6,90
2	13,01	6,62	13,02	6,84	12,95	6,88	13,18	6,82	12,94	6,99	12,94	6,90
3	12,87	6,62	13,13	6,86	12,88	6,57	13,45	6,81	12,93	6,99	13,01	6,91
4	13,08	6,59	12,90	6,82	12,87	6,67	13,46	6,86	12,91	6,94	12,94	6,99
5	12,87	6,93	12,99	6,85	12,92	6,64	13,33	6,86	12,88	6,92	12,98	6,99
6	12,80	6,92	13,09	6,78	12,95	6,60	13,44	6,84	12,86	6,94	13,04	6,99

Fonte: Os autores, 2018

A massa de cada corpo de prova foi medida e através desta e da sua tensão limite de resistência foi calculado a resistência/massa.

Os resultados de cada propriedade foi tabelado, calculado a média das amostras assim como o seu desvio padrão. Estes valores estão apresentados a seguir com as respectivas avaliações em relação a influência da densidade e padrão de preenchimento.

7.1 Tensão de Escoamento

A tensão de escoamento é a tensão na qual acaba o limite elástico do material e começa o regime plástico. Alguns materiais não apresentam um limite de escoamento claramente definido, por isso o limite de deformação 0,2% é geralmente utilizado nestes casos. O seu valor esta é obtido com base na seguinte equação:

$$\sigma_e = \frac{F_{esc}}{A_i}$$

Onde F_{esc} é a força de escoamento obtida no ensaio em Newtons (N), A_i , área da seção transversal antes do ensaio em metros (m) e σ_e , tensão de escoamento em Pascal (Pa).

No quadro 5 estão apresentados os valores da tensão de escoamento.

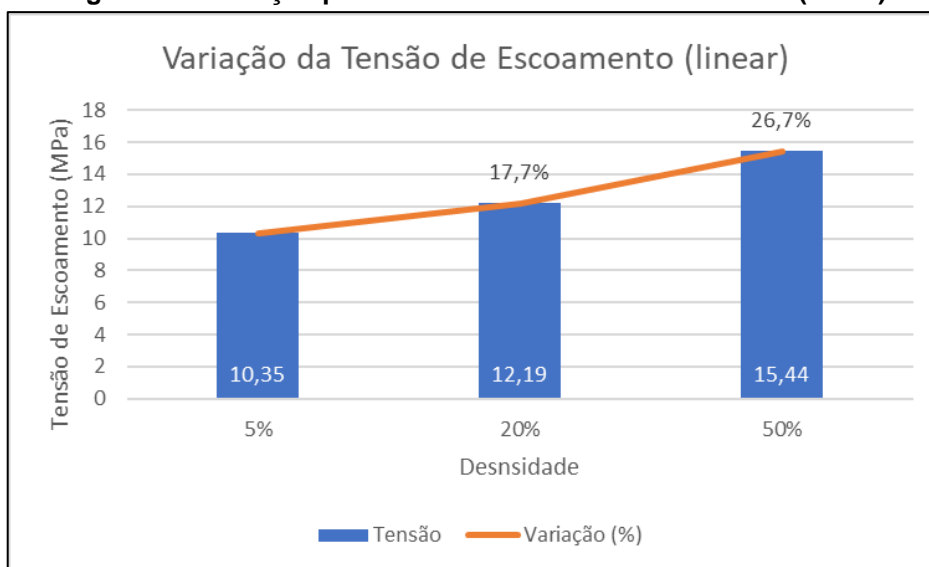
Quadro 5 - Valores de Tensão de Escoamento

Tensão de Escoamento (MPa)									
Amostra		1	2	3	4	5	6	média	Desv. Padrão
Linear	5%	10,27	9,73	10,23	10,24	10,82	10,83	10,35	0,42
	20%	11,62	11,58	12,60	12,46	12,15	12,71	12,19	0,49
	50%	15,42	15,38	15,11	15,41	15,80	15,49	15,44	0,22
Ret.	5%	13,03	10,66	9,88	10,54	10,24	9,55	10,65	1,24
	20%	12,13	12,82	12,72	11,67	11,97	12,01	12,22	0,45
	50%	15,17	15,52	15,10	15,85	15,63	15,48	15,46	0,28

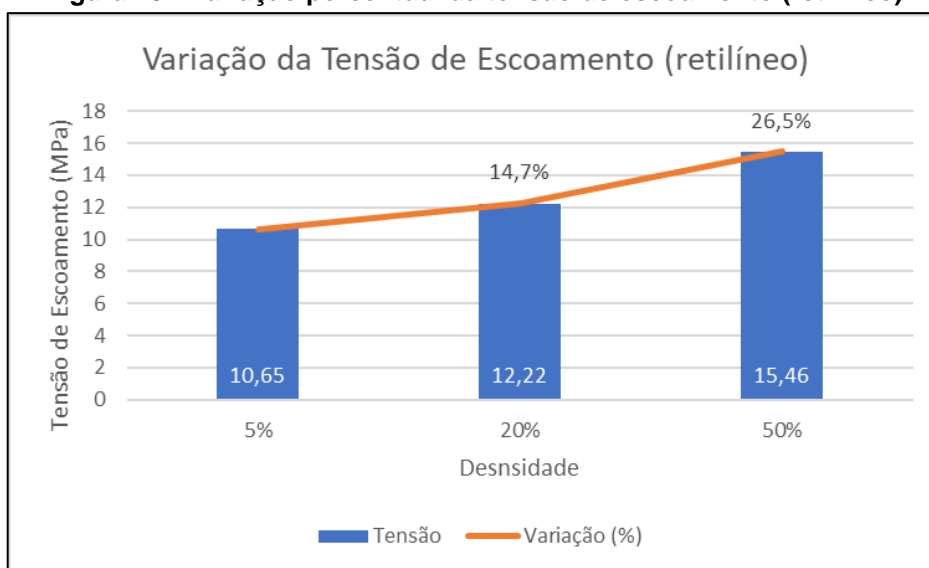
Fonte: Os autores, 2018

Para a tensão de escoamento o padrão retilíneo apresenta os maiores valores. Maiores valores da tensão de escoamento significam que o material consegue absorver maior quantidade de energia no regime elástico. No projeto mecânico geralmente são estes valores a serem utilizados no dimensionamento, pois após estes serem ultrapassados os componentes apresentam deformações permanentes.

As figuras 24 e 25 mostram que a variação percentual da tensão de escoamento apresenta valores similares para ambos os padrões de preenchimento, sendo a diferença mais perceptível o aumento de 5% para 20% de densidade, onde o padrão linear apresentou aumento de 17,7% e o retilíneo 14,7%.

Figura 24 - Variação percentual da tensão de escoamento (linear)

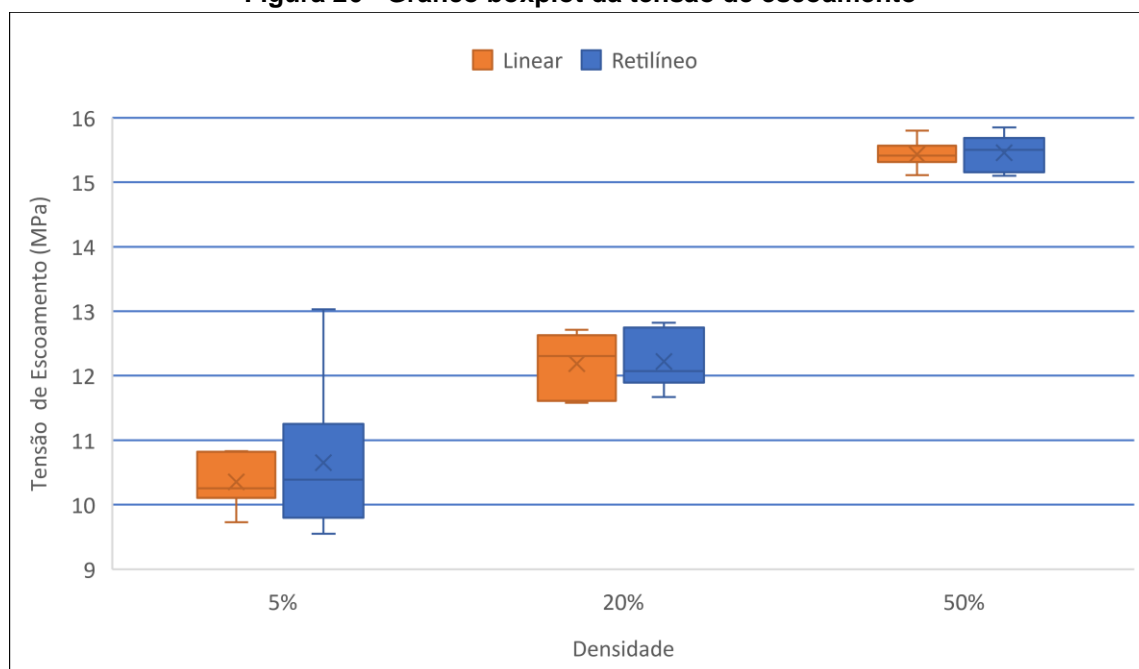
Fonte: Os autores, 2018

Figura 25 - Variação percentual da tensão de escoamento (retilíneo)

Fonte: Os autores, 2018

Em geral os valores de tensão de escoamento tiveram menores valores de dispersão do que os valores de tensão limite de resistência, exceto para o padrão linear de 5% que apresentou desvio padrão de 1,24, como já mostrado no quadro 5 e pode ser visualizado na figura 26. Isso aconteceu principalmente devido a amostra número 1, apresentar valor de tensão de escoamento (13,03 MPa) bem superior à média (10,65 MPa). Os dados com menor dispersão foram os referentes a densidade de 50%.

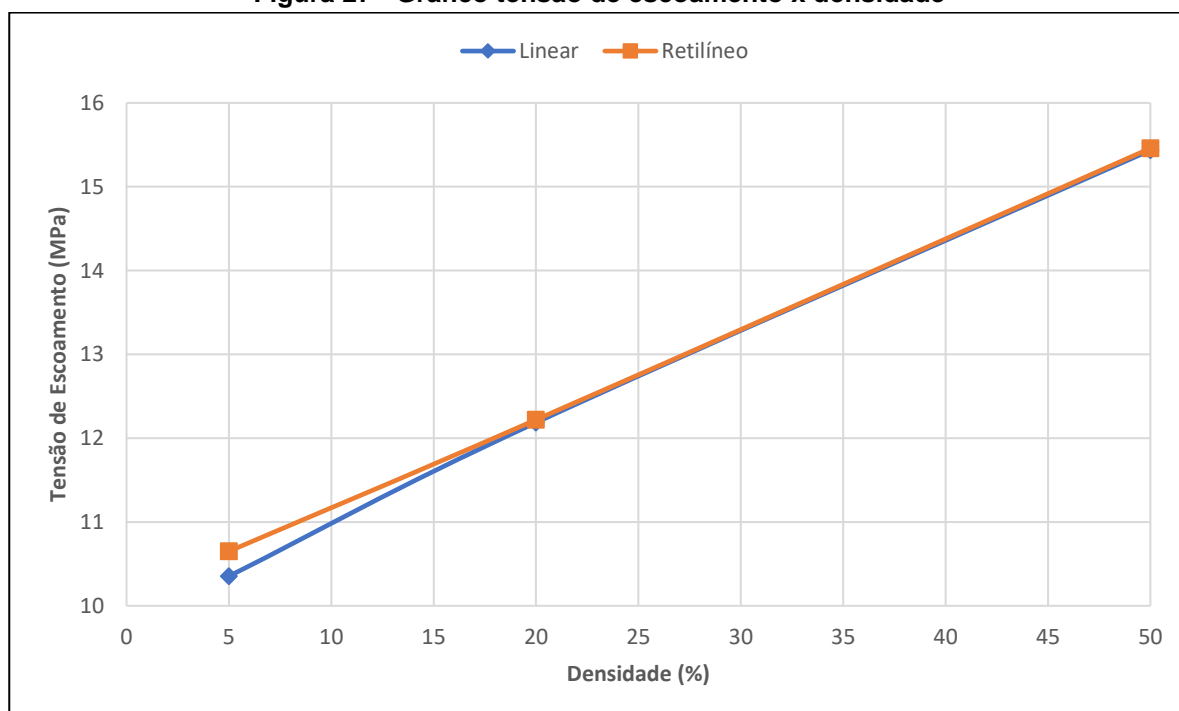
Figura 26 - Gráfico boxplot da tensão de escoamento



Fonte: Os autores, 2018

A tensão de escoamento varia linearmente em função da densidade como mostrado na figura 27, isso acontece para ambos os preenchimentos. Os valores se adequam tão bem a uma reta que se torna difícil distinguir claramente as duas retas por apresentarem valores similares para as densidades de 20 e 50%.

Figura 27 - Gráfico tensão de escoamento x densidade



Fonte: Os autores, 2018

7.2 Tensão Limite de Resistência

A tensão limite de resistência é a maior tensão obtida durante o ensaio, esta é obtida com base na seguinte equação:

$$\sigma_R = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_i}$$

Onde $F_{m\acute{a}x}$ é a força máxima obtida no ensaio em Newtons (N), A_i , área da seção transversal antes do ensaio em metros (m) e σ_r , tensão limite de resistência em Pascal (Pa).

No quadro 6 estão apresentados os resultados dos ensaios, assim como os valores médios e desvio padrão.

Quadro 6 - Valores de Tensão limite de resistência

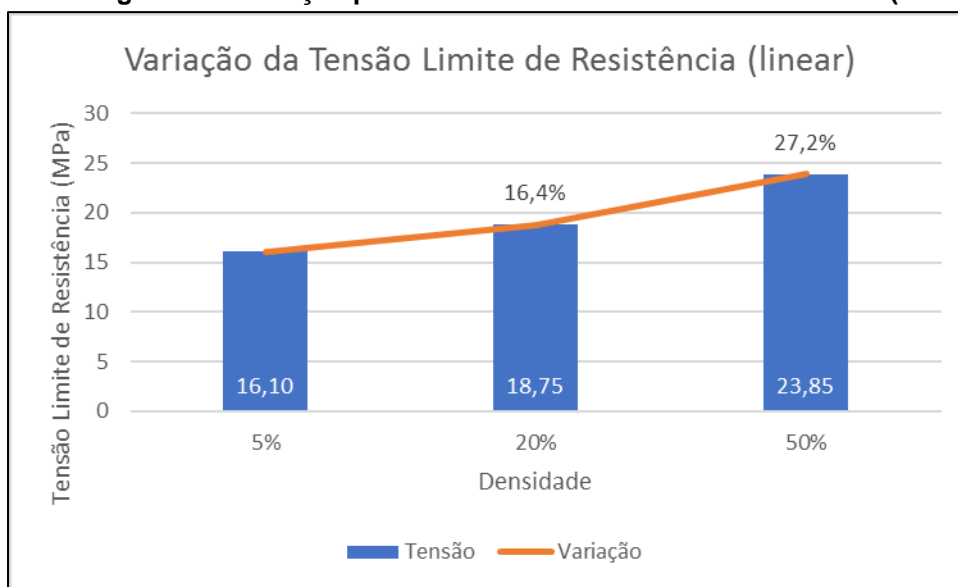
Tensão Limite de Resistência (MPa)									
Amostra		1	2	3	4	5	6	média	Desv. Padrão
Linear	5%	15,82	15,35	16,00	16,19	16,60	16,66	16,10	0,49
	20%	17,86	17,80	19,40	19,20	18,73	19,49	18,75	0,76
	50%	23,78	23,85	23,28	23,73	24,26	24,17	23,85	0,35
Ret.	5%	15,60	16,42	15,43	16,23	15,74	15,31	15,79	0,44
	20%	18,65	19,70	19,53	17,92	18,49	18,62	18,82	0,67
	50%	23,58	23,98	23,67	24,36	24,11	24,07	23,96	0,29

Fonte: Os autores, 2018

A tensão limite de resistência média para a densidade de 5% é maior para o padrão de preenchimento linear, esta situação, no entanto se inverte para as densidades de 20 e 50%, tendo o padrão retilíneo maior resistência.

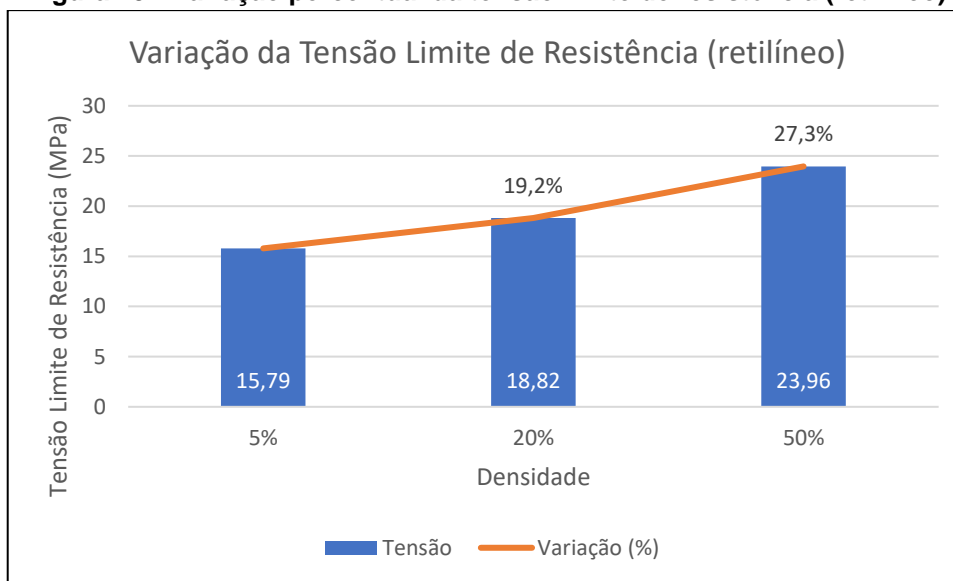
A figuras 28 e 29 mostram o aumento da tensão limite de resistência em relação a densidade. Observa-se que os maiores aumentos são apresentados pelo preenchimento retilíneo, porém com valores bastante semelhantes em relação ao linear.

Figura 28 - Variação percentual da tensão limite de resistência (linear)



Fonte: Os autores, 2018

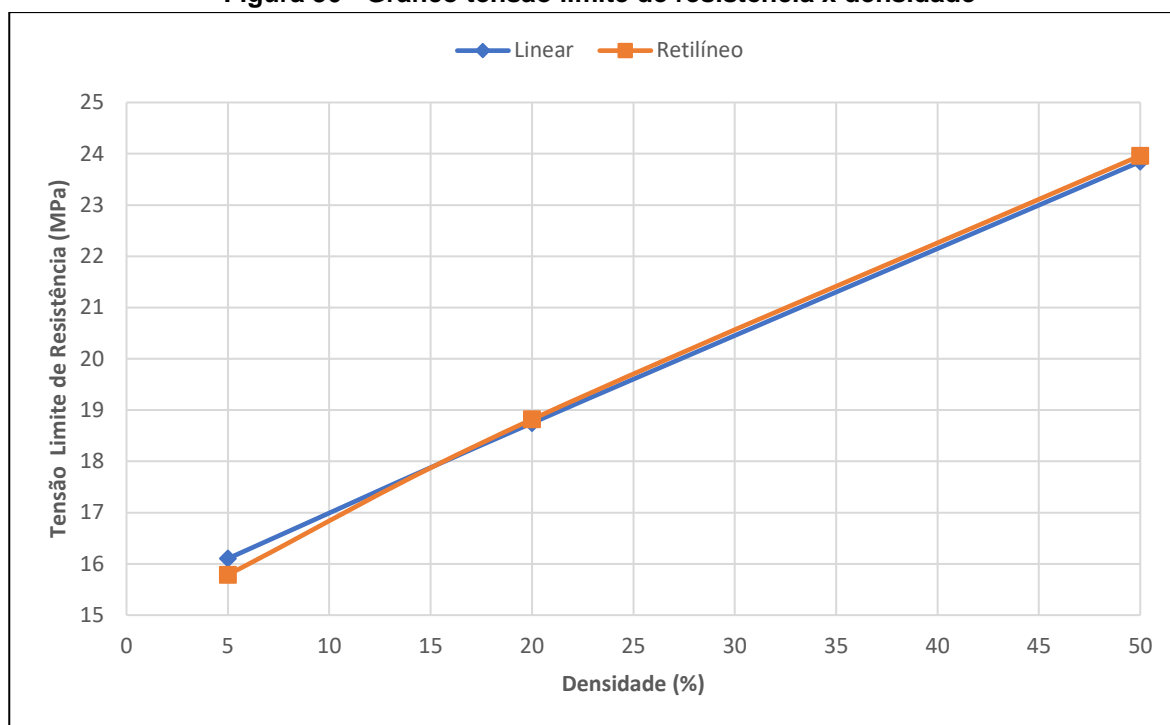
Figura 29 - Variação percentual da tensão limite de resistência (retilíneo)



Fonte: Os autores, 2018

A figura 30 mostra que a tensão limite de resistência varia linearmente com a densidade para ambos os preenchimentos.

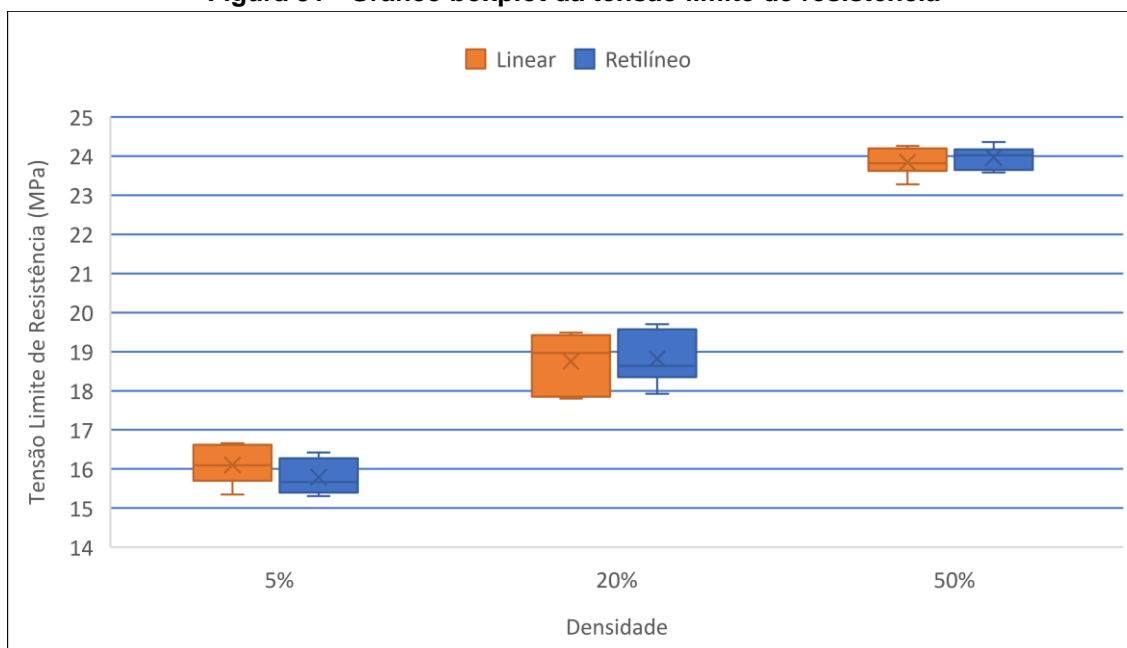
Figura 30 - Gráfico tensão limite de resistência x densidade



Fonte: Os autores, 2018

Os dados com maiores dispersões foram os referentes a densidade de 20%, já os de menor dispersão foram os de densidade de 50%, para ambos os padrões de preenchimento. Isso pode ser verificado nos valores de desvio padrão do quadro 6, ou na figura 31.

Figura 31 - Gráfico boxplot da tensão limite de resistência



Fonte: Os autores, 2018

7.3 Alongamento

O alongamento é o valor percentual de variação de comprimento dado pela equação:

$$\% \Delta L = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100$$

Onde ΔL , representa a diferença entre o comprimento final e o inicial, e L_0 é o comprimento inicial.

Os valores do comprimento inicial das amostras ensaiadas podem ser conferidos no quadro 7.

Quadro 7 - Valores de comprimento inicial das amostras ensaiadas (mm)

Amostra	Densidade 5%		Densidade 20%		Densidade 50%	
	Linear	Retilíneo	Linear	Retilíneo	Linear	Retilíneo
1	164,47	164,51	164,45	164,70	164,45	164,54
2	164,60	164,57	164,47	164,17	164,50	164,50
3	164,58	164,46	164,49	164,32	164,51	164,32
4	164,60	164,61	164,47	164,39	164,50	164,60
5	164,62	164,53	164,44	164,49	164,46	164,52
6	164,59	164,83	164,46	164,50	164,58	164,52

Fonte: Os autores, 2018

O alongamento está relacionado com a capacidade do material se deformar até a ruptura. No quadro 8 são apresentados os valores de alongamento.

Quadro 8 - Valores de Alongamento

Alongamento (%)									
Amostra		1	2	3	4	5	6	Média	Desv. Padrão
Linear	5%	0,52	0,26	0,80	0,54	0,35	0,53	0,50	0,19
	20%	0,74	0,43	0,58	0,59	0,77	0,74	0,64	0,13
	50%	1,42	1,23	2,09	2,80	2,09	3,94	2,26	0,99
Ret.	5%	0,80	0,75	0,94	0,30	0,22	0,24	0,54	0,32
	20%	1,34	1,53	2,46	3,02	2,59	2,86	2,30	0,70
	50%	2,42	2,19	2,99	1,54	1,85	0,56	1,93	0,83

Fonte: Os autores, 2018

O alongamento médio é maior para amostras de preenchimento retilíneo com 5 e 20%, entretanto para a densidade de 50%, o maior valor se refere ao preenchimento linear.

Nesse ensaio houve uma grande discrepância entre o valor de alongamento para densidade de 20% entre os preenchimentos analisados. A figura 32 mostra o comparativo entre eles após o ensaio, na qual pode-se observar que as amostras do tipo retilíneo apresentam marcas esbranquiçadas com orientação de aproximadamente 45°, indicando o maior estiramento, não visíveis nas amostras lineares. Estas marcas também estão visíveis nas amostras com densidade de 50%, para ambos os preenchimentos. Por motivos desconhecidos amostras com estas marcas aparentemente possuem maior nível de adesão entre as suas camadas.

Figura 32 - Comparativo da fratura dos corpos de prova retilíneo e linear com 20%



Fonte: Os autores, 2018

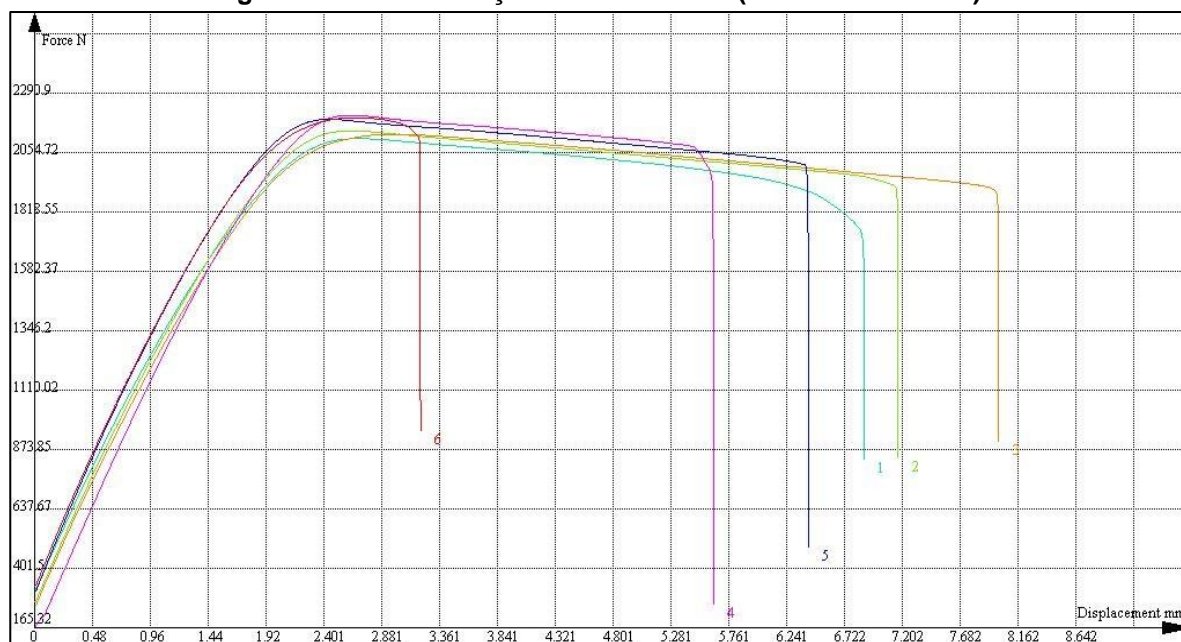
Este fato também ocorreu entre amostras com parâmetros idênticos de preenchimento e densidade, como por exemplo para o caso de preenchimento retilíneo com 50% de densidade, mostrado na figura 33. A amostra 6 não apresenta qualquer marca visível, e nas amostras 4 e 5 estas marcas são visíveis, porém em menor dimensão e intensidade se comparado aos demais. Estas amostras citadas foram as que apresentaram menor deslocamento até a ruptura como pode ser visualizado no gráfico da figura 34.

Figura 33 - Fratura dos corpos de prova retilíneo com 50%



Fonte: Os autores, 2018

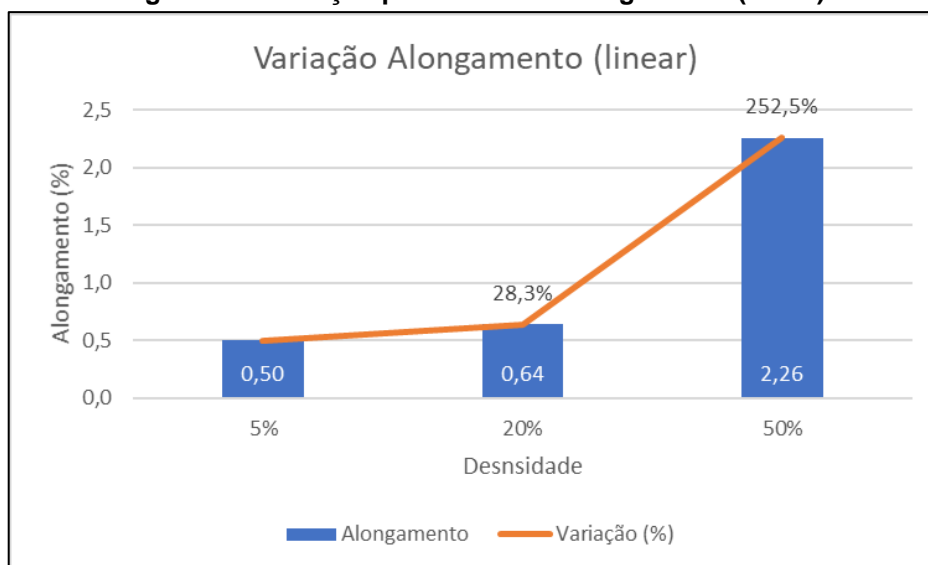
Figura 34 - Gráfico força x deslocamento (retilíneo com 50%)



Fonte: Os autores, 2018

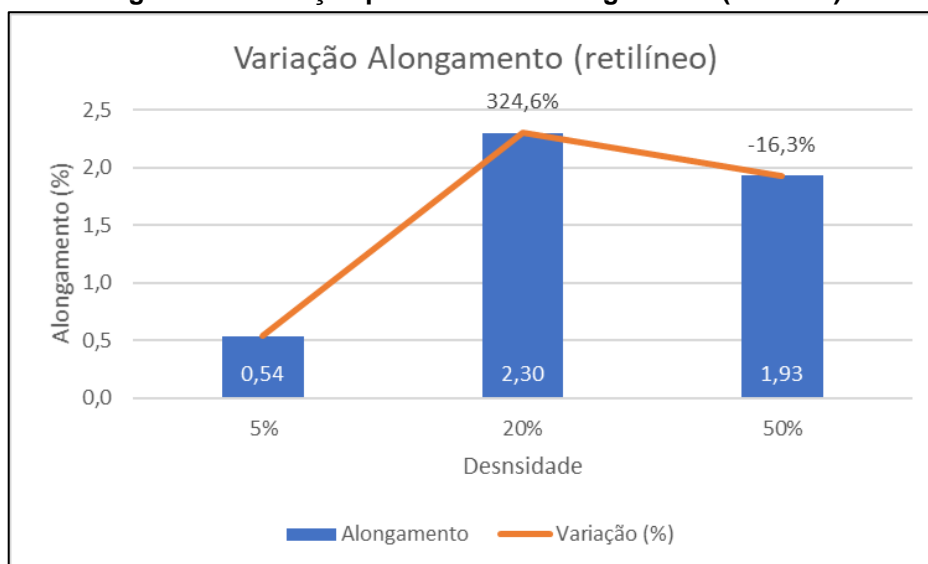
As figuras 35 e 36 mostram que o alongamento variou de maneira diferente para os dois preenchimentos. A variação do preenchimento retilíneo apresentou crescimento acentuado para densidade de 20%, com uma pequena queda para a densidade de 50%.

Figura 35 - Variação percentual do alongamento (linear)



Fonte: Os autores, 2018

Figura 36 - Variação percentual do alongamento (retilíneo)



Fonte: Os autores, 2018

7.4 Massa

As amostras com maiores valores médios de massa para a mesma densidade são o preenchimento retilíneo para o caso de 5 e 20% de densidade e com preenchimento linear com 50%, conforme pode ser visualizado no quadro 9.

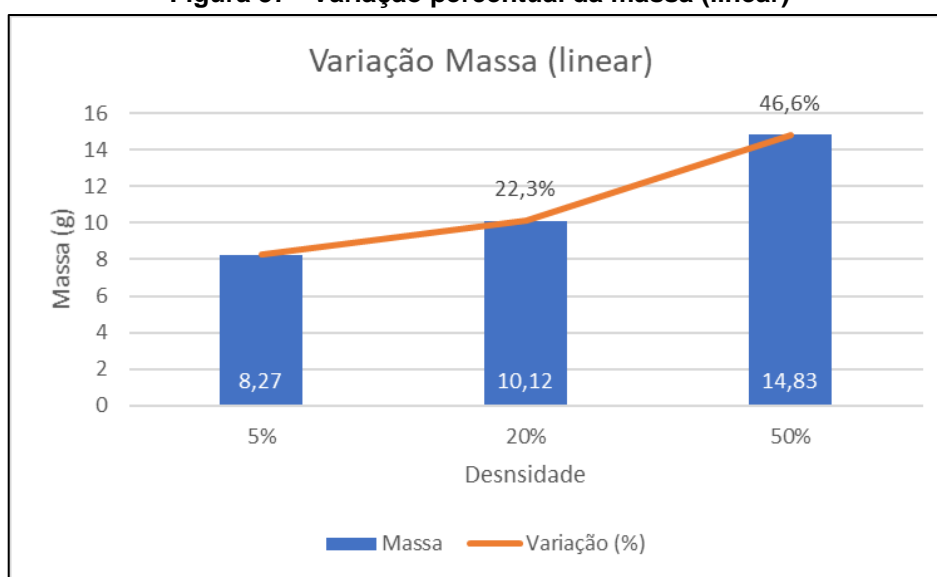
Quadro 9 - Valores de Massa

		massa (g)							
Amostra		1	2	3	4	5	6	Média	Desv. Padrão
Linear	5%	8,2803	8,2771	8,2307	8,2828	8,2890	8,2651	8,27	0,02
	20%	10,0833	9,9486	10,1523	10,2584	9,9156	10,3368	10,12	0,17
	50%	14,9307	14,9538	14,8836	14,7345	14,7343	14,7513	14,83	0,10
Ret.	5%	8,5709	8,5563	8,4722	8,4610	8,5075	8,5602	8,52	0,05
	20%	10,6290	10,5809	10,6286	10,5353	10,5215	10,6024	10,58	0,05
	50%	14,6289	14,6301	14,6720	14,8781	14,9080	14,9535	14,78	0,15

Fonte: Os autores, 2018

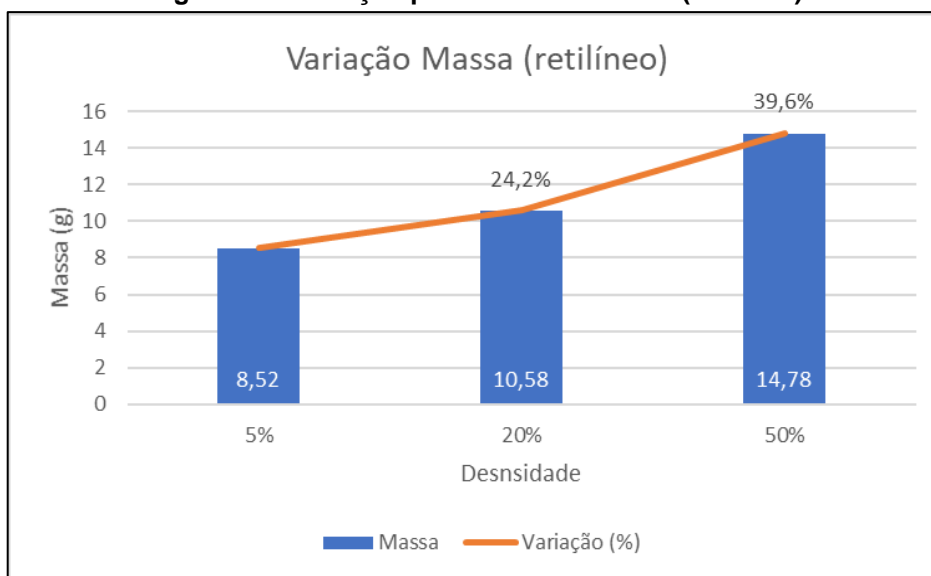
Evidencia-se que o aumento percentual da massa, mostrado nas figuras 37 e 38, para ambos os preenchimentos é superior ao da tensão limite de resistência. O aumento percentual da massa entre as densidades 20% e 50% chega a ser quase o dobro da tensão limite de resistência.

Figura 37 - Variação percentual da massa (linear)



Fonte: Os autores, 2018

Figura 38 - Variação percentual da massa (retilíneo)

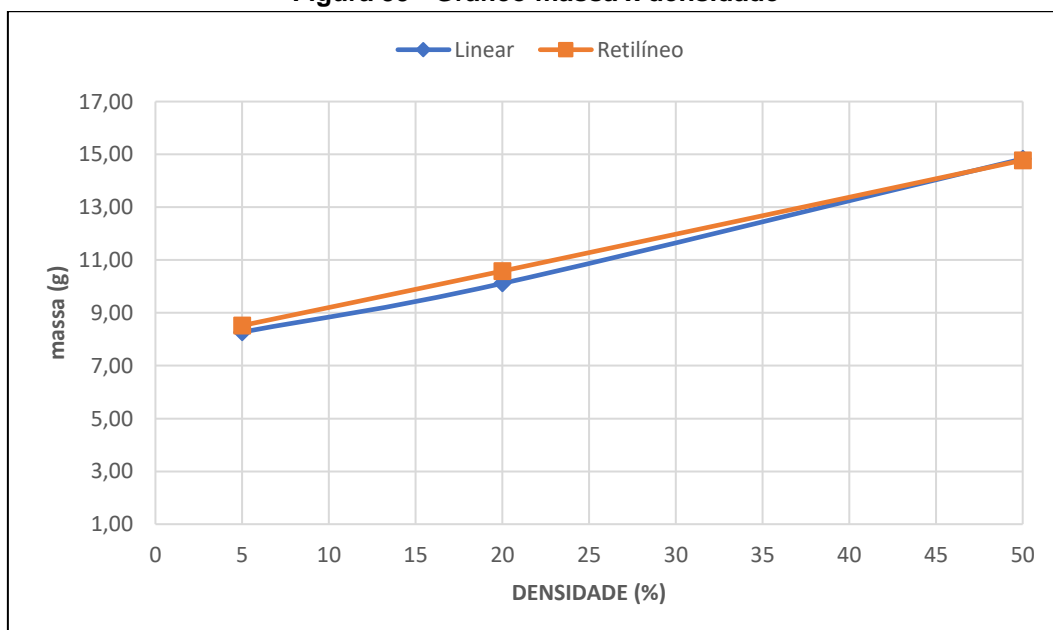


Fonte: Os autores, 2018

Assim como as tensões de escoamento e resistência, a massa variou de maneira linear em relação a densidade como pode ser visualizado no gráfico da figura 39.

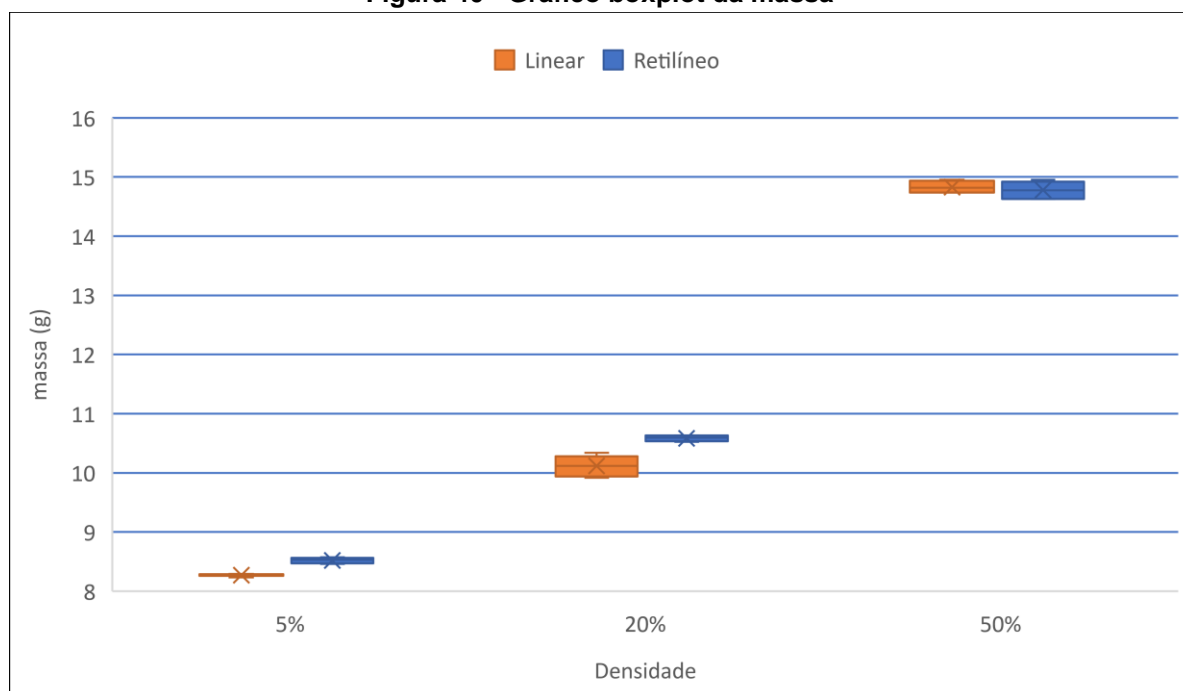
Os valores de massa tiveram pouca variação entre as amostras principalmente para a densidade de 5%, o que pode ser visto na figura 40. Entre as propriedades analisadas a massa foi uma das que apresentou menor desvio padrão entre a amostras.

Figura 39 - Gráfico massa x densidade



Fonte: Os autores, 2018

Figura 40 - Gráfico boxplot da massa



Fonte: Os autores, 2018

7.5 Relação Resistência/massa.

Quanto maior é o valor da relação entre a tensão limite de resistência e massa, significa uma maior resistência com menores valores de massa. Isso é importante quando a massa é um fator limitante em determinado projeto, principalmente nos dias atuais em que a economia de combustível possui grande relevância.

O quadro 10 mostra a relação entre a tensão limite de resistência e a massa.

Quadro 10 - Valores de resistência/massa

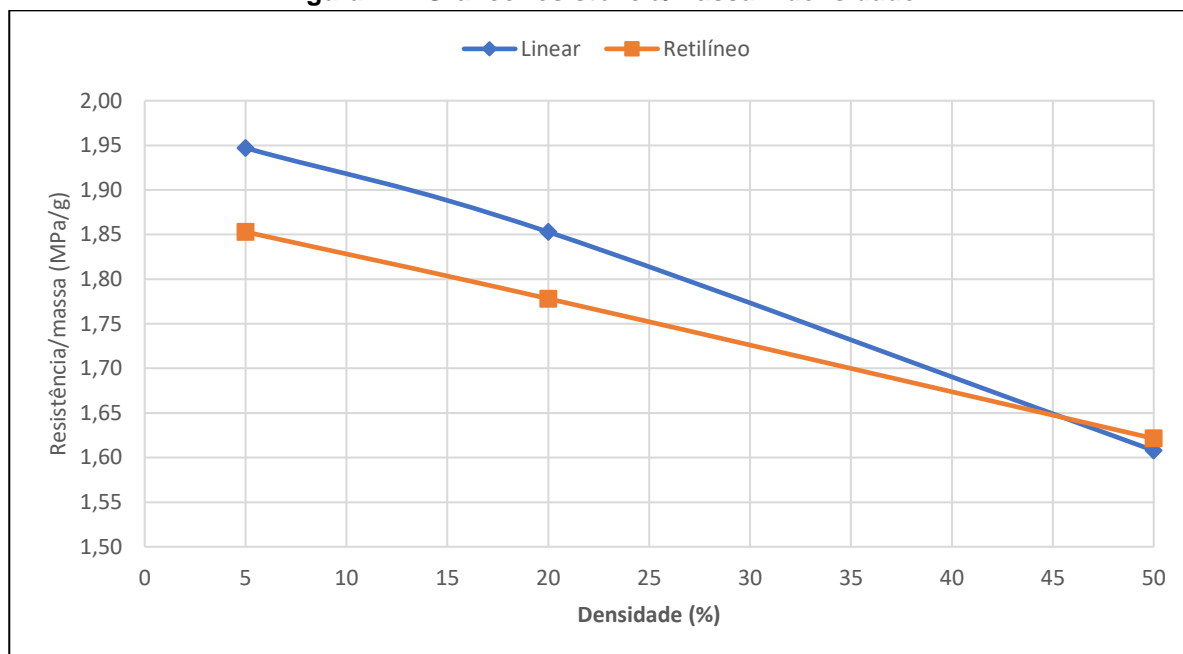
		Res./massa (MPa/g)							
Amostra		1	2	3	4	5	6	média	Desv. Padrão
Linear	5%	1,91	1,85	1,94	1,95	2,00	2,02	1,95	0,06
	20%	1,77	1,79	1,91	1,87	1,89	1,89	1,85	0,06
	50%	1,59	1,59	1,56	1,61	1,65	1,64	1,61	0,03
Ret.	5%	1,82	1,92	1,82	1,92	1,85	1,79	1,85	0,05
	20%	1,75	1,86	1,84	1,70	1,76	1,76	1,78	0,06
	50%	1,61	1,64	1,61	1,64	1,62	1,61	1,62	0,01

Fonte: Os autores, 2018

Pode-se perceber que com o padrão de preenchimento linear se obtém as melhores relações com as densidades de preenchimento de 5 e 20%, sendo

praticamente equivalente para a densidade de 50%. Existe uma tendência de diminuição desta relação para ambos o que pode ser visto na figura 41.

Figura 41 - Gráfico resistência/massa x densidade



Fonte: Os autores, 2018

7.6 Comparativo padrão de preenchimento

O quadro 11 mostra a comparação entre o preenchimento retilíneo e o linear em relação as 5 propriedades nas densidades ensaiadas. Percebe-se que a propriedades de maior discrepância é o alongamento, sendo que com 20% de densidade o alongamento do preenchimento retilíneo é mais de duas vezes superior ao linear.

Exceto o alongamento, percebe-se que conforme aumenta-se a densidade os valores médios das propriedades se convergem a um valor comum, com diferença inferior a 1%. Esse fato pode ser explicado pela a análise dos dois padrões de preenchimento mostrada anteriormente no capítulo 6, como já relatado conforme aumenta-se a densidade poucas diferenças podem ser percebidas entre o padrão linear e retilíneo.

Embora com valores próximos, o preenchimento retilíneo geralmente é a melhor opção quando se leva em conta a resistência mecânica (tensão limite de resistência e escoamento), exceto em alguns casos pontuais. Já quando a massa e a

relação resistência/massa são fatores importante a melhor opção é o preenchimento linear para densidades baixas (5 e 20%), porém isso se inverte para a densidade de 50%.

Quadro 11 - Comparativo de valores para os preenchimentos retilíneo e linear

Comparação Retilíneo x Linear			
Densidade	5%	20%	50%
Tensão Escoamento	↑ 2,87%	↑ 0,27%	↑ 0,15%
Tensão Limite de Resistência	↓ -1,96%	↑ 0,38%	↑ 0,49%
Alongamento	↑ 8,33%	↑ 258,44%	↓ -14,89%
Massa	↑ 3,03%	↑ 4,62%	↓ -0,36%
Resist./massa	↓ -4,83%	↓ -4,04%	↑ 0,84%

Fonte: Os autores, 2018

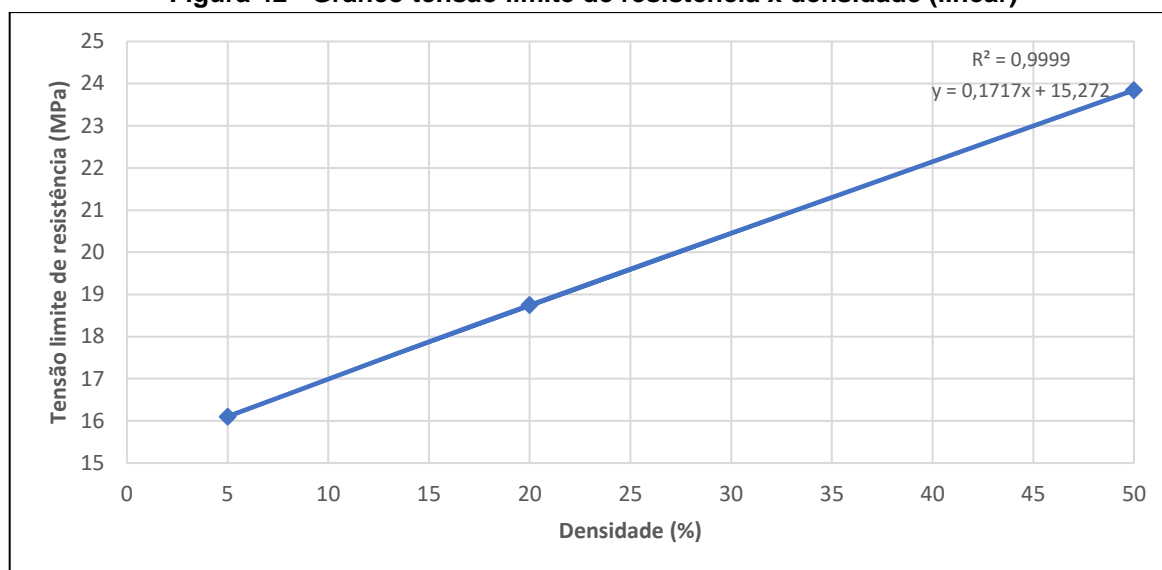
7.7 Estimativa Tensão limite de resistência

Através dos dados obtidos nos ensaios, elaborou-se o gráfico da tensão limite de resistência em função da densidade, apresentados nas figuras 42 e 43. Nota-se que os dados variaram linearmente, selecionando esta opção para a linha de tendência o software Excel exibe as seguintes equações:

$$\sigma_R = 0,1717x + 15,272 \text{ (MPa) (Linear)}$$

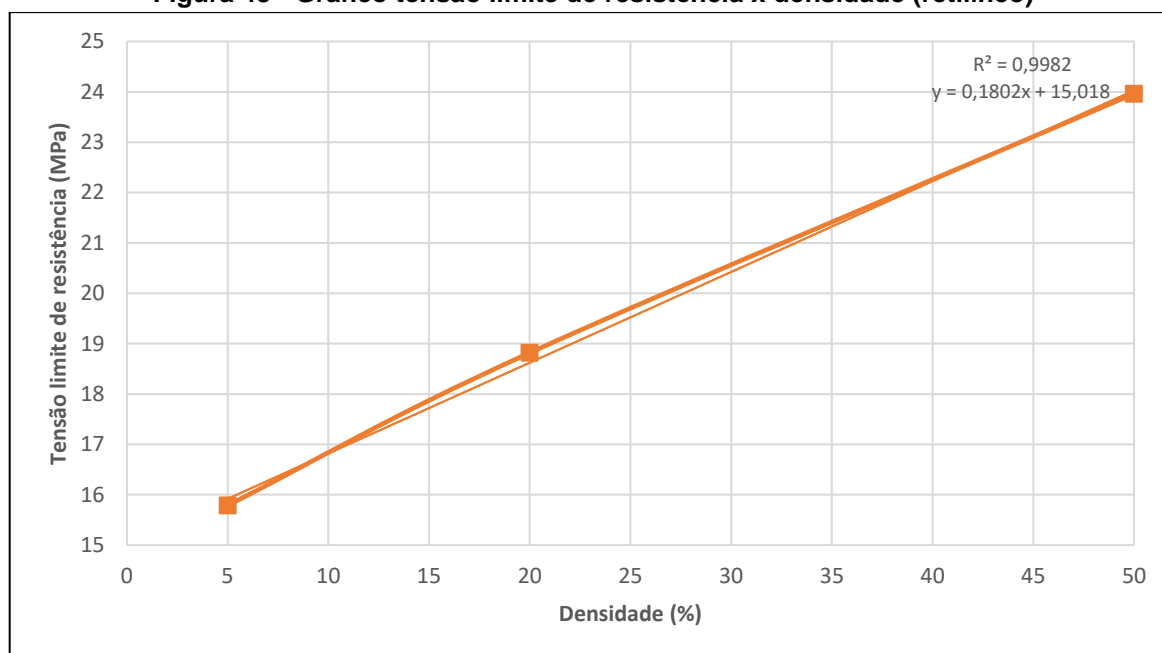
$$\sigma_R = 0,1802x + 15,018 \text{ (MPa) (Retilíneo)}$$

Figura 42 - Gráfico tensão limite de resistência x densidade (linear)



Fonte: Os autores, 2018

Figura 43 - Gráfico tensão limite de resistência x densidade (retilíneo)



Fonte: Os autores, 2018

O preenchimento linear se adequa quase que perfeitamente a reta da equação que o software plota no gráfico, que não é possível visualizá-la, diferentemente do retilíneo, embora este também apresente dados com boa correlação. A boa correlação também está demonstrada por meio do valor do coeficiente de correlação (R^2), quanto mais este valor se aproxima de 1 melhor é correlação entre as variáveis.

Baseados nas referidas equações foi elaborada o quadro 12, nele estão mostrados os dados calculados e os encontrados em ensaio. Verifica-se agora de

maneira numérica a boa aproximação obtida pelas equações. Foram também estimados valores de tensão para densidades não ensaiadas.

Quadro 12 - Valores de tensão limite de resistência

Tensão Limite de Resistência (MPa)				
Dens.	Linear		Retilíneo	
	Calc.	Ens.	Calc.	Ens.
5	16,13	16,10	15,92	15,79
20	18,71	18,75	18,62	18,82
40	22,14	-	22,23	-
50	23,86	23,85	24,03	23,96
80	29,01	-	29,43	-
100	32,44	-	33,04	-

Fonte: Os autores, 2018

8 CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho procurou-se evidenciar a importância da manufatura aditiva no meio produtivo da indústria automobilística atual. Aspectos ligados a redução de tempo de projeto, custos menores, possibilidade de fabricação de peças complexas, etc. foram apresentados como benefícios desta tecnologia. Apresentou-se também alguns contrapontos como a inviabilidade econômica para baixa produções, precisão dimensional, pouca disponibilidade de materiais se comparados a métodos tradicionais de manufatura, propriedades mecânicas não uniformes, etc.

Relatamos de forma sucinta os principais processos de manufatura aditiva utilizados atualmente e posteriormente foram apresentados alguns exemplos de como estes estão auxiliando várias montadoras de diferentes maneiras. Também foi apresentado possíveis tendências futuras como a fabricação em mutimateriais

Posteriormente foram realizados ensaios mecânicos em peças produzidas pelo processo FDM, utilizando como material de impressão o PLA. O processo e o material de impressão foram escolhidos devidos a sua disponibilidade na própria instituição de ensino, assim como o processo FDM ser um dos mais empregados atualmente em várias áreas (educacional, meio produtivo, home office, etc.). Nesses ensaios procurou-se identificar as variações nas propriedades mecânicas em função da variação da densidade e padrão de preenchimento, no entanto, estas variáveis não são as únicas a influenciar estas propriedades.

Os dois padrões de preenchimento utilizados foram o linear e o retilíneo, com densidades de 5, 20 e 50%. Ficou constado que os padrões de preenchimento ensaiados não demonstraram diferenças significativas nas propriedades analisadas, principalmente em valores de densidade maiores, excluindo-se o alongamento, que apresenta ser bastante influenciada. Entretanto, acredita-se que a relevância desse fator tenha sido minimizada pela semelhança entre os padrões escolhidos. Esta escolha foi realizada porque estes eram os mais utilizados em trabalhos similares pesquisados, esta semelhança não era de conhecimento desses autores no momento desta seleção.

A densidade, porém, apresenta grande influência nestas propriedades, sendo o alongamento o que apresenta maior variação. O aumento da tensão limite de resistência, tensão de escoamento e massa, já era esperado, porém não era

conhecido como seria este aumento. Verificou-se que embora essas três propriedades aumentem, o aumento percentual da massa é maior. Isso acarreta em uma diminuição da relação massa/resistência, sendo esta de grande importância em projetos que priorizem boa resistência com valores de massa reduzidos, como no setor de aviação ou projetos do setor automotivo que priorizem o consumo de combustível.

Constatou-se que a tensão limite de resistência varia linearmente com a densidade, com isso, obteve-se uma função do primeiro grau que relaciona a densidade com a tensão. Dessa forma pode-se estimar os valores de tensão para valores de densidade que não foram ensaiados, podendo assim utilizar estes valores para selecionar a densidade adequada na fabricação de peças.

Porém, como foram ensaiados corpos de prova com valores de densidade de até 50% de densidade não há certeza que a tendência é mantida para valores superiores de densidade e que essas estimativas são suficientes precisas (por se utilizar apenas de 3 pontos). Entretanto, esses dados podem servir como boa estimativa para se determinar a densidade adequada para se obter a tensão que determinada peça/componente necessite ou vice-versa, com melhor aproximação para densidades inferiores a 50%.

Acreditamos que vários foram os benefícios proporcionados pela manufatura aditiva na sua incorporação pelos fabricantes de veículos. No futuro próximo tem muito a evoluir ao passar para fabricação de peças de uso final assim como já acontece com as grandes fabricantes de aeronaves mundiais. Espera-se que este trabalho venha a contribuir para futuros projetos acadêmicos que venham a usufruir das facilidades da impressão 3D ou realizar pesquisas nesta área.

Propostas para trabalhos futuros

- Realização de ensaios com outros padrões de preenchimento (*Honeycomb*, *Concentric*, etc.) e materiais (ABS, por exemplo), e verificar se apresentam variações significativas entre si.
- Avaliação dessas propriedades com orientação de impressão diferente.
- Verificação se a tendência de aumento linear da tensão limite de resistência se confirma para valores de densidade acima de 50%.

REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials. D368. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. 2002
- BARDHAN, Indraneel. Printing the automotive industry of the future – 3D style!. Automotive Megatrends Magazine. Penarth, UK, p. 12-14, Q4. 2015
- BABU, S. S.; et al. Additive Manufacturing of materials: opportunities and challenges. MRS BULLETIN, volume 40. Dec, 2015.
- CAMPBELL, Thomas; WILLIAMS, Christopher B., IVANOVA, Olga. Could 3D printing change the World? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing. Oct, 2011.
- COUTINHO, Rafaella Rabello Teixeira Perdone. Avaliação de Parâmetros de Processo nas Propriedades de Peças de PBAT/PLA Fabricadas por Impressão 3D. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.
- CURRAN, Chris. The road ahead for 3D printing. Disponível em <<http://usblogs.pwc.com/emerging-technology/the-road-ahead-for-3D-printing/>>. Acesso em 24/05/2017.
- CREGGER, Joshua. Implications of Additive Manufacturing for the Auto Industry. Disponível em: <<http://www.areadevelopment.com/Automotive/q3-2015-auto-aero-site-guide/Implications-Additive-Manufacturing-Auto-Industry-672233.shtml>>. Acesso em 24/05/2017.
- DAWSON, Ruth. Cars in 3D. Automotive World Megatrends Magazine. Penarth, UK, p. 29-31, Q3.2013
- KAI, Chua Chee; FAI, Leong Kah; SING, Lim Chu. Rapid Prototyping: Principles and Applications. Second Edition. Singapore. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2003. 420 p.
- FERNANDEZ-VICENTE, Miguel; CALLE, Wilson; FERRANDIZ, Santiago; CONEJERO, Andres. Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. 3D Printing and Additive Manufacturing. Volume 3, Nº 3, 2016.
- FORD, Simon; DESPEISSE, Mélanie. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of advantages and challenges. Journal of Cleaner Production. May, 2016.
- GEBHARDT, Andreas. Understanding Additive Manufacturing: Rapid

Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. München, Germany, Hanser Publishers, 2011. 164 p.

GEISSBAUER, Reinhard; VEDSO, Jesper; SCHRAUF, Stefan. Indústria 4.0: Digitização como vantagem competitiva no Brasil. PWC. 2016

GIBSON, I; ROSEN, W.D.; STUCKER, B. Additive manufacturing Technologies: rapid prototyping to direct manufacturing. New York, USA. Springer, 2015. 498 p.

GIFFI, Craig A.; GANGULA, Bharath; ILLINDA, Pandarinath. 3D opportunity in the automotive industry: Additive manufacturing hits the road. Deloitte University Press. 2014

GORNI, Antonio Augusto. Prototipagem rápida, a revolução 3D. Plástico Industrial. São Paulo, SP, p. 24-34, nov, 2013.

GUO, Nannan; LEU, Ming C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. Higher Education Press and Springer-Verlag. Berlin, Alemanha. 2013.

HILTON, Peter D.; JACOBS, Paul F. Rapid Tooling Technologies and Industrial Applications. New York, USA. Marcel Dekker, Inc, 2000. 267 p.

JIANG, Ruth; KLEER, Robin; PILLER, Frank T. Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030. Elsevier, 2017.

VOLPATO, N. Prototipagem Rápida - Tecnologias e Aplicações. 2ª. ed. São Paulo: Blucher, 2006. 500p.

REDWOOD, Ben; SCÖFFER, Filemon; GARRET, Brian. The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications. 3D Hubs B. V., 2017.

SANTANA, Leonardo. AVALIAÇÃO DE UMA IMPRESSORA 3D BASEADA EM PROJETO DE CÓDIGO ABERTO NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS EM PLA. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

SANT'ANNA, José Paulo. Manufatura aditiva gera peças perfeitas com baixo custo e sem perder tempo. Revista Plástico Moderno. São Paulo, SP, p. 16-21, maio, 2016.

<<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview>>. Acesso em 23/05/2017.

<<http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/materials/>>. Acesso em 18/05/2017.

<<https://formlabs.com/mechanical-properties-of-uv-cured-3d-prints/>>. Acesso em 20/06/2017.

<<http://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=GUID-4E32611E-0790-479F->

926A-66041C478864>. Acesso em 14/06/2018.

< <http://manual.slic3r.org/intro/overview>>. Acesso em 01/04/2018.

<<http://www.stratasys.com/br/materiais/fdm/ultem-9085>>. Acesso em 22/04/2017

<<http://www.stratasys.com/3D-printers/idea-series/mojo>>. Acesso em 21/06/2017

<<http://www.stratasys.com/3D-printers/production-series/fortus-380-450mc>>. Acesso em 21/06/2017

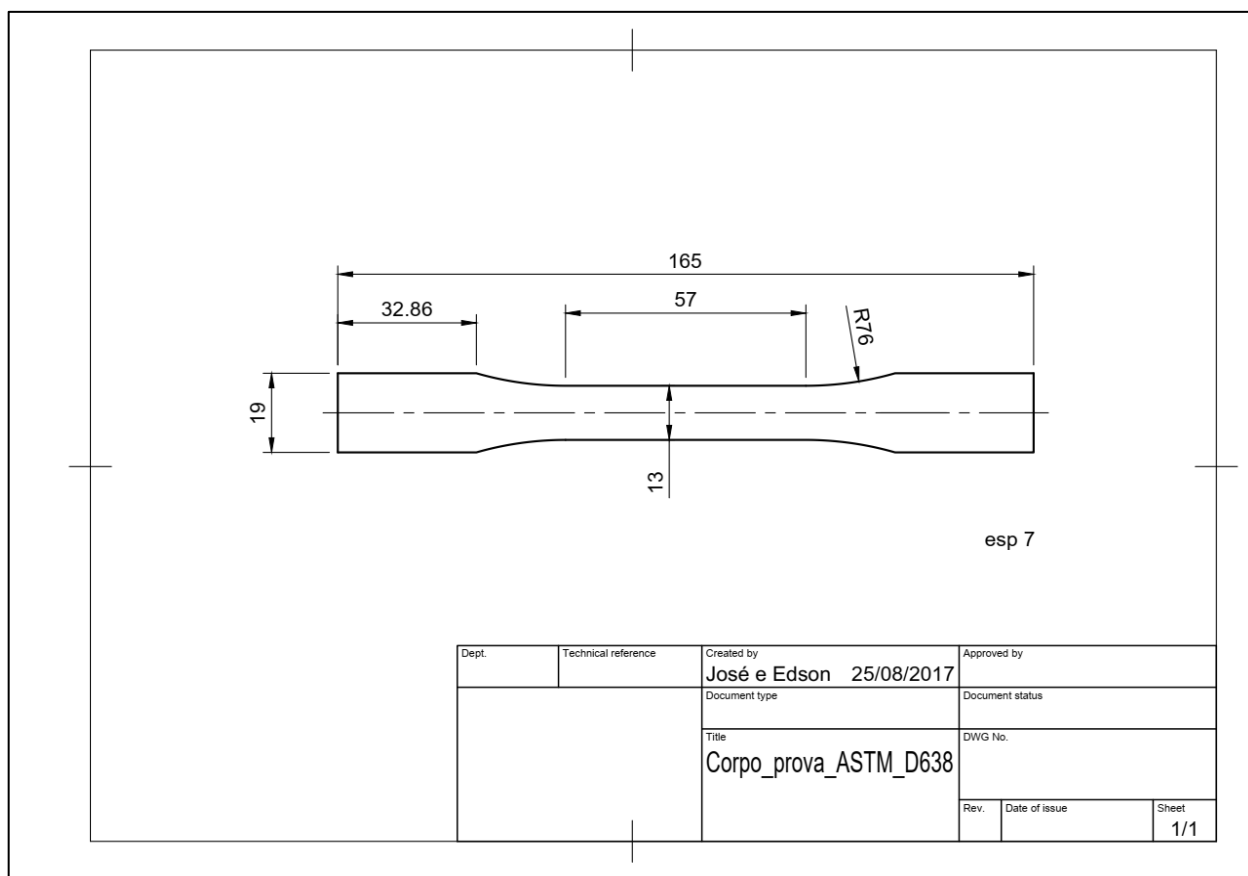
<<http://www.stampa3D-forum.it/come-funziona-stampante-3D/>>. Acesso em 17/06/2017

< <http://koenigsegg.com/one1/>>. Acesso em 21/06/2017.

<<http://blog.stratasys.com/2017/01/23/mclaren-racing-additive-manufacturing/>>.

Acesso em 03/06/2018.

APÊNDICE A – DESENHO CORPO DE PROVA



APÊNDICE B – ENSAIO TRAÇÃO LINEAR 5% (DADOS)

Rotina de Ensaio: Tracao - Retangular - Sem extensometro Data do Ensaio: 2018-03-17 14:09:30

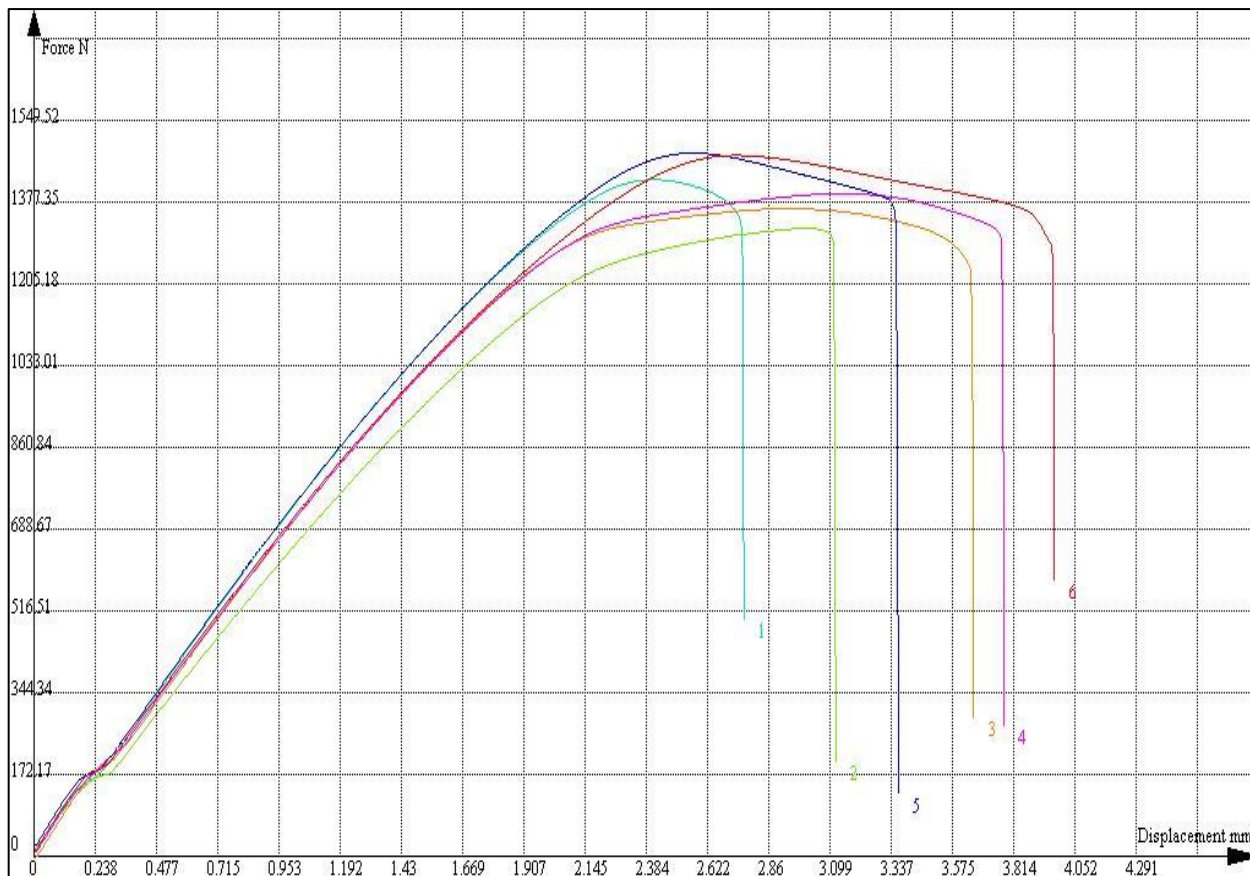
Formato do Material: Plates

Comprimento Inicial: 164.47 mm Comprimento final: 165.32 mm Diâmetro final:

Observação: Equipamento - WDW100EB Capacidade - 100kN

	Materia	Força Máxima	Tensão limite de resistência	Escoamento	Alongamento Total	Estricção	Modulo de Elasticidade	Tensão limite de resistência	Tensão limite de resistência
Unidade	(Nothing)	kN	MPa	MPa	%	%		MPa	MPa
Amostra1	pla	1.42	15.82	10.27	0.52	-0.23		15.82	15.82
Amostra2	pla	1.32	15.35	9.73	0.26	0.09		15.35	15.35
Amostra3	pla	1.36	16.00	10.23	0.80	-1.87		16.00	16.00
Amostra4	pla	1.40	16.19	10.24	0.54	0.39		16.19	16.19
Amostra5	pla	1.48	16.60	10.82	0.35	-0.08		16.60	16.60
Amostra6	pla	1.48	16.66	10.83	0.53	-2.28		16.66	16.66
Máximo valor	0	1.48	16.66	10.83	0.80	0.39	0.00	16.66	16.66
Mínimo valor	0	1.32	15.35	9.73	0.26	-2.28	0.00	15.35	15.35
Média	0	1.41	16.10	10.35	0.50	-0.66	0.00	16.10	16.10
Desvio padrão (n-1)	0	0.06	0.49	0.42	0.19	1.12	0.00	0.49	0.49

	Diâmetro	Tensão Resistencia
Unidade		MPa
Amostra1		15.82
Amostra2		15.35
Amostra3		16.00
Amostra4		16.19
Amostra5		16.60
Amostra6		16.66
Máximo valor	0.00	16.66
Mínimo valor	0.00	15.35
Média	0.00	16.10
Desvio padrão(n-1)	0.00	0.49

APÊNDICE C – ENSAIO DE TRAÇÃO LINEAR 5% (GRÁFICO)

APÊNDICE D – ENSAIO DE TRAÇÃO RETILÍNEO 5% (DADOS)

Rotina de Ensaio: Tracao - Retangular - Sem extensometro Data do Ensaio: 2018-03-17 13:26:07

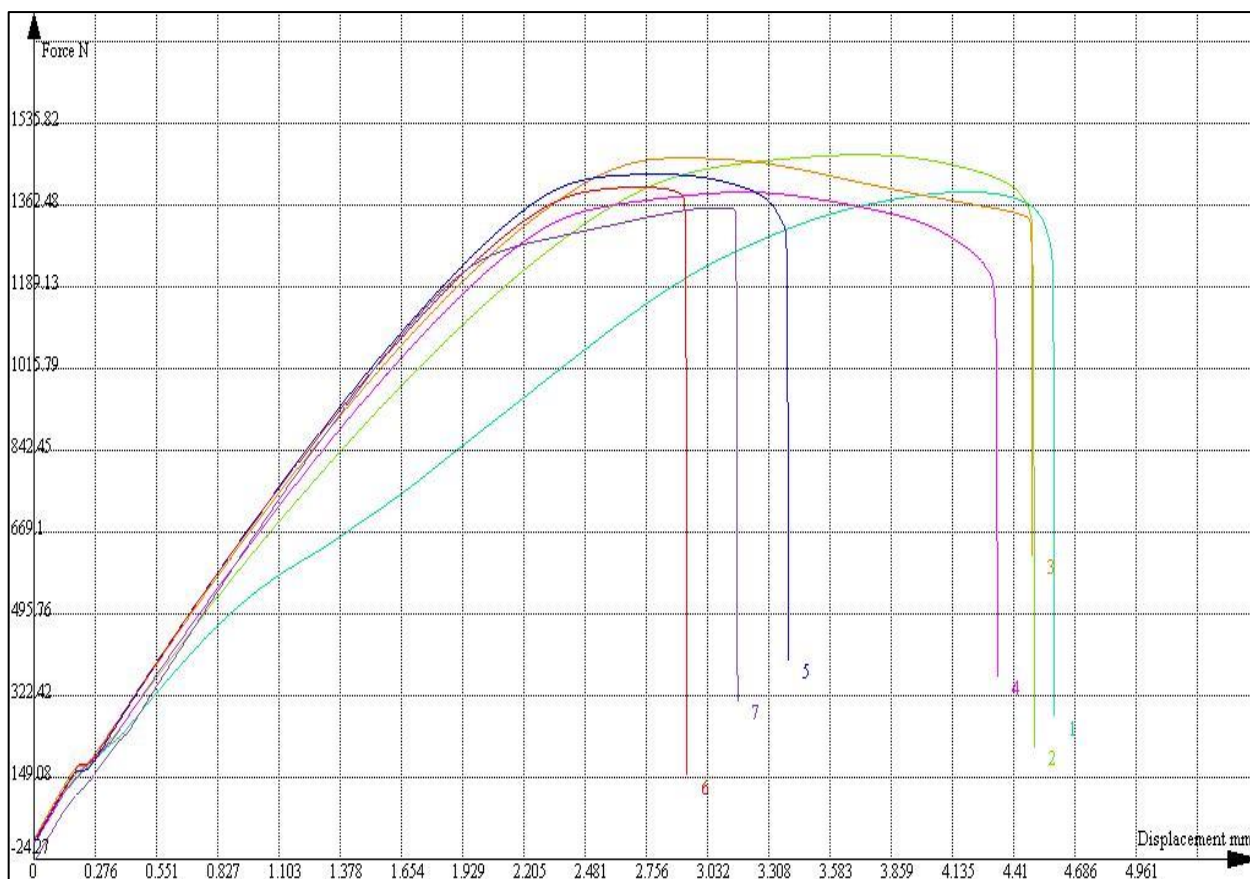
Formato do Material: Plates

Comprimento Inicial: 164.51 mm Comprimento final: 165.83 mm Diâmetro final:

Observação: Equipamento - WDW100EB Capacidade - 100kN

	Materi al	Força Máxi ma	Tensão limite de resistên cia	Escoame nto	Alongame nto Total	Estricç ão	Modulo de Elasticid ade	Tensão limite de resistên cia	Tensão limite de resistên cia
Unidad e	(Nothi ng)	kN	MPa	MPa	%	%		MPa	MPa
Amostr a1	pla	1.39	15.60	13.03	0.80	0.07		15.60	15.60
Amostr a2	pla	1.47	16.47	10.43	1.19	-0.51		16.47	16.47
Amostr a3	pla	1.46	16.42	10.66	0.75	-0.06		16.42	16.42
Amostr a4	pla	1.39	15.43	9.88	0.94	0.52		15.43	15.43
Amostr a5	pla	1.43	16.23	10.54	0.30	-0.85		16.23	16.23
Amostr a6	pla	1.40	15.74	10.24	0.22	-0.55		15.74	15.74
Amostr a7	pla	1.36	15.31	9.55	0.24	-0.05		15.31	15.31
Máxim o valor	0	1.47	16.47	13.03	1.19	0.52	0.00	16.47	16.47
Mínim o valor	0	1.36	15.31	9.55	0.22	-0.85	0.00	15.31	15.31
Média	0	1.41	15.89	10.62	0.63	-0.20	0.00	15.89	15.89
Desvio padrão (n-1)	0	0.04	0.48	1.13	0.38	0.46	0.00	0.48	0.48

	Diâmetro	Tensao Resistencia
Unidade		MPa
Amostra1		15.60
Amostra2		16.47
Amostra3		16.42
Amostra4		15.43
Amostra5		16.23
Amostra6		15.74
Amostra7		15.31
Máximo valor	0.00	16.47
Mínimo valor	0.00	15.31
Média	0.00	15.89
Desvio padrão(n-1)	0.00	0.48

APÊNDICE E – ENSAIO DE TRAÇÃO RETILÍNEO 5% (GRÁFICO)

APÊNDICE F – ENSAIO DE TRAÇÃO LINEAR 20% (DADOS)

Rotina de Ensaio: Tracao - Retangular - Sem extensometro Data do Ensaio: 2018-04-28 12:40:07

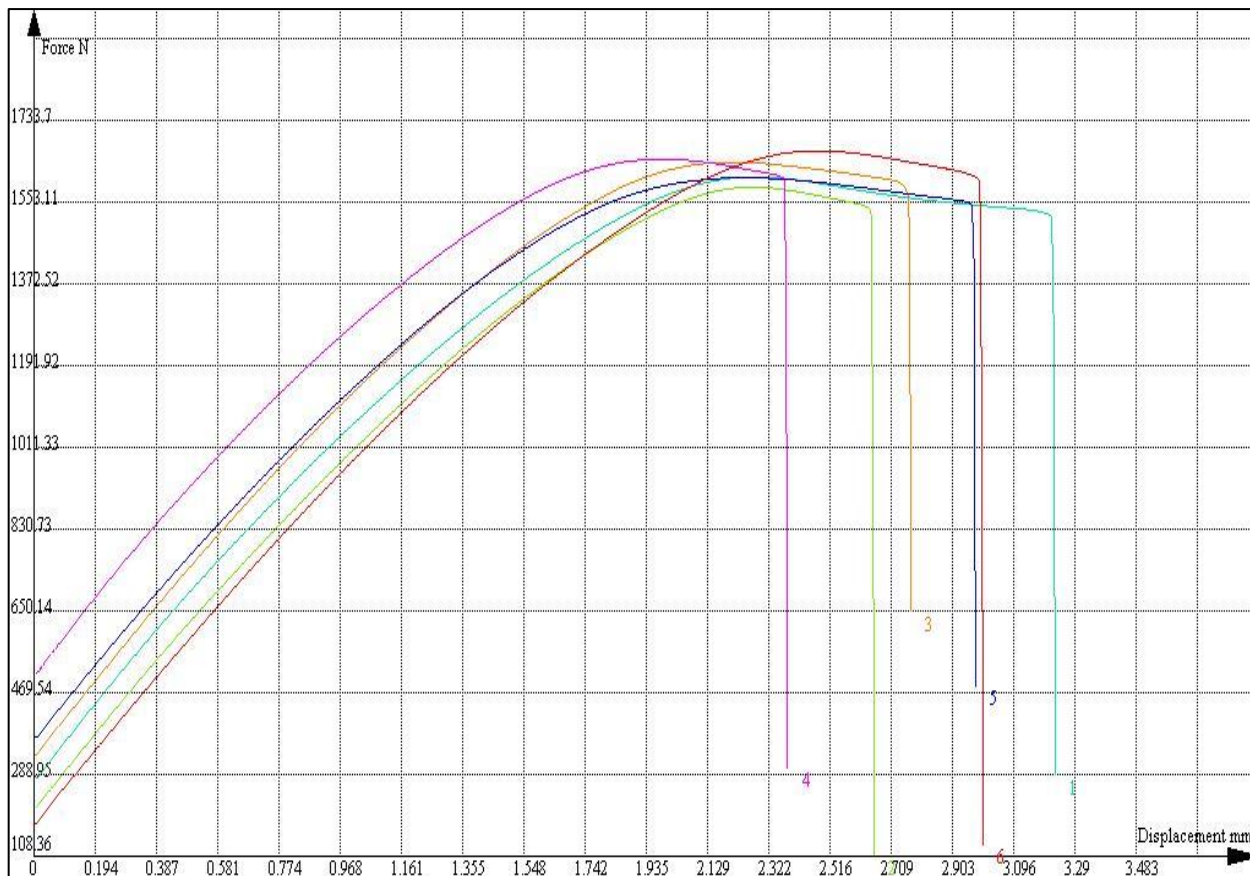
Formato do Material: Plates

Comprimento Inicial: 164.45 mm Comprimento final: 165.66 mm Diâmetro final:

Observação: Equipamento - WDW100EB Capacidade - 100kN

	Materia l	Força Máxi ma	Tensão limite de resistên cia	Escoame nto	Alongame nto Total	Estricç ão	Modulo de Elasticid ade	Tensão limite de resistên cia	Tensão limite de resistên cia
Unidad e	(Nothi ng)	kN	MPa	MPa	%	%		MPa	MPa
Amostr a1	PLA	1.61	17.86	11.62	0.74	5.66		17.86	17.86
Amostr a2	PLA	1.59	17.80	11.58	0.43	0.36		17.80	17.80
Amostr a3	PLA	1.64	19.40	12.60	0.58	-4.12		19.40	19.40
Amostr a4	PLA	1.65	19.20	12.46	0.59	0.93		19.20	19.20
Amostr a5	PLA	1.61	18.73	12.15	0.77	1.32		18.73	18.73
Amostr a6	PLA	1.67	19.49	12.71	0.74	-2.55		19.49	19.49
Máxim o valor	0	1.67	19.49	12.71	0.77	5.66	0.00	19.49	19.49
Mínim o valor	0	1.59	17.80	11.58	0.43	-4.12	0.00	17.80	17.80
Média	0	1.63	18.75	12.19	0.64	0.27	0.00	18.75	18.75
Desvio padrão (n-1)	0	0.03	0.76	0.49	0.13	3.40	0.00	0.76	0.76

	Diâmetro	Tensao Resistencia
Unidade		MPa
Amostra1		17.86
Amostra2		17.80
Amostra3		19.40
Amostra4		19.20
Amostra5		18.73
Amostra6		19.49
Máximo valor	0.00	19.49
Mínimo valor	0.00	17.80
Média	0.00	18.75
Desvio padrão(n-1)	0.00	0.76

APÊNDICE G – ENSAIO DE TRAÇÃO LINEAR 20% (GRÁFICO)

APÊNDICE H – ENSAIO DE TRAÇÃO RETILÍNEO 20% (DADOS)

Rotina de Ensaio: Tracao - Retangular - Sem extensometro Data do Ensaio: 2018-04-28 11:16:01

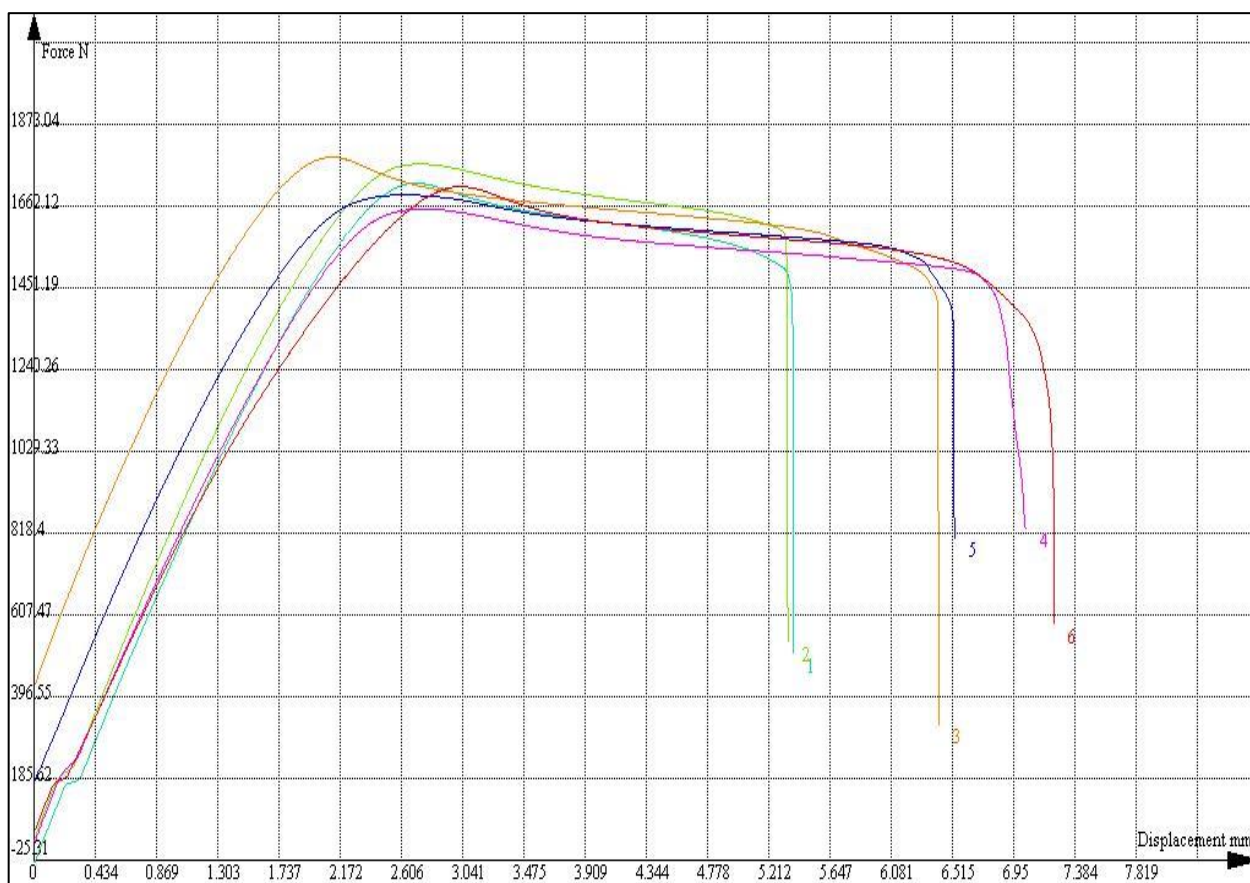
Formato do Material: Plates

Comprimento Inicial: 164.70 mm Comprimento final: 166.91 mm Diâmetro final:

Observação: Equipamento - WDW100EB Capacidade - 100kN

	Materia l	Força Máxi ma	Tensão limite de resistên cia	Escoame nto	Alongame nto Total	Estricç ão	Modulo de Elasticid ade	Tensão limite de resistên cia	Tensão limite de resistên cia
Unidad e	(Nothi ng)	kN	MPa	MPa	%	%		MPa	MPa
Amostr a1	PLA	1.72	18.65	12.13	1.34	7.36		18.65	18.65
Amostr a2	PLA	1.77	19.70	12.82	1.53	3.74		19.70	19.70
Amostr a3	PLA	1.79	19.53	12.72	2.46	3.98		19.53	19.53
Amostr a4	PLA	1.65	17.92	11.67	3.02	3.13		17.92	17.92
Amostr a5	PLA	1.69	18.49	11.97	2.59	5.49		18.49	18.49
Amostr a6	PLA	1.71	18.62	12.01	2.86	2.77		18.62	18.62
Máxim o valor	0	1.79	19.70	12.82	3.02	7.36	0.00	19.70	19.70
Mínim o valor	0	1.65	17.92	11.67	1.34	2.77	0.00	17.92	17.92
Média	0	1.72	18.82	12.22	2.30	4.41	0.00	18.82	18.82
Desvio padrão (n-1)	0	0.05	0.67	0.45	0.70	1.72	0.00	0.67	0.67

	Diâmetro	Tensao Resistencia
Unidade		MPa
Amostra1		18.65
Amostra2		19.70
Amostra3		19.53
Amostra4		17.92
Amostra5		18.49
Amostra6		18.62
Máximo valor	0.00	19.70
Mínimo valor	0.00	17.92
Média	0.00	18.82
Desvio padrão(n-1)	0.00	0.67

APÊNDICE I – ENSAIO DE TRAÇÃO RETILÍNEO 20% (GRÁFICO)

APÊNDICE J – ENSAIO DE TRAÇÃO LINEAR 50% (DADOS)

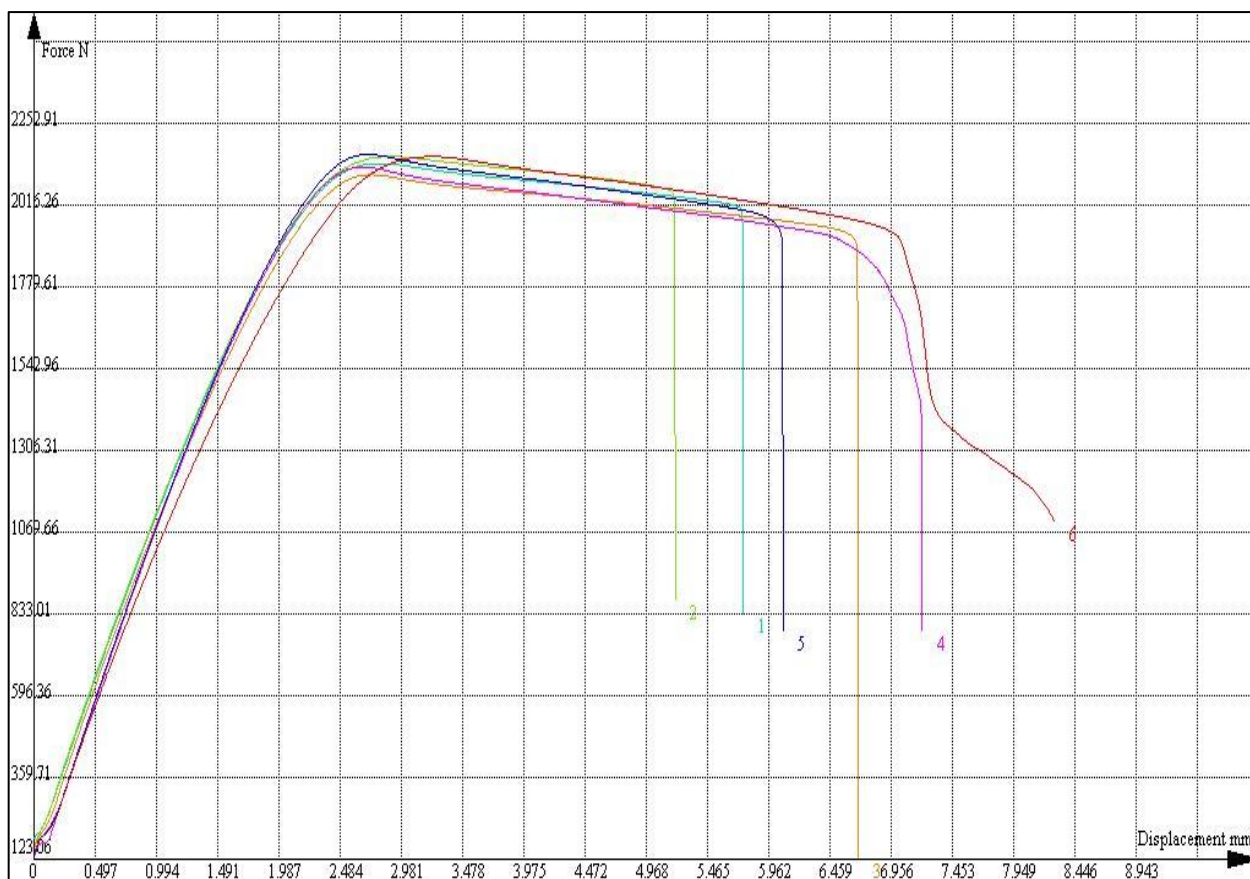
Rotina de Ensaio: Tracao - Retangular - Sem extensometro Data do Ensaio: 2018-04-28 12:59:01

Formato do Material: Plates

Comprimento Inicial: 164.45 mm Comprimento final: 166.78 mm Diâmetro final:

Observação:		Equipamento - WDW100EB					Capacidade - 100kN		
	Materia l	Força Máxi ma	Tensão limite de resistên cia	Escoame nto	Alongame nto Total	Estricç ão	Modulo de Elasticid ade	Tensão limite de resistên cia	Tensão limite de resistên cia
Unidad e	(Nothi ng)	kN	MPa	MPa	%	%		MPa	MPa
Amostr a1	PLA	2.14	23.78	15.42	1.42	-0.83		23.78	23.78
Amostr a2	PLA	2.16	23.85	15.38	1.23	-0.48		23.85	23.85
Amostr a3	PLA	2.10	23.28	15.11	2.09	1.86		23.28	23.28
Amostr a4	PLA	2.13	23.73	15.41	2.80	-1.33		23.73	23.73
Amostr a5	PLA	2.16	24.26	15.80	2.09	0.89		24.26	24.26
Amostr a6	PLA	2.16	24.17	15.49	3.94	-3.80		24.17	24.17
Máxim o valor	0	2.16	24.26	15.80	3.94	1.86	0.00	24.26	24.26
Mínim o valor	0	2.10	23.28	15.11	1.23	-3.80	0.00	23.28	23.28
Média	0	2.14	23.85	15.44	2.26	-0.62	0.00	23.85	23.85
Desvio padrão (n-1)	0	0.02	0.35	0.22	0.99	1.96	0.00	0.35	0.35

	Diâmetro	Tensao Resistencia
Unidade		MPa
Amostra1		23.78
Amostra2		23.85
Amostra3		23.28
Amostra4		23.73
Amostra5		24.26
Amostra6		24.17
Máximo valor	0.00	24.26
Mínimo valor	0.00	23.28
Média	0.00	23.85
Desvio padrão(n-1)	0.00	0.35

APÊNDICE K – ENSAIO DE TRAÇÃO LINEAR 50% (GRÁFICO)

APÊNDICE L – ENSAIO DE TRAÇÃO RETILÍNEO 50% (DADOS)

Rotina de Ensaio: Tracao - Retangular - Sem extensometro Data do Ensaio: 2018-04-28 12:14:53

Formato do Material: Plates

Comprimento Inicial: 164.54 mm Comprimento final: 168.52 mm Diâmetro final:

Observação: Equipamento - WDW100EB Capacidade - 100kN

	Materia l	Força Máxi ma	Tensão limite de resistên cia	Escoame nto	Alongame nto Total	Estricç ão	Modulo de Elasticid ade	Tensão limite de resistên cia	Tensão limite de resistên cia
Unidad e	(Nothi ng)	kN	MPa	MPa	%	%		MPa	MPa
Amostr a1	PLA	2.11	23.58	15.17	2.42	2.68		23.58	23.58
Amostr a2	PLA	2.14	23.98	15.52	2.19	3.34		23.98	23.98
Amostr a3	PLA	2.13	23.67	15.10	2.99	3.69		23.67	23.67
Amostr a4	PLA	2.20	24.36	15.85	1.54	1.00		24.36	24.36
Amostr a5	PLA	2.19	24.11	15.63	1.85	-1.07		24.11	24.11
Amostr a6	PLA	2.19	24.07	15.48	0.56	-2.01		24.07	24.07
Máxim o valor	0	2.20	24.36	15.85	2.99	3.69	0.00	24.36	24.36
Mínim o valor	0	2.11	23.58	15.10	0.56	-2.01	0.00	23.58	23.58
Média	0	2.16	23.96	15.46	1.93	1.27	0.00	23.96	23.96
Desvio padrão (n-1)	0	0.04	0.29	0.28	0.83	2.38	0.00	0.29	0.29

	Diâmetro	Tensao Resistencia
Unidade		MPa
Amostra1		23.58
Amostra2		23.98
Amostra3		23.67
Amostra4		24.36
Amostra5		24.11
Amostra6		24.07
Máximo valor	0.00	24.36
Mínimo valor	0.00	23.58
Média	0.00	23.96
Desvio padrão(n-1)	0.00	0.29

APÊNDICE M – ENSAIO DE TRAÇÃO RETILÍNEO 50% (GRÁFICO)