

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
MARIO GUSTAVO RIBEIRO ROCHA

**OTIMIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM RELAÇÃO AO TEMPO DE
FABRICAÇÃO DE PEÇAS FABRICADAS EM IMPRESSORAS 3D FDM
CONFORME NORMA ISO 527**

CASCAVEL – PR

2019

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
MARIO GUSTAVO RIBEIRO ROCHA

**OTIMIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM RELAÇÃO AO TEMPO DE
FABRICAÇÃO DE PEÇAS FABRICADAS EM IMPRESSORAS 3D FDM
CONFORME NORMA ISO 527**

Trabalho apresentado à disciplina TCC – Projeto como requisito parcial para obtenção da aprovação semestral no Curso de Engenharia Mecânica pelo Centro Universitário Assis Gurgacz.

Professor Orientador: Carlos Alberto Breda

CASCADEL – PR

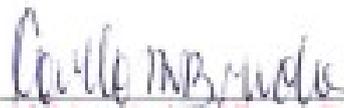
2019

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
MARIO GUSTAVO RIBEIRO ROCHA**

**OTIMIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM RELAÇÃO AO TEMPO DE
FABRICAÇÃO DE PEÇAS FABRICADAS EM IMPRESSORAS 3D FDM**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do Professor (a) *Carlos Alberto Breda*

BANCA EXAMINADORA



Orientador Prof. Msc. Carlos Alberto Breda
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico



Professor Msc. Sérgio Henrique Rodrigues Mota
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico



Professor Msc. Fabiane Sorbar Fontana
Centro Universitário Assis Gurgacz
Ciência da Computação

Cascavel, 28 de novembro de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e aos meus avós, pelo suporte e compreensão, fontes de minha extrema motivação. Agradeço também a todos os professores que me acompanharam durante a graduação, em especial ao Prof. Carlos Alberto Breda, responsável pela realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Sirlei Ribeiro da Silva Rocha e Mario Ivan da Rocha, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

A Impressão 3D foi criada em 1984 por Chuck Hull, um engenheiro físico dos Estados Unidos da América, desde então vem se modernizando e adentrando nas mais diversas áreas, nos últimos anos vem se popularizando as impressoras FDM(*Fused Deposition Modeling*), em tradução livre, modelagem por fusão e deposição, por ter um segmento de entrada para o consumidor comum, o que fez que muitas pessoas adquirissem e as utilizassem para projetos pessoais e prestação de serviços, porém esse modelo de impressora possui o grande limitador que é o tempo de fabricação que dependendo da peça em questão pode demorar diversas horas até mesmos vários dias para que seja finalizada. Pensando nisso diversos software conhecidos como aplicativo de fatiamento para impressoras 3D do inglês *3D Printer Slicing Application* disponibiliza que você possa alterar o preenchimento interno das peças em diversos tipos de malha e diversos níveis de preenchimento, que possibilita a otimização das impressões diminuindo material e tempo necessários, porém os mesmos não consegue simular a resistência mecânica que a peça adquire utilizando esses métodos, por isso é necessário um estudo que possa quantificar a resistência mecânica que essas peças adquirem ao se utilizar esses métodos e propor um preenchimento que atenda os requisitos de economia de tempo e material e que possua resistência mecânica para os mais diversos fins. Essa pesquisa tem como objetivo encontrar um ponto de equilíbrio entre a resistência mecânica e o consumo de material nas impressões 3D por FDM. Para isso foram fabricados corpos de prova com diferentes porcentagens de preenchimento interno em uma impressora 3D por FDM, os mesmos foram utilizados em ensaios destrutivos realizados nos laboratórios do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz para obtenção de dados que foram analisados com base na bibliografia de Resistência dos Materiais.

PALAVRAS-CHAVE: Manufatura Aditiva. Impressão FDM. Ensaio dos Materiais. Resistência a tração. Filamento em ABS.

ABSTRACT

3D Printing was created in 1984 by Chuck Hull, a physical engineer from the United States of America. Since then it has been modernizing and entering the most diverse areas. In recent years, Fused Deposition Modeling (FDM) printers have become popular, because it has a common consumer input segment, which made many people buy and use it for personal projects and service delivery, but this printer model has the big limitation that is the manufacturing time, depending on the part in question, it may take several hours or even several days to complete. With this in mind, various software known as 3D Printer Slicing Applications makes it possible for you to change the internal fill of parts in various mesh types and various fill levels, which enables you to optimize printouts by reducing material and time required, but they cannot simulate the mechanical strength that the part acquires using these methods, so a study is needed that can quantify the mechanical strength that these parts acquire by using these methods and propose a fill that meets the requirements of time and material saving and that has mechanical resistance for the most diverse purposes. This research aims to find a balance between mechanical strength and material consumption in 3D printing by FDM. For this, specimens with different internal fill percentages will be manufactured in a 3D printer by FDM, they will be used in destructive tests that will be performed in the laboratories of the Assis Gurgacz Foundation University Center to obtain data that will be analyzed based on the bibliography of Strength of Materials.

KEYWORDS: Additive Manufacturing. FDM print. Materials Testing. Tensile strength. ABS filament.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Expectativa de investimento nas impressões 3D.....	14
Figura 2: Motivos que levam a não investir em impressão 3D.....	15
Figura 3: Representação das principais etapas do processo de manufatura por camada.....	17
Figura 4: Extrusão do material na plataforma.....	19
Figura 5: Representação de uma camada de material sendo depositada com alguns parâmetros de controle.....	20
Figura 6: Propriedades do ABS utilizando o processo FDM.....	21
Figura 7: Representação esquemática do ensaio de tração.....	21
Figura 8: Esboço de curva de Tensão x Deformação de um ensaio de tração.....	22
Figura 9: Impressora Sethi3D S3.....	25
Figura 10: Recorte do Manual da impressora Sethi3D S3.....	26
Figura 11: Especificações do Filamento ABS utilizado.....	27
Figura 12: Máquina de ensaios mecânicos.....	28
Figura 13: Recorte da norma ASTM E8/E8M-09 com as medidas de corpo de prova.....	29
Figura 14: Modelo do corpo de prova feito no SolidWorks.....	30
Figura 15: Configurações de Qualidade no Cura Ultimaker 3.6.0.....	31
Figura 16: Configurações de Material no Cura Ultimaker 3.6.0.....	32
Figura 17: Configurações de Adesão da placa de construção no Cura Ultimaker 3.6.0.....	33
Figura 18: Configurações de Casca no Cura Ultimaker 3.6.0.....	34
Figura 19: Configurações de Velocidade no Cura Ultimaker 3.6.0.....	35
Figura 20: Configurações de Suporte no Cura Ultimaker 3.6.0.....	36
Figura 21: Configurações de Preenchimento no Cura Ultimaker 3.6.0.....	37

Figura 22: Gráfico dos dados de fabricação dos corpos de prova.....	38
Figura 23: Avaliação das massas dos corpos de prova utilizando balança.....	39
Figura 24: Velocidades recomendadas para o ensaio.....	40
Figura 25: Relatório do ensaio de tração axial do corpo de prova com 100% de preenchimento interno.....	41
Figura 26: Gráfico da carga máxima(kgf) dos corpos de prova.....	42
Figura 27: Gráfico da tensão máxima(MPa) dos corpos de prova.....	43
Figura 28: Corpos de prova após ruptura no ensaio de tração.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados coletados da fabricação dos corpos de prova.....	38
Tabela 2: Dados dos ensaios de tração.....	42
Tabela 3: Eficiência das porcentagens de preenchimento interno.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D – 2 Dimensões

3D – 3 Dimensões

3DP – 3 Dimensional Printing

ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene

AM – Additive Manufacturing

ASTM – American Society for Testing and Materials

CAD – Computer Aided Design

DMLS – Direct Metal Laser Sintering

FDM – Fused Deposition Modeling

g – Grama

h – Horas

IJP – Ink Jet Printing

ISO – Organização Internacional de Normalização

Kgf – Quilograma-força

LENS – Laser Engineered Net Shaping

MPa – Mega Pascal

PETG – Polietileno Tereftalato Glicol

PLA – Polylactic Acid

PLT – Paper Lamination Technology

psi – Libra força por polegada quadrada

SL – Stereolithography

SLS – Selective Laser Sintering

UV – Radiação Ultravioleta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 ASSUNTO / TEMA.....	13
1.2 OBJETIVO.....	13
1.2.1 Objetivo Geral.....	13
1.3 JUSTIFICATIVA.....	14
1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	16
1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 MANUFATURA ADITIVA.....	17
2.1.1 Modelagem por fusão e deposição.....	19
2.1.1.1 Filamento em ABS.....	20
2.2 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	21
2.2.1 Região de comportamento elástico (0A).....	23
2.2.2 Região de escoamento (AB).....	23
2.2.3 Região de comportamento plástico (BF).....	24
3 METODOLOGIA.....	25
3.1 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS NECESSÁRIOS.....	25
3.2 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	29
3.3 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS.....	39
3.4 ANÁLISE DOS DADOS.....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
APÊNDICES.....	49
ANEXOS.....	68

1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D se popularizou no Brasil nos últimos anos, segundo o especialista Jorge Lopes, professor de Design da PUC-Rio e coordenador do Núcleo de Experimentação Tridimensional, em entrevista dada a Frabalise (2018) em sua matéria para Revista Época NEGÓCIOS, o mesmo diz que estamos em um patamar onde a tecnologia se encontra amadurecida o bastante para fornecer mais inovação nas mais diversas áreas de atuação. O mesmo nos conta que a tecnologia mais disseminada no Brasil é a que usa filamentos de plástico, a impressora 3D FDM (Fused Deposition Modeling).

O autor Volpato (2007, p.70), cita como uma deficiência do processo de impressão FDM a velocidade de impressão, o mesmo o considera lenta devido ela ser limitada pela taxa de fluxo de material na cabeça de extrusão. Buscando amenizar essa deficiência este trabalho terá seu foco no estudo das impressoras 3D FDM e na diminuição do tempo de impressão mantendo uma boa resistência mecânica.

Para amenizar esse problema o estudo procura encontrar uma taxa de preenchimento que forneça uma maior resistência mecânica em relação ao tempo de fabricação possibilitando diminuir o tempo de fabricação sem perdas drásticas na resistência mecânica, porém também a possibilidade que através dos dados coletados nos experimentos a diminuição do preenchimento interno cause uma deficiência drástica na resistência mecânica da peça tornando inviável a redução do tempo de impressão sem deixar a impressão frágil.

Este trabalho tem como objetivo encontrar a melhor taxa de preenchimento interno que garanta a melhor resistência mecânica em relação ao tempo gasto de fabricação para impressões 3D que utilizem impressoras FDM, para atender esse objetivo foram confeccionados corpos de prova em ABS com diversas taxas de preenchimento interno entre os corpos de prova, para fabricação do mesmo foi utilizado uma impressora do tipo FDM, esses foram ensaiados mecanicamente para obter os diagramas de tensão e deformação para realização do estudo.

Estudos na área das três dimensões é fundamental, tanto que a autora Amaro (2019) em sua matéria na Revista EXAME fala que segundo o relatório O Futuro do Trabalho 2018, do Fórum Econômico Mundial, diz que 49% das empresas no Brasil, de diversas áreas de

atuação, efetuará investimentos no setor das três dimensões até 2022 e, conforme um estudo realizado pelo banco americano Goldman Sachs, essa é uma das oito tecnologias que vão mudar os negócios.

Este trabalho trata-se de uma pesquisa experimental onde os corpos de prova de ABS foram o grupo de controle, esses corpos de prova possuem diversas taxas de preenchimento interno, ou seja, a variável que será manipulada é o preenchimento interno, para que ao fim dos ensaios mecânicos obtenha-se os dados necessários para a análise.

Esta pesquisa possui a estrutura dividida em quatro capítulos principais. O primeiro capítulo apresenta os aspectos principais da pesquisa que consiste em objetivo geral, objetivos específicos, justificativa, caracterização do problema e delimitação da pesquisa. O segundo capítulo é composto pela revisão bibliográfica que é composta pela fundamentação teórica necessária para compreensão da pesquisa realizada. O terceiro capítulo contém toda a metodologia utilizada na realização da pesquisa. O último capítulo consiste nos resultados obtidos através da pesquisa e as discussões geradas por esses resultados.

1.1 ASSUNTO / TEMA

O assunto do referido trabalho é sobre Manufatura Aditiva.

O tema abordará como o preenchimento afeta a resistência mecânica de peças fabricadas através da impressão 3D FDM, buscando opções para otimização de material e tempo gastos na fabricação.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

Encontrar a menor taxa de preenchimento, que maximize a resistência mecânica e a economia de tempo e material nas impressões 3D do tipo FDM.

1.2.2 Objetivos Específico

- Definir equipamentos que serão utilizados;

- Criar o modelo do corpo de prova;
- Definir material e tipo de preenchimento dos corpos de prova;
- Realizar ensaios destrutivos em laboratório;
- Avaliar os resultados dos ensaios destrutivos em laboratório.

1.3 JUSTIFICATIVA

O que impulsionou a realização deste trabalho foi a busca de melhorar o processo das impressões 3D que nos equipamentos convencionais de impressão demandam um tempo relativamente alto, através dessa pesquisa procura-se minimizar esse problema visto que a autora Amaro (2019) em sua matéria na Revista EXAME diz que as impressoras 3D possui uma atraente versatilidade que ocasiona o aumento no número de interessados pela tecnologia. Conforme um estudo feito pela consultoria Wohler Associates, o número de fabricantes desses equipamentos subiu de 97, em 2016, para 135, em 2017.

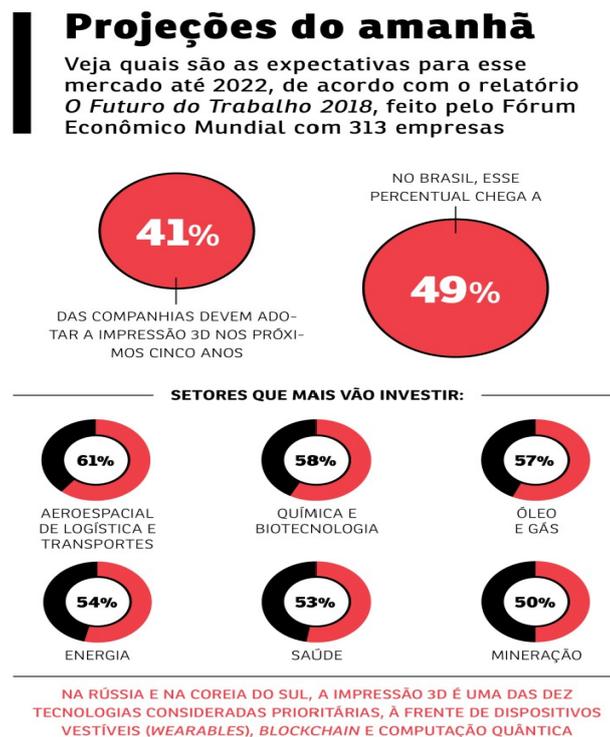


Figura 1: Expectativa de investimento nas impressões 3D

Fonte: Revista EXAME¹ (2019)

¹ Disponível em: https://abrilexame.files.wordpress.com/2019/01/vc248_3d-1.png. Acesso em dez. 2019.

Esta obra possui também o intuito de incentivar outras pesquisas na área e alerta sobre a possibilidade de ingressar neste ramo visto que existe hoje uma carência de mão de obra que entenda como trabalhar com esta técnica. E quem estiver na dianteira dessa onda terá destaque. Claudio Raupp, presidente da HP nos fala que “O 3D vai impactar todas as indústrias, da comunicação às ciências aplicadas.”

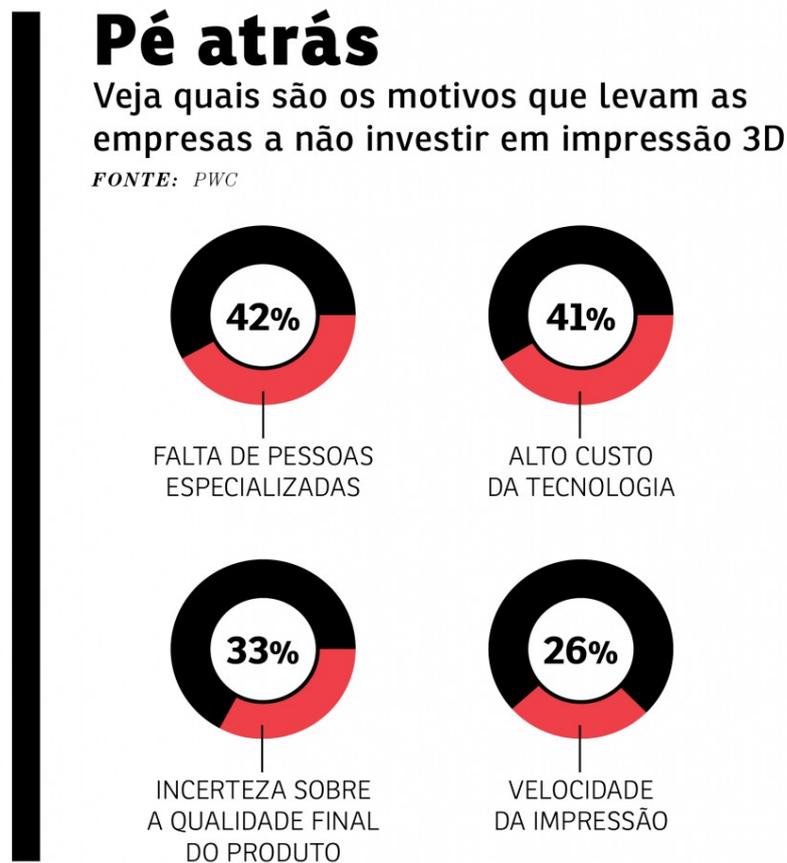


Figura 2: Motivos que levam a não investir em impressão 3D

Fonte: Revista EXAME² (2019)

Esse estudo é de grande importância pois visa melhorar uma das deficiências do processo de impressão 3D e se não for incentivado pesquisas nesse âmbito poderá haver um desinteresse nesses equipamentos que possibilita inúmeras inovações, o que poderá acarretar na diminuição de incontáveis outras ideias.

² Disponível em: https://abrilexame.files.wordpress.com/2019/01/vc248_3d-4.png. Acesso em dez. 2019.

Esse estudo é dirigido ao Movimento Maker, ou seja, entusiastas que fazem da impressão 3D o seu negócio, o mesmo tem a finalidade de otimizar os seus processos, além de despertar o interesse de todos os outros ramos que queiram investir e inovar com a impressão 3D e de incentivar toda a comunidade acadêmica sobre o uso da impressora 3D na busca de inovação e por último, mas não menos importante buscar popularizar o uso de tecnologia 3D em nossa sociedade.

Com base nos princípios de resistência dos materiais é possível realizar ensaio mecânicos com corpos de provas impressos em 3D que nos possibilitará determinar melhores configurações de impressão para otimizar inúmeros processos que utilizam dessa tecnologia.

1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A busca por um preenchimento na impressão 3D que garanta uma resistência mecânica elevada sem a necessidade da peça ser maciça, busca promover uma redução de material e de tempo operação deste processo, tanto em grandes empresas como pequenos sistemas utilizados em domicílio. As configurações para impressão 3D permitem alterar o preenchimento interno da peça, através disto surge o problema a ser abordado ao longo desta pesquisa.

Qual a menor taxa de preenchimento, que maximize a resistência mecânica e a economia de tempo e material de impressoras 3D FDM?

1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O estudo terá seu foco nas impressoras FDM, a impressora utilizada nessa pesquisa foi a Sethi3D S3 utilizando o filamento de ABS, de todas as resistências mecânicas que o ABS possui, foi avaliado somente a sua resistência a tração axial com a utilização da MÁQUINA UNIVERSAL ELETRÔNICA DIGITAL CAPACIDADE 100T, HIDRÁULICA I-3058. Não foi abordado ao longo da pesquisa as diversas propriedades mecânicas adquiridas pelas peças em função de seu formato e usando outros materiais e equipamentos, visto que a peça testada será um corpo de prova padrão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MANUFATURA ADITIVA

Segundo Gorni (2001) a Manufatura Aditiva ou AM, de *Additive Manufacturing*, tem sua origem em um conjunto de tecnologias que são utilizadas para se fabricar objetos físicos diretamente a partir de uma fonte de dados gerada por um software de desenho em um computador CAD. Essas técnicas têm suas peculiaridades, uma vez que eles agregam e ligam materiais, camada a camada, formando o objeto. Observa-se muitas vantagens em diversas aplicações quando comparado com os processos de fabricação clássicos baseados em remoção de material, tais como fresamento ou torneamento.

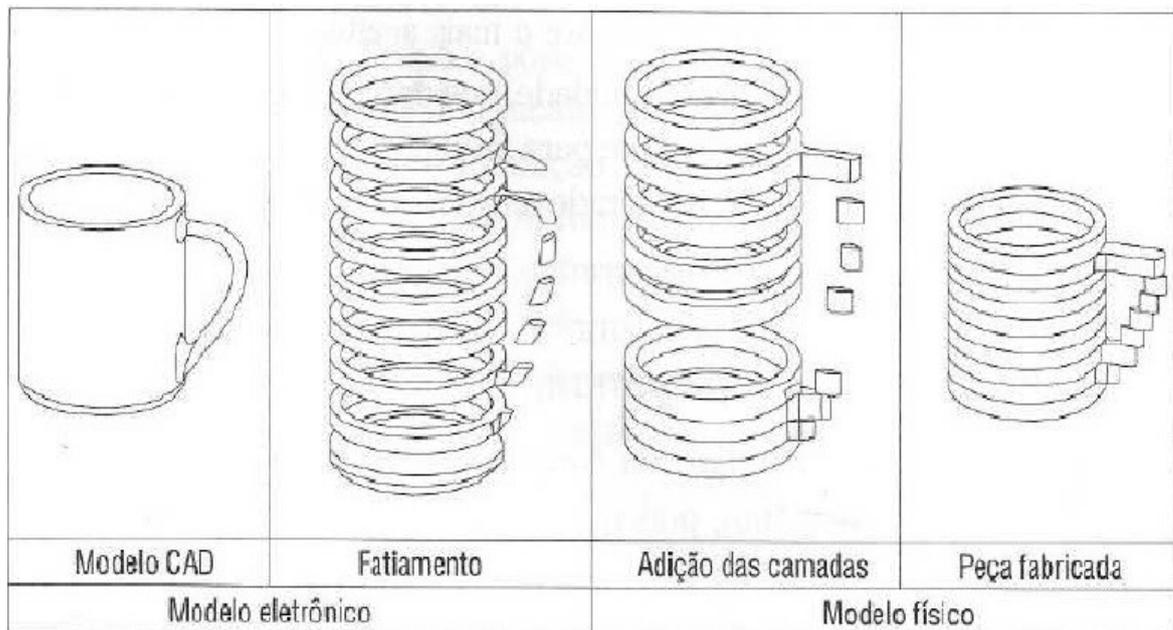


Figura 3: Representação das principais etapas do processo de manufatura por camada

Fonte: Volpato et al. (2007, p. 4)

O autor Volpato et al. (2007, p. 3) nos diz que a AM é definida como um processo de fabricação que utiliza da adição de material em formato de camadas planas sucessivas utilizando do princípio da manufatura por camada. Essa técnica possibilita a fabricação de diversos componentes como protótipos, modelos, objetos físicos em três dimensões, utilizando das informações adquiridas do modelo geométrico gerado em um sistema CAD, de forma veloz, automatizada e totalmente maleável.

O processo começa com o modelo 3D da peça no CAD sendo “fatiado” eletronicamente, onde se obtêm as curvas de níveis em 2D que estabelecerá em cada camada onde existe ou não material a ser adicionado, essas camadas serão processadas sequencialmente gerando a peça física através do empilhamento e aderência das camadas seguintes, começando sempre da base e deslocando até o topo da mesma.

Os processos de AM modernos mais importantes podem ser agrupados de acordo com o estado ou forma inicial da matéria-prima utilizada para fabricação das peças. Sendo assim possível classificá-los em processos baseados em Líquido, Sólido e Pó. Logo obtêm-se:

- Baseados em Líquido: a matéria-prima utilizada para fabricar a peça encontra-se no estado líquido, antes de ser processada. Nesta categoria, encontram-se as tecnologias que envolvem a polimerização de uma resina líquida por um laser UV (ex. Estereolitografia ou SL, de *StereoLithography*), ou o jateamento de resina líquida por um cabeçote tipo jato de tinta e posterior cura pela exposição a uma luz UV (ex. Impressão a Jato de Tinta ou IJP, de *Ink Jet Printing*), entre outros. (VOLPATO et al., 2007, p. 9)
- Baseados em Sólido: nestes processos o material utilizado encontra-se no estado sólido, podendo estar na forma de filamento, lâmina, ou outra qualquer. Alguns dos processos fundem o material, antes da sua deposição (ex. Modelagem por Fusão e Deposição — FDM, de *Fused Deposition Modeling*). Outros somente recortam uma lâmina do material adicionado (ex. Manufatura Laminar de Objetos — LOM, de *Laminated Object Manufacturing*, Tecnologia com Lâminas de Papel ou PLT, de *Paper Lamination Technology*). (VOLPATO et al., 2007, p. 9)
- Baseados em Pó: a matéria-prima está na forma de pó antes do processamento. Pode-se utilizar laser para o seu processamento (ex. Sinterização Seletiva a Laser ou SLS, de *Selective Laser Sintering*, Sinterização Direta de Metal a Laser ou DMLS, de *Direct Metal Laser Sintering*, Fabricação da Forma Final a Laser ou LENS, de *Laser Engineered Net Shaping*) ou um aglutinante aplicado por um cabeçote tipo jato de tinta (ex. Impressão Tridimensional 3DP, de *3 Dimensional Printing*) entre outros processos. (VOLPATO et al., 2007, p. 10)

2.1.1 Modelagem por fusão e deposição

Para Gibson, Stucker e Rosen (2015, p. 157) de longe, a tecnologia baseada em que utiliza da extrusão de material mais comum é a FDM, produzida e desenvolvida pela Stratasys, EUA. O FDM usa uma câmara de aquecimento para liquefazer o polímero que é alimentado no sistema em forma de um filamento. O filamento é empurrado para dentro da câmara por um arranjo de rodas tratoras e é esse o empurrão que gera a pressão de extrusão, ao mesmo tempo que cabeçote do extrusor se movimenta nos eixos X-Y enquanto a plataforma possui um mecanismo de elevador que se desloca no eixo Z.

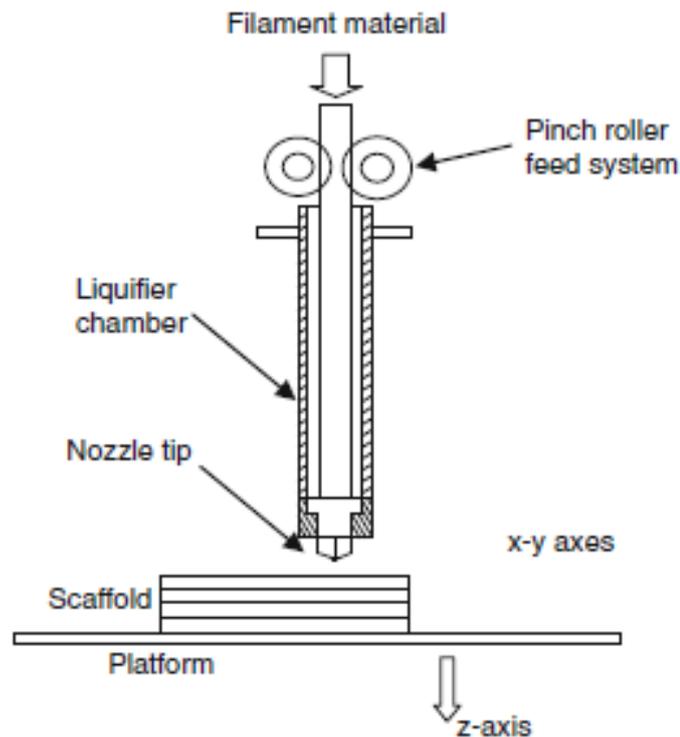


Figura 4: Extrusão do material na plataforma

Fonte: Gibson, Stucker e Rosen (2015, p. 145)

Os autores Gibson, Stucker e Rosen (2015, p. 157) afirmam que a patente inicial do FDM foi concedida ao fundador da Stratasys, Scott Crump, em 1992, e a empresa foi fortalecendo-se ao ponto de haver mais máquinas FDM do que qualquer outro tipo de máquina AM no mundo. A principal força do FDM está na gama de materiais e nas propriedades mecânicas efetivas das peças resultantes feitas usando essa tecnologia. As peças

feitas usando FDM estão entre as mais fortes para qualquer processo de fabricação de aditivo baseado em polímero. A principal desvantagem de usar essa tecnologia é a velocidade de construção. Como mencionado anteriormente, a inércia das cabeças de plotagem significa que as velocidades máximas e acelerações que podem ser obtidas são um pouco menores do que outros sistemas. Além disso, o FDM exige que o material seja plotado em uma maneira vetorial que envolve muitas mudanças de direção.

Segundo Volpato et al. (2007, p. 68) os principais parâmetros que são possível de controlar no processo FDM nas configurações para fabricação são: espessura da camada, espessura do filamento no preenchimento e contorno, fresta (gap) entre filamentos depositados.

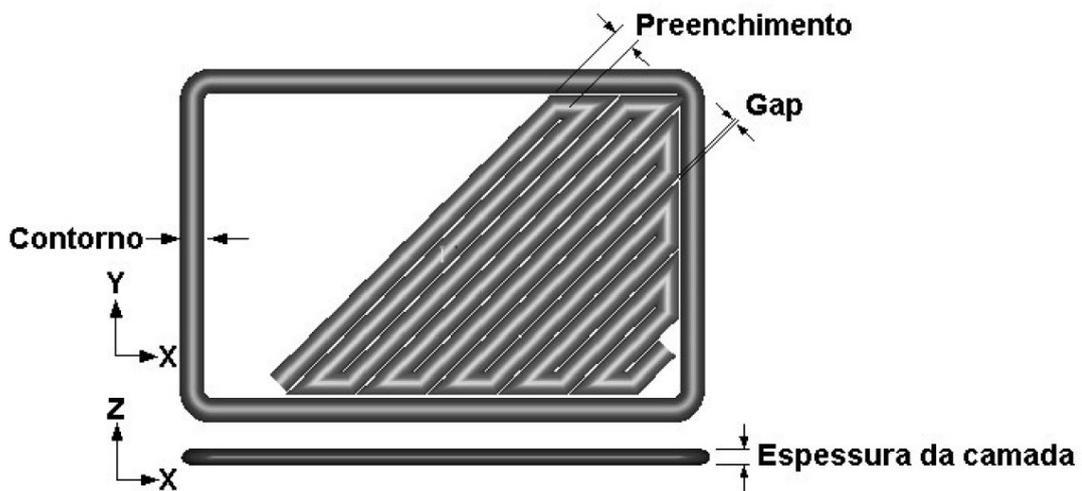


Figura 5: Representação de uma camada de material sendo depositada com alguns parâmetros de controle

Fonte: Volpato et al. (2007, p. 69)

2.1.1.1 Filamento em ABS

Conforme Gibson, Stucker e Rosen (2015, p. 159) o material mais popular é o material ABSplus, que pode ser usado em todas as máquinas FDM da Stratasys. Esta é uma versão atualizada do ABS original (acrilonitrila butadieno estireno) material que foi desenvolvido anteriormente para tecnologia FDM. Usuários interessados em um efeito translúcido podem optar pelo material ABSi, que possui propriedades semelhantes a outros

materiais na faixa do ABS. Algumas máquinas também possuem opção para ABS misturado com policarbonato.

Property	ABS	ABSi	ABSplus	ABS/PC
Tensile strength	22 MPa	37 MPa	36 MPa	34.8 MPa
Tensile modulus	1,627 MPa	1,915 MPa	2,265 MPa	1,827 MPa
Elongation	6%	3.1%	4%	4.3%
Flexural strength	41 MPa	61 MPa	52 MPa	50 MPa
Flexural modulus	1,834 MPa	1,820 MPa	2,198 MPa	1,863 MPa
IZOD impact	106.78 J/m ²	101.4 J/m ²	96 J/m ²	123 J/m ²
Heat deflection @ 66 psi	90°C	87°C	96°C	110°C
Heat deflection @ 264 psi	76°C	73°C	82°C	96°C
Thermal expansion	5.60E-05 in/in/F	6.7E-6 in/in/F	4.90E-05 in/in/F	4.10E-5 in/in F
Specific gravity	1.05	1.08	1.04	1.2

Figura 6: Propriedades do ABS utilizando o processo FDM

Fonte: Gibson, Stucker e Rosen (2015, p. 159)

2.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Ensaio de tração para Garcia, Spim e Santos (2000, p.7) consiste na aplicação de uma carga de tração uniaxial de forma crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. O mesmo é um ensaio amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, devido à vantagem de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais. Entre as principais, destacam-se: limite de resistência à tração, limite de escoamento, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, módulo de tenacidade, ductilidade, coeficiente de encruamento e coeficiente de resistência.

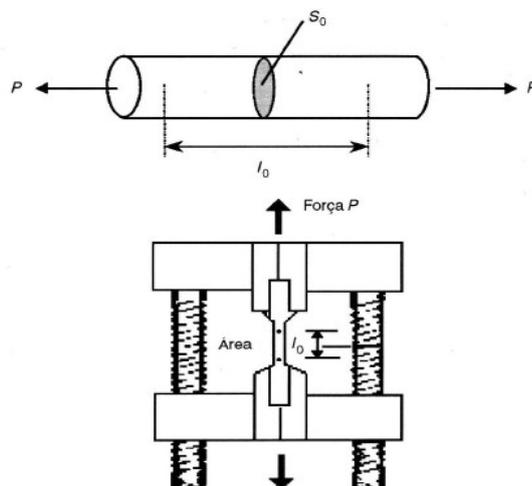


Figura 7: Representação esquemática do ensaio de tração

Fonte: Garcia, Spim e Santos (2000, p.9)

Garcia, Spim e Santos (2000, p.7) também nos diz que o ensaio de tração é amplamente utilizado como teste para o controle das especificações das matérias-primas que serão utilizadas em algum processo mecânico. Os resultados fornecidos pelo ensaio de tração são fortemente influenciados pela temperatura, pela velocidade de deformação, pela anisotropia do material, pelo tamanho de grão, pela porcentagem de impurezas, bem como pelas condições ambientais.

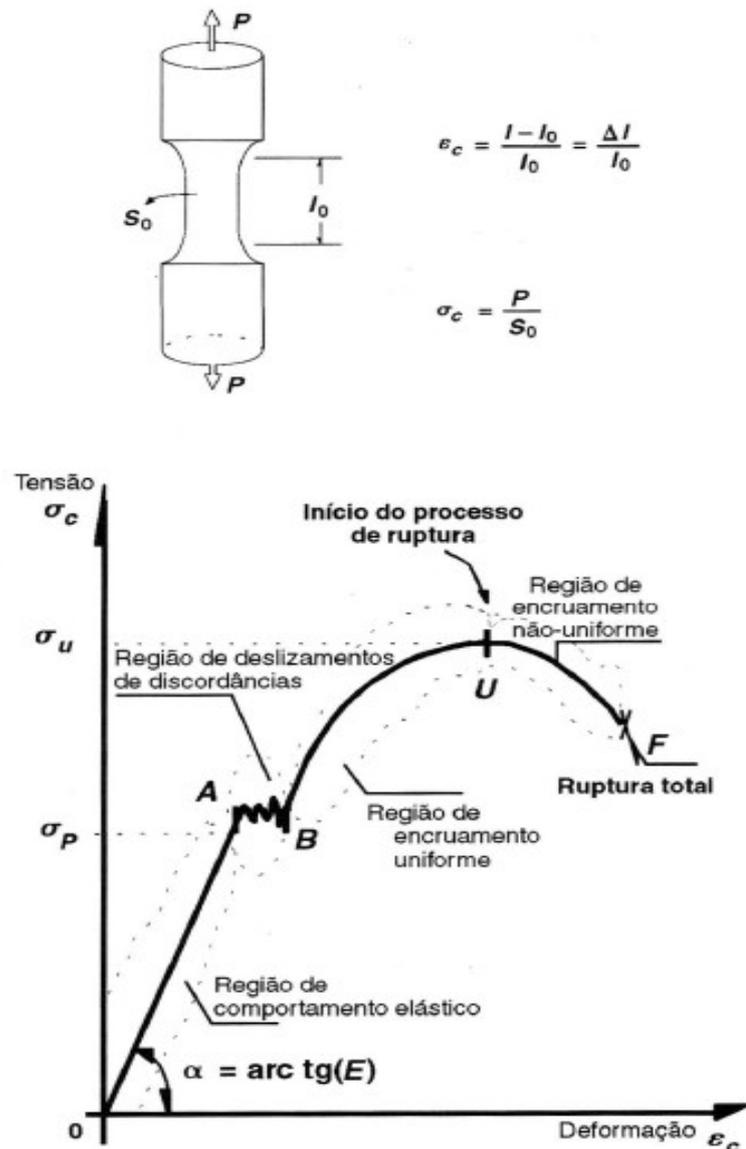


Figura 8: Esboço de curva de Tensão x Deformação de um ensaio de tração

Fonte: Garcia, Spim e Santos (2000, p.8)

A **tensão convencional**, nominal ou de engenharia (σ_c), é dada por:

$$\sigma_c = \frac{P}{S_0}$$

Onde: σ_c = tensão (Pa);

P = carga aplicada (N);

S_0 = seção transversal original (m²).

A **deformação convencional** ou nominal (ε_c), é dada por:

$$\varepsilon_c = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Onde: ε_c = deformação (adimensional);

l_0 = comprimento inicial de referência (carga zero) (m);

l = comprimento de referência para cada carga P aplicada (m).

2.2.1 Região de comportamento elástico (0A)

Quando uma amostra de um material solicitado por uma força sofre uma deformação e, após a retirada da força aplicada, recupera suas dimensões originais, esta deformação é definida como deformação elástica. (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000, p.26)

2.2.2 Região de escoamento (AB)

O escoamento é entendido como um fenômeno localizado, que se caracteriza por um aumento relativamente grande na deformação, acompanhado por uma pequena variação na tensão. Pode ser nítido, como apresentado na curva tensão—deformação da Fig. 8, ou imperceptível. A principal tensão definida na região de escoamento é o limite de escoamento,

que é a máxima tensão atingida na região de escoamento. (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000, p.26)

2.2.3 Região de comportamento plástico (BF)

A partir do ponto (B) da curva da Figura 8, o material entra na região plástica, que é caracterizada pela presença de deformações permanentes no corpo de prova. Para materiais de alta capacidade de deformação, o diagrama tensão–deformação apresenta variações relativamente pequenas na tensão, acompanhadas de grandes variações na deformação. Nessa região, pode-se determinar uma série de características do material ensaiado, como:

- Limite de resistência à tração: tensão correspondente ao ponto de máxima carga atingida durante o ensaio, igual à carga máxima dividida pela área inicial do corpo de prova. (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000, p.26)

Após o ponto (U), tem início a fase de ruptura, caracterizada por uma rápida redução local da seção de fratura (fenômeno da estrição).

- Limite de ruptura: última tensão suportada pelo material antes da fratura. (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000, p.26)

O alongamento e a estrição são medidas da ductilidade (plasticidade) do material, e definidas como se segue:

- Alongamento: diferença entre o comprimento final e o comprimento inicial do corpo de prova. (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000, p.26)

3 METODOLOGIA

Neste trabalho foi utilizado a metodologia da pesquisa experimental que segundo GIL (2002, p. 48), consiste essencialmente em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis capazes de influenciá-lo e definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. Os objetos de estudo nesta pesquisa foram os corpos de prova, que teve como variável manipulada o preenchimento interno o que resultou em diversos valores de tempo de fabricação, filamento de ABS utilizado e resistência a tração e teve como controle o corpo de prova maciço possibilitando as análises.

3.1 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS NECESSÁRIOS

A impressora 3D FDM que foi utilizada é a Sethi3D S3 por estar presente no mercado nacional e possuir numerosos usuários, a mesma possui esse nome devido a três tecnologias que possui, *Smart level* – Nivelamento automático que permite o ajuste mecânico guiado eletronicamente, *Smart Z* – Ajuste automático da altura do bico após trocas de bico, *Smart Change* – Troca rápida de bico extrusor. A mesma possui mesa aquecida e é hermeticamente fechada o que permite você trabalhar com muitos materiais, como ABS, PLA, Flexível, PETG, Nylon entre outros.



Figura 9: Impressora Sethi3D S3

Fonte: Autor (2019)

Segundo o manual de usuário da Sethi3D S3 a mesma possui as seguintes especificações conforme a Figura 12 a seguir:



ESPECIFICAÇÕES

IMPRESSÃO

Tecnologia de Impressão	Fused Filament Fabrication(FFF)
--------------------------------	---------------------------------

Volume de Impressão	270x270x320mm (23.3 Litros)
----------------------------	-----------------------------

Resolução de Camada	50 microns (0.05mm) à 300 microns (0.3mm)
----------------------------	--

Resolução de Posição	XY 12.5 microns / Z 1 micron
-----------------------------	------------------------------

Diâmetro do Filamento	1.75mm
------------------------------	--------

Diâmetro do Bico	0.4mm
-------------------------	-------

SOFTWARE

Extensões de arquivos compatíveis	.STL / .OBJ
--	-------------

Sistemas operacionais mínimos compatíveis	Windows XP / Linux / Mac OS X 10.5
--	------------------------------------

DIMENSÕES

Sem Rolo	496x496x604mm
-----------------	---------------

Com Rolo	496x590x604mm
-----------------	---------------

Peso	17kg
-------------	------

Dentro da Caixa	650x650x730mm
------------------------	---------------

Peso na Caixa	31kg
----------------------	------

ELÉTRICA

Entrada AC	110v / 220v com conversor automático
-------------------	--

Potência	700W
-----------------	------

Conectividade	USB / Cartão SD
----------------------	-----------------

Figura 10: Recorte do Manual da impressora Sethi3D S3

O filamento que alimentou a impressora é o ABS virgem puro na cor natural fornecido pela fabricante 3D Squad®, sem nenhum agregado que modifique suas características. O material possui as seguintes especificações conforme Figura 11 a seguir:

ABS 3DSQUAD SPECS				
TESTE /UNIDADE			Condição de teste	ABS 3DSQUAD
ASTM	resistência à tração	[kg/cm ² (psi)]	D638 23°C, 50mm/min	470 6,580
	alongamento	[%]	D638 23°C, 50mm/min	15
	resistência à flexão	[kg/cm ² (psi)]	D790 23°C, 2mm/min	660 9,240
	Módulo Flexural	[kg/cm ² (psi)]	D790 23°C, 2mm/min	22,500 319,500
	dureza	————	D785 r-scale	108
	impacto IZOD	[Kg-cm/cm (ft-lb/in)]	D256 23°C	28 5,1
	Distorção de calor\Temp	[°C(°F)]	D648 18,6kgf/cm	22 4,0
	Vicat Suavização	[°C(°F)]	D1525 ———	95 203
	Índice de Fluxo de Derretimento	[g/10min]	D1238 220°C, 10,0kg	35,0
	encolhimento	[%]	D955 ———	0,5~0,8
	Densidade	————	D792 23°C	1,04
	Inflamabilidade	[rating]	UL94 1/16"(1,6mm)	HB
ISO	resistência à tração	[MPa]	527 23°C, 50mm/min	44
	alongamento	[%]	527 23°C, 50mm/min	17
	resistência à flexão	[MPa]	178 23°C, 2mm/min	69
	Módulo Flexural	[MPa]	178 23°C, 2mm/min	2,400
	dureza	————	2039-2 r-scale	108
	impacto IZOD	[kJ/m ²]	180/1A 23°C	23
	Força de impacto Charpy	[kJ/m ²]	179/1eA 23°C	24
	Distorção de calor\Temp	[°C]	75-2 1,8Mpa,	80
	Vicat Suavização	[°C]	306 50N, 50°C/hr	95
	Índice de Fluxo de Derretimento	[g/10min]	1133 220°C, 10kg	35
	Encolhimento do molde	[%]	294-4 ———	0,5~0,8
	Gravidade específica	————	1183 ———	1,04
Temperatura de Impressão	ABS 3DSQUAD			
PRETO	220°C ~ 235°C			
NATURAL	230°C ~ 245°C			

Figura 11: Especificações do Filamento ABS utilizado

Fonte: Fabricante 3D Squad®³

³ Disponível em: <https://3dsquad.com.br/wp-content/uploads/2019/01/tabela-teste.jpg> (2019). Acesso em dez. 2019.

Na realização dos ensaios mecânicos foi utilizado a MÁQUINA UNIVERSAL ELETRÔNICA DIGITAL CAPACIDADE 100T, HIDRÁULICA I-3058 da marca Contenco® com a certificação NBR NM ISO 7500-1. O equipamento consiste segundo a fabricante em uma Máquina Universal de Ensaio, com capacidade de 100 toneladas, servo controlada, para realização dos ensaios mecânicos de tração axial, tração na flexão, compressão axial ou diametral, cisalhamento, dobramento e seus derivados em materiais como aço de construção civil, aço de construção mecânica, ferro fundido, concretos e outros materiais.

A mesma possui o seu software em com banco de dados em Access. Ela realiza a integração dos dispositivos que compõem o conjunto e permite o comando, controle e monitoração dos ensaios, com cadastramento de amostras e corpos de prova, traçado de gráficos, armazenamento de dados e emissão de relatórios.

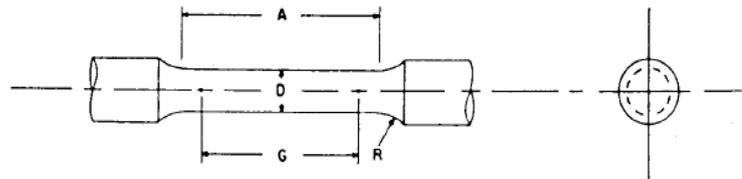


Figura 12: Máquina de ensaios mecânicos

Fonte: Autor (2019)

3.2 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A primeira etapa na fabricação é criar o projeto do modelo do corpo de prova em um software de CAD, foi empregado o software SolidWorks para realização do CAD do corpo de prova onde foi utilizado a norma ASTM E8/E8M-09, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, (American Society for Testing and Materials, 2010, p.6) para determinar as dimensões do corpo de prova. Para um melhor encaixe na máquina de ensaios de mecânicos optou-se por um corpo de prova maior que o padrão, porém seguindo a norma foi utilizado a proporcionalidade das medidas. Será utilizada esta norma devido ser a única encontrada que possui corpos de prova cilíndricos com volume razoável para que o preenchimento interno interfira quantitativamente no tempo de fabricação, por ser mais fácil de fixar na máquina de ensaios, pois não estava disponível adaptadores para o formato de corpo de prova da norma ISO 527, o mesmo é mais “fino” é por isso é possível presumir que a variação do preenchimento interno teria menos influência no tempo de fabricação.



Dimensions, mm [in.] For Test Specimens with Gage Length Four times the Diameter [E8]					
	Standard Specimen	Small-Size Specimens Proportional to Standard			
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gage length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	36.0 ± 0.1 [1.400 ± 0.005]	24.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.005]	16.0 ± 0.1 [0.640 ± 0.005]	10.0 ± 0.1 [0.450 ± 0.005]
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.002]
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
A—Length of reduced section, min (Note 2)	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]	20 [0.75]	16 [0.625]

Dimensions, mm [in.] For Test Specimens with Gage Length Five times the Diameter [E8M]					
	Standard Specimen	Small-Size Specimens Proportional to Standard			
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gage length	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	45.0 ± 0.1 [1.750 ± 0.005]	30.0 ± 0.1 [1.250 ± 0.005]	20.0 ± 0.1 [0.800 ± 0.005]	12.5 ± 0.1 [0.565 ± 0.005]
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.002]
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
A—Length of reduced section, min (Note 2)	75 [3.0]	54 [2.0]	36 [1.4]	24 [1.0]	20 [0.75]

Figura 13: Recorte da norma ASTM E8/E8M-09 com as medidas de corpo de prova

Fonte: Norma ASTM E8/E8M-09 (2010)

Medidas do corpo de prova:

- G (Comprimento útil) = 75 mm
- D (Diâmetro útil) = 15 mm
- R (Raio da curvatura) = 12,5 mm
- A (Distancia entre cabeças de fixação) = 100 mm
- Comprimento da cabeça de fixação: 50 mm
- Diâmetro da cabeça de fixação: 25 mm
- Comprimento total: 220 mm

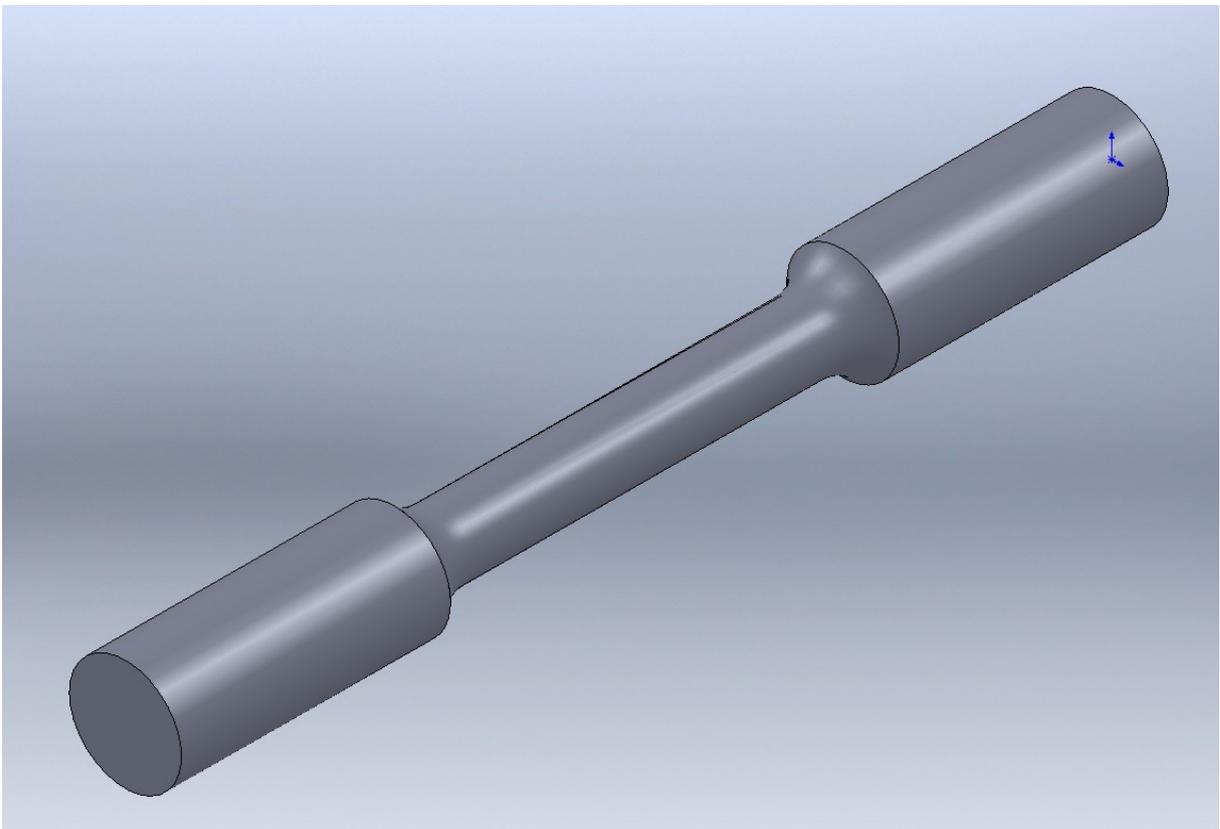


Figura 14: Modelo do corpo de prova feito no SolidWorks

Fonte: Autor (2019)

A próxima etapa consiste em utilizar a extensão de arquivo .STL do modelo criado no software de CAD e utilizar um software de fatiamento 3D para determinar todas as configurações para impressão e gerar a extensão de arquivo .GCODE que foi utilizado pela impressora para impressão, utilizou-se o software Ultimaker Cura 3.6.0. Todos os corpos de prova possuem as mesmas configurações exceto pelo preenchimento interno que é a variável

que será manipulada. Foi produzido 8 extensões de arquivos com as seguintes taxas de preenchimento interno: 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100%(maciço), porém todas com padrão de preenchimento interno em grade. As configurações utilizadas serão conforme a Figura 15, 16, 17, 18, 19, 20 e 21.

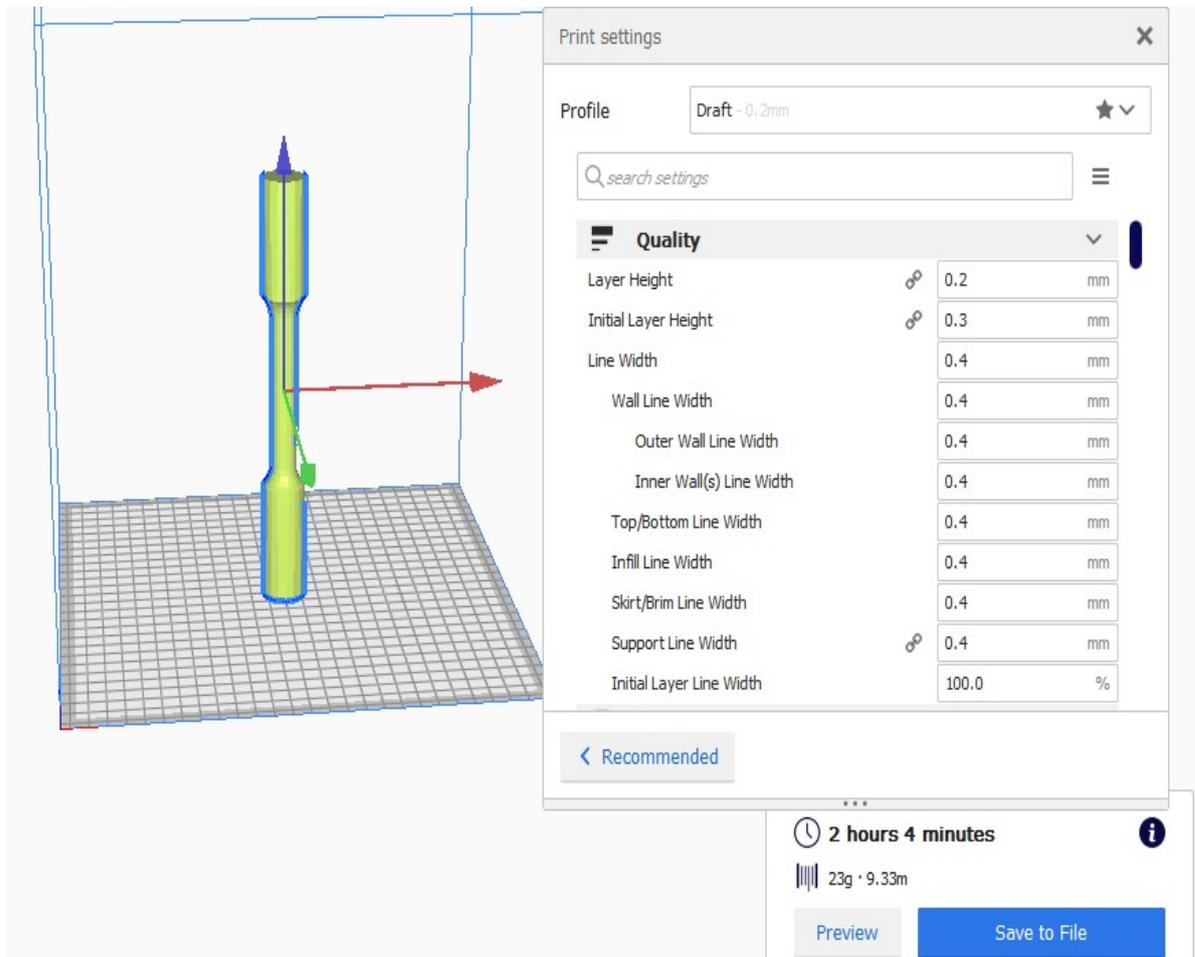


Figura 15: Configurações de Qualidade no Cura Ultimaker 3.6.0

Fonte: Autor (2019)

A Figura 15 informa as configurações de qualidade da impressão onde o valor mais importante é o de *Layer Height* (Altura da camada) que é igual a 0,2 mm.

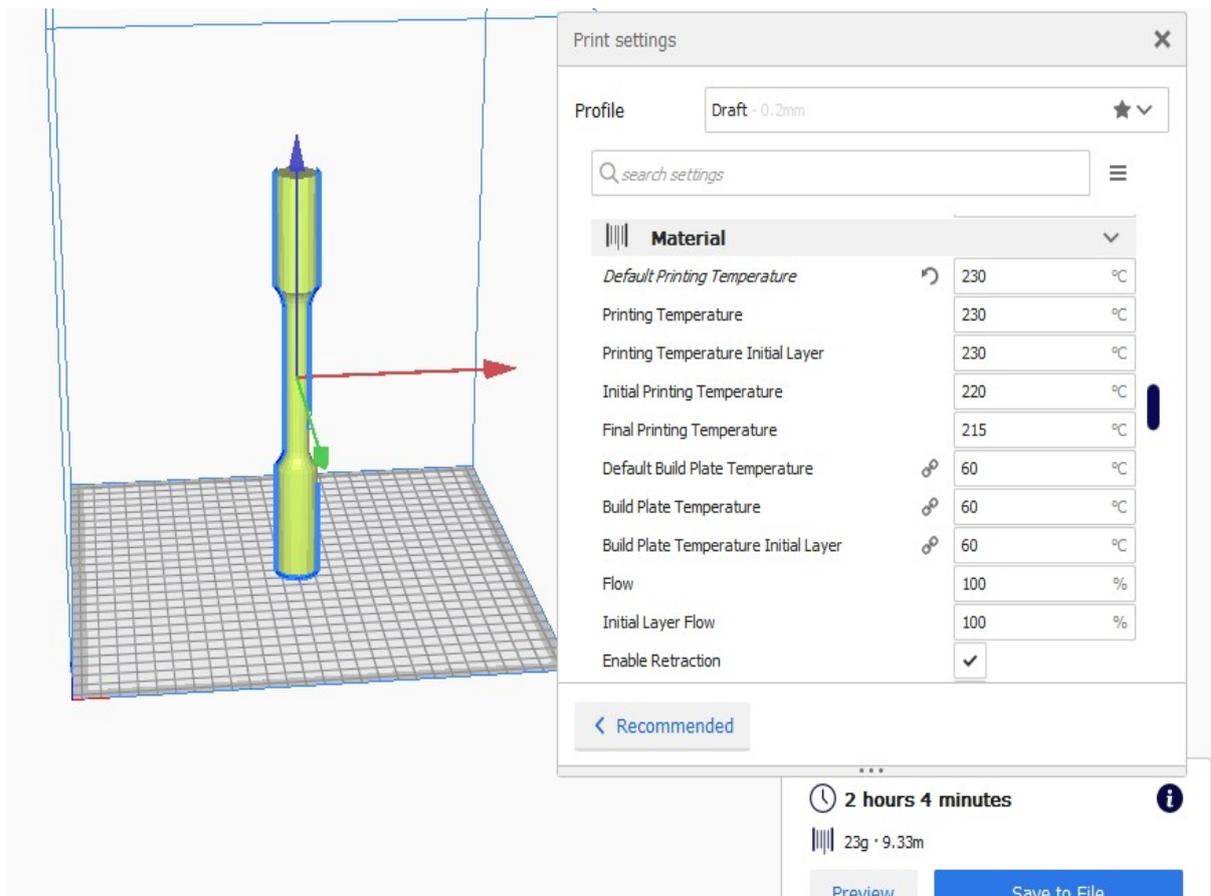


Figura 16: Configurações de Material no Cura Ultimaker 3.6.0

Fonte: Autor (2019)

A Figura 16 informa as configurações de material da impressão onde os valores mais importantes é *Default Printing Temperature* (Temperatura padrão de impressão) que é igual a 230 °C, e também *Default Build Plate Temperature* (Temperatura da mesa de impressão) com o valor de 60 °C.

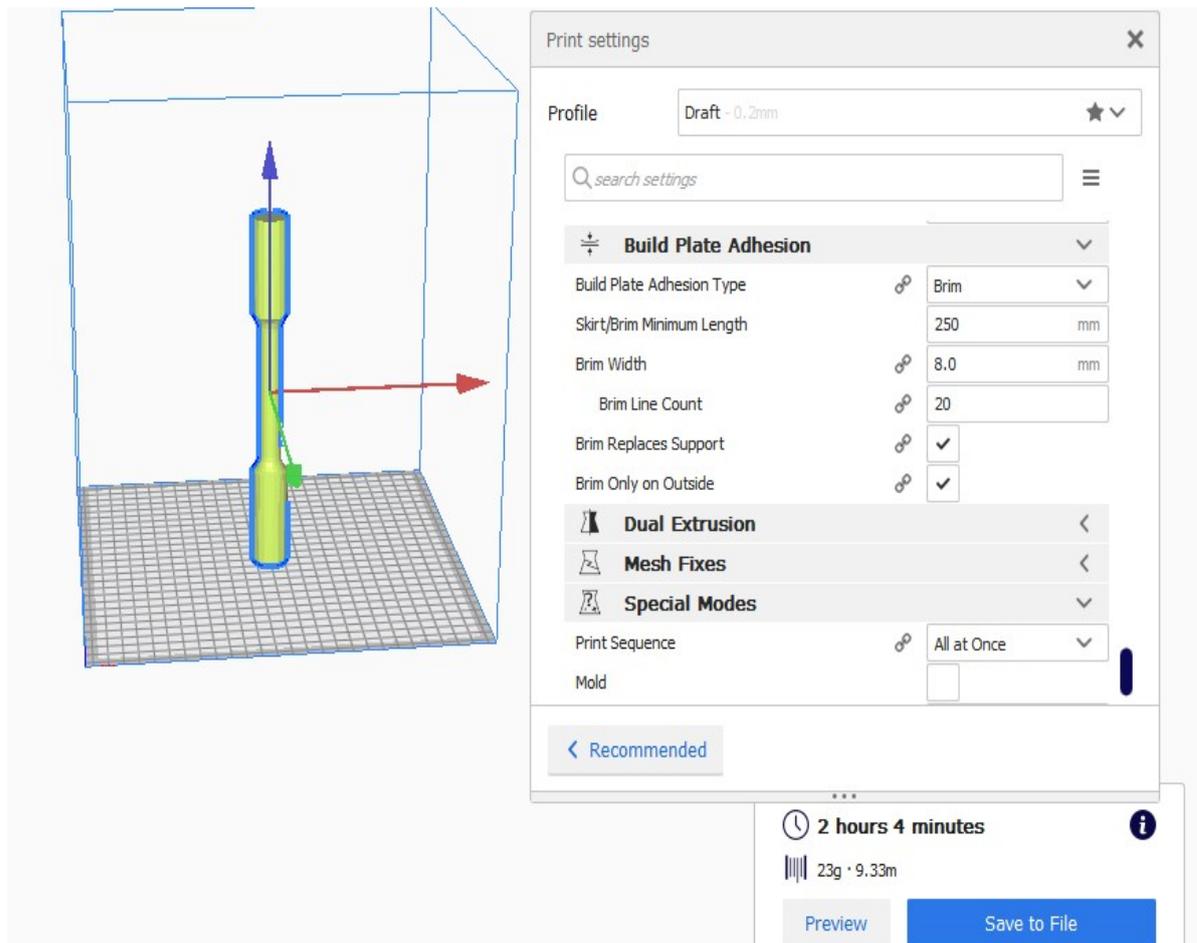


Figura 17: Configurações de Adesão da placa de construção no Cura Ultimaker 3.6.0

Fonte: Autor (2019)

A Figura 17 informa as configurações de adesão na mesa de impressão onde as informações mais importantes é o *Build Plate Adhesion Type* (Tipo de adesão na mesa de impressão) foi utilizado do tipo *Brim* (borda), e também *Skirt/Brim Minimum Length* (Comprimento de borda) com o valor igual a 250 mm.

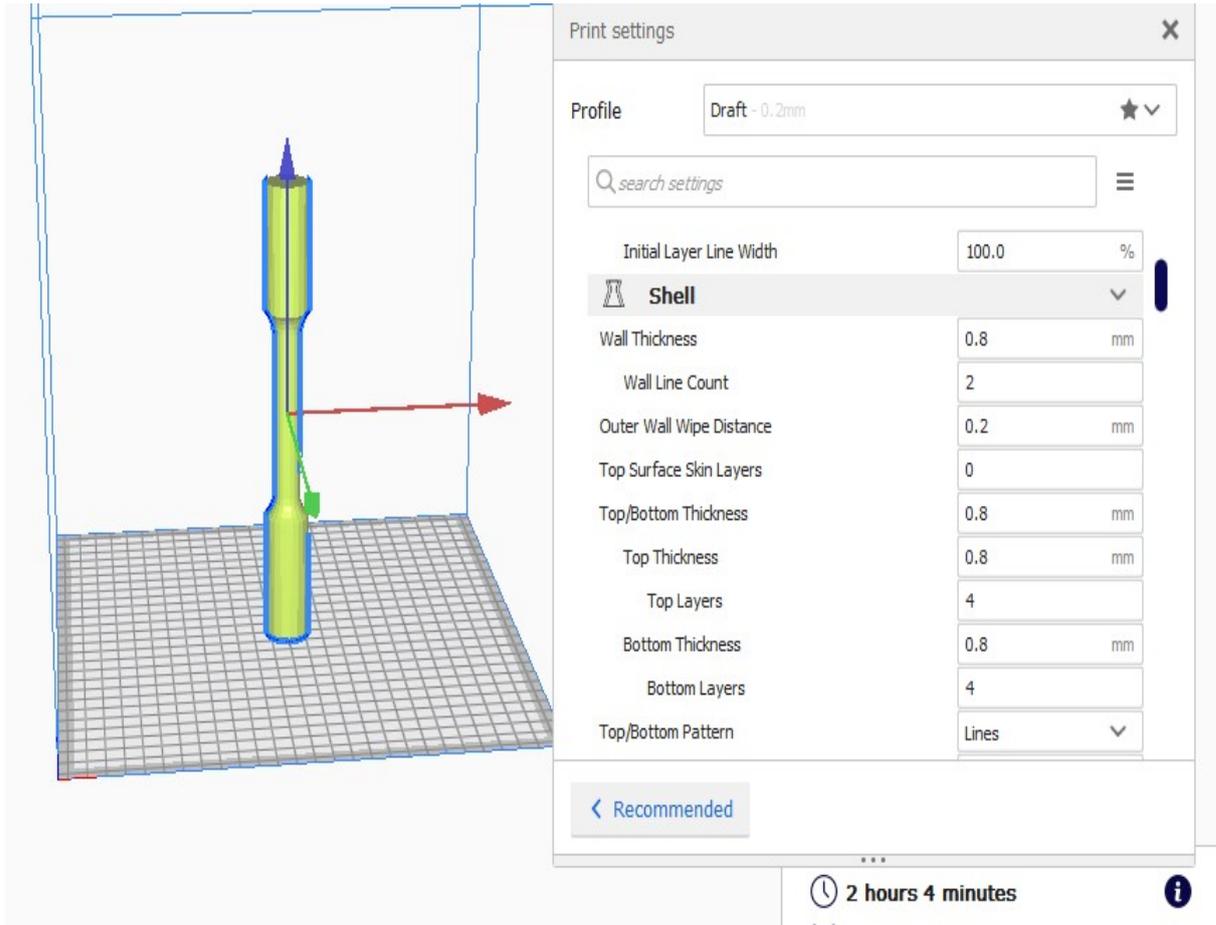


Figura 18: Configurações de Casca no Cura Ultimaker 3.6.0

Fonte: Autor (2019)

A Figura 18 informa as configurações de casca da impressão onde a informação mais importante é o *Wall Thickness* (Espessura da parede) com o valor igual a 0,8 mm.

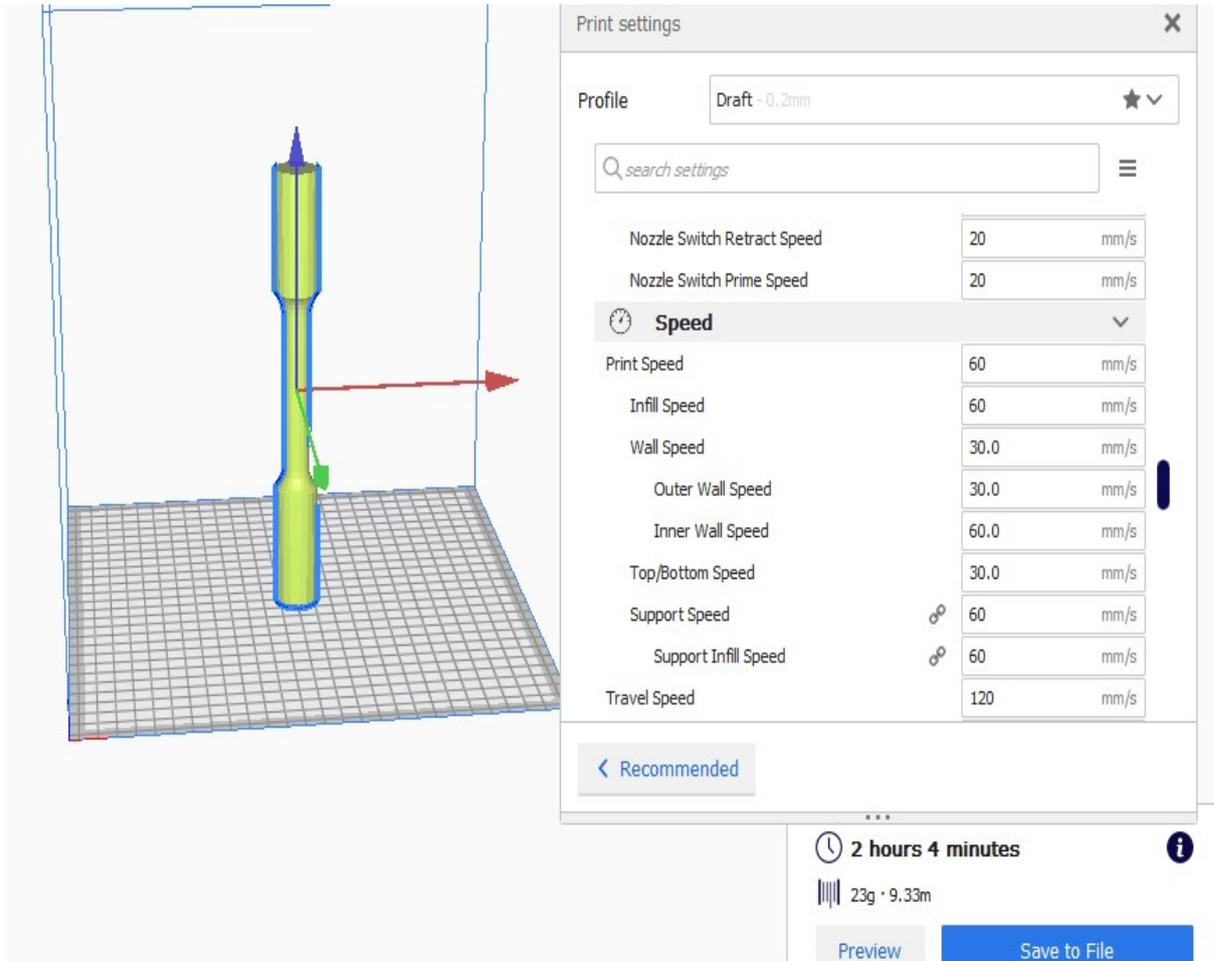


Figura 19: Configurações de Velocidade no Cura Ultimaker 3.6.0

Fonte: Autor (2019)

A Figura 19 informa as configurações de velocidade da impressão onde a informação mais importante é o *Print Speed* (Velocidade de impressão) com o valor igual a 60 mm/s.

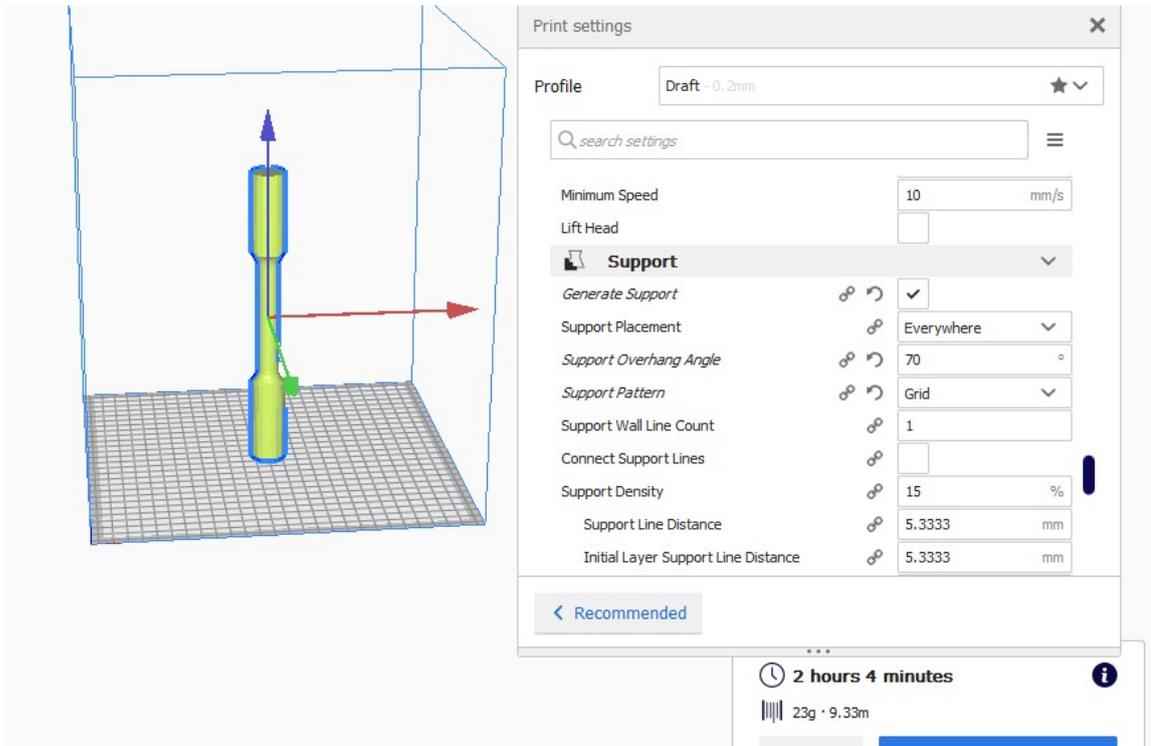


Figura 20: Configurações de Suporte no Cura Ultimaker 3.6.0

Fonte: Autor (2019)

A Figura 20 informa as configurações de suporte da impressão onde a informação mais importante é o *Support Overhang Angle* (Ângulo de projeção dos suportes) com o valor igual a 70°, que garante a criação de suporte para as camadas que ultrapassem o ângulo de 70° em relação a mesa de impressão para uma correta fabricação.

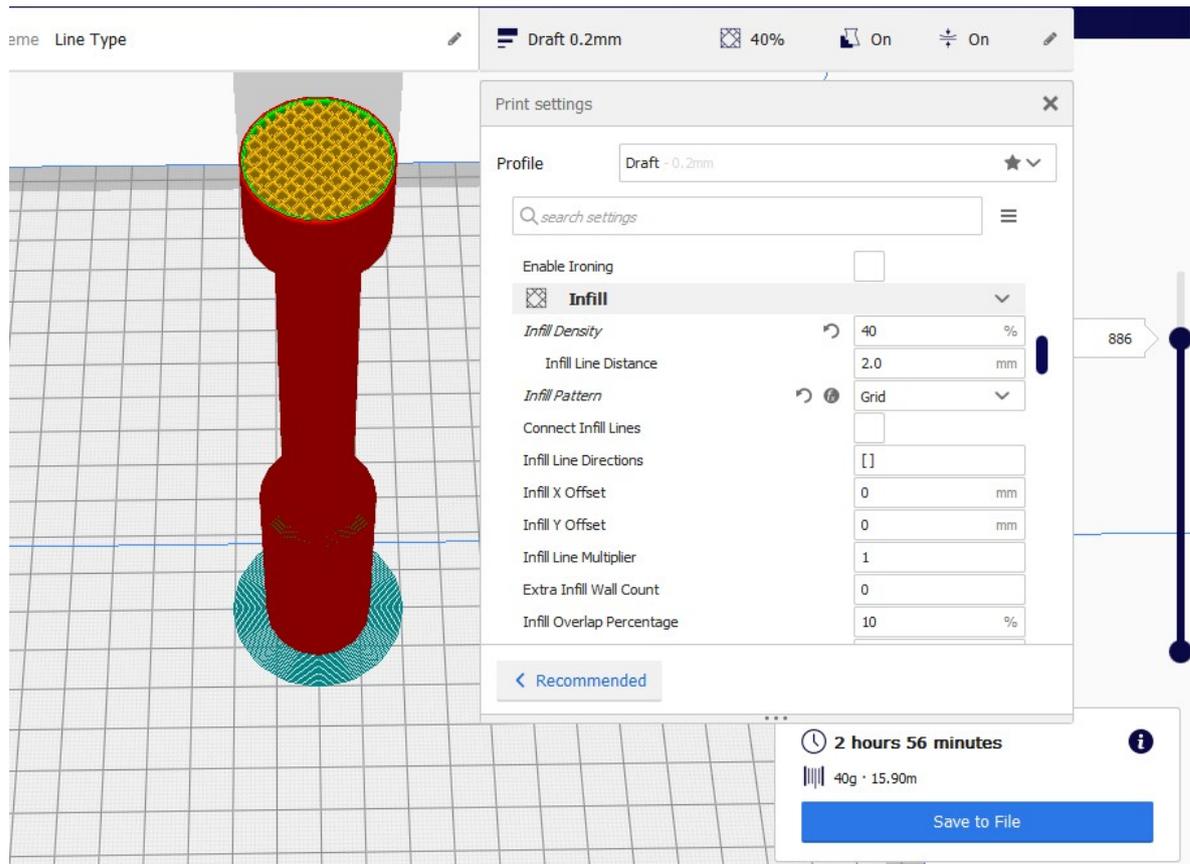


Figura 21: Configurações de Preenchimento no Cura Ultimaker 3.6.0

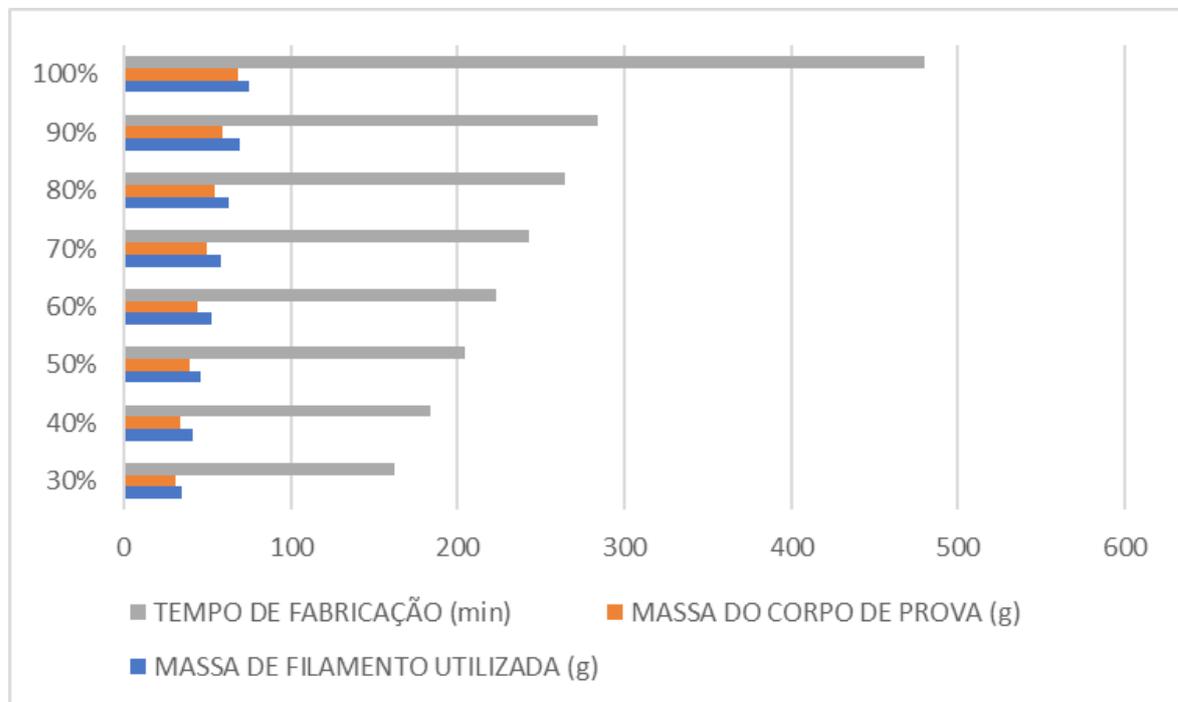
Fonte: Autor (2019)

A última etapa da fabricação foi realizada na oficina mecânica TECDIESEL localizada na rua Carlos Cavalcante, 341 no bairro Cataratas em Cascavel-PR, lá ocorreu a operação da impressora Sethi3D S3 onde com as extensões de arquivo .GCODE foram executados pela impressora para fabricar todos os corpos de prova e logo após foi realizado a limpeza e acabamento dos corpos de provas que assim ficaram prontos para os ensaios mecânicos, porém antes de realizar os ensaios mecânicos os corpos de prova foram catalogados por sua porcentagem de preenchimento interno, massa de filamento utilizada que foi calculado pelo software, massa do corpo de prova obtido por balança eletrônica e tempo de fabricação cronometrada pela impressora. Através disso se obteve os dados que compõe a Tabela 1 e evidenciado na Figura 22.

Tabela 1: Dados coletados da fabricação dos corpos de prova

CORPO DE PROVA			
PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO INTERNO (%)	MASSA DE FILAMENTO UTILIZADA (g)	MASSA DO CORPO DE PROVA (g)	TEMPO DE FABRICAÇÃO (min)
30	35	30,6	162
40	41	33,3	184
50	46	39,3	204
60	52	44	223
70	58	49,3	243
80	63	54,6	264
90	69	59,3	284
100	75	68	480

Fonte: Autor (2019)

**Figura 22:** Gráfico dos dados de fabricação dos corpos de prova

Fonte: Autor (2019)

A Figura 23 demonstra como foi aferido a massa dos corpos de prova utilizando balança eletrônica, logo após a limpeza e acabamento dos mesmos.



Figura 23: Avaliação das massas dos corpos de prova utilizando balança

Fonte: Autor (2019)

3.3 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Após a confecção dos corpos de prova, foram realizados os ensaios mecânicos no Centro Universitário Assis Gurgacz localizado na Avenida das Torres, número 500, Bairro FAG em Cascavel-PR, foi utilizado o laboratório de ensaios mecânicos manuseando a MÁQUINA UNIVERSAL ELETRÔNICA DIGITAL CAPACIDADE 100T, HIDRÁULICA I-3058 onde foi realizado o ensaio de tração axial no objeto de estudo.

Para realização dos ensaios mecânicos foi utilizado as recomendações da norma ISO 527-1:2012 (International Organization for Standardization, 2012, p.6) que determina que a máquina de ensaio utilizada possua a certificação ISO 7500-1, sendo que o equipamento possui, foi utilizada outra importante recomendação, a velocidade de teste, sendo que a mesma terá o valor de 50 mm/min.

Table 1 — Recommended test speeds

Test speed v mm/min	Tolerance %
0,125	±20
0,25	
0,5	
1	
2	
5	
10	
20	±10
50	
100	
200	
300	
500	

Figura 24: Velocidades recomendadas para o ensaio

Fonte: ISO 527-1:2012 (2019)

Os corpos de provas foram ensaiados na ordem de maior porcentagem de preenchimento para o menor, logo após foram coletados os relatórios dos ensaios realizados com os valores de carga máxima em kgf e tensão máxima em Mpa suportada pelos corpos de prova até a sua ruptura. A Figura 25 a seguir mostra um desses relatórios, os demais relatórios encontram-se no APÊNDICE A – RELATÓRIOS DOS ENSAIOS REALIZADOS.



RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

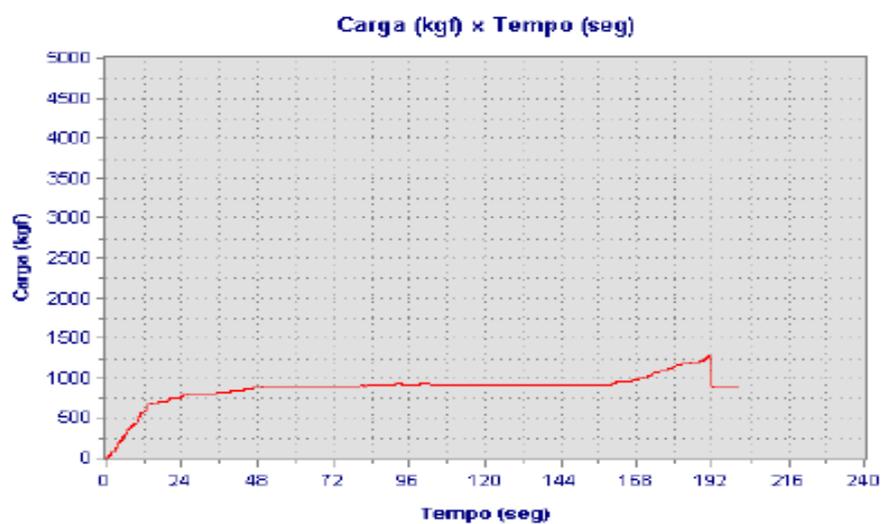
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 01
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 23/08/2019
 Qualidade1:
 Responsável: Marcos Colaço
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	1.260 (kgf)	Tensão Máxima:	100,89 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	440 (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	35,16 (MPa)
Carga Esc. Superior:	450 (kgf)	Tensão Esc. Superior:	35,96 (MPa)
Massa Linear:	0,00 (mm ²)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado



sexta-feira, 23 de agosto de 2019
19:52:14

Figura 25: Relatório do ensaio de tração axial do corpo de prova com 100% de preenchimento interno

Fonte: Autor (2019)

3.4 ANÁLISE DOS DADOS

Após os ensaios mecânicos os dados dos relatórios obtidos foram catalogados em ordem de porcentagem de preenchimento interno identificando as 3 amostras do mesmo, onde especifica os valores de carga máxima e tensão máxima, e também foi realizado uma média desses valores conforme Tabela 2.

Tabela 2: Dados dos ensaios de tração

PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO INTERNO (%)	CARGA MÁXIMA (Kgf)				TENSÃO MÁXIMA (MPa)			
	CORPO 1	CORPO 2	CORPO 3	MÉDIA	CORPO 1	CORPO 2	CORPO 3	MÉDIA
30	-	-	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	-	-
50	770	770	770	770,00	61,53	61,53	61,53	61,53
60	750	810	760	760,00	59,93	64,73	60,73	60,73
70	800	800	820	800,00	63,93	63,93	65,53	63,93
80	830	850	810	830,00	66,33	67,93	64,73	66,33
90	810	840	860	840,00	64,73	67,13	68,72	67,13
100	1170	1260	580*	1.215,00	93,50	100,69	46,36*	97,10

Fonte: Autor (2019)

A Figura 26 exibe os valores obtidos de carga máxima em formato de gráfico para uma melhor interpretação.

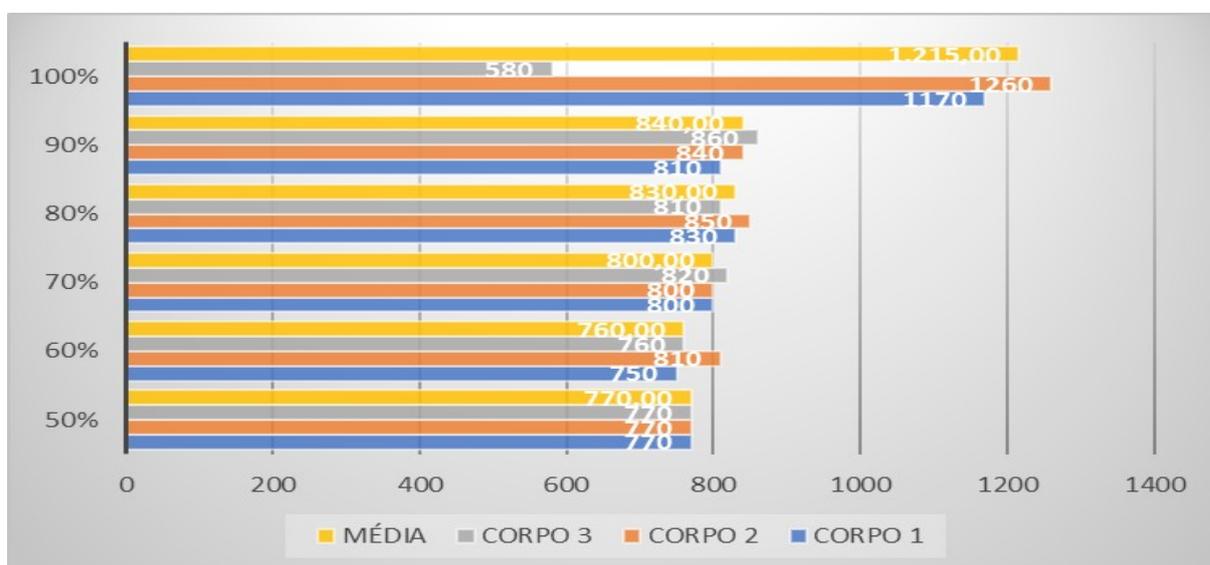


Figura 26: Gráfico da carga máxima(kgf) dos corpos de prova

Fonte: Autor (2019)

A Figura 27 exibe os valores obtidos de tensão máxima em formato de gráfico para uma melhor interpretação.

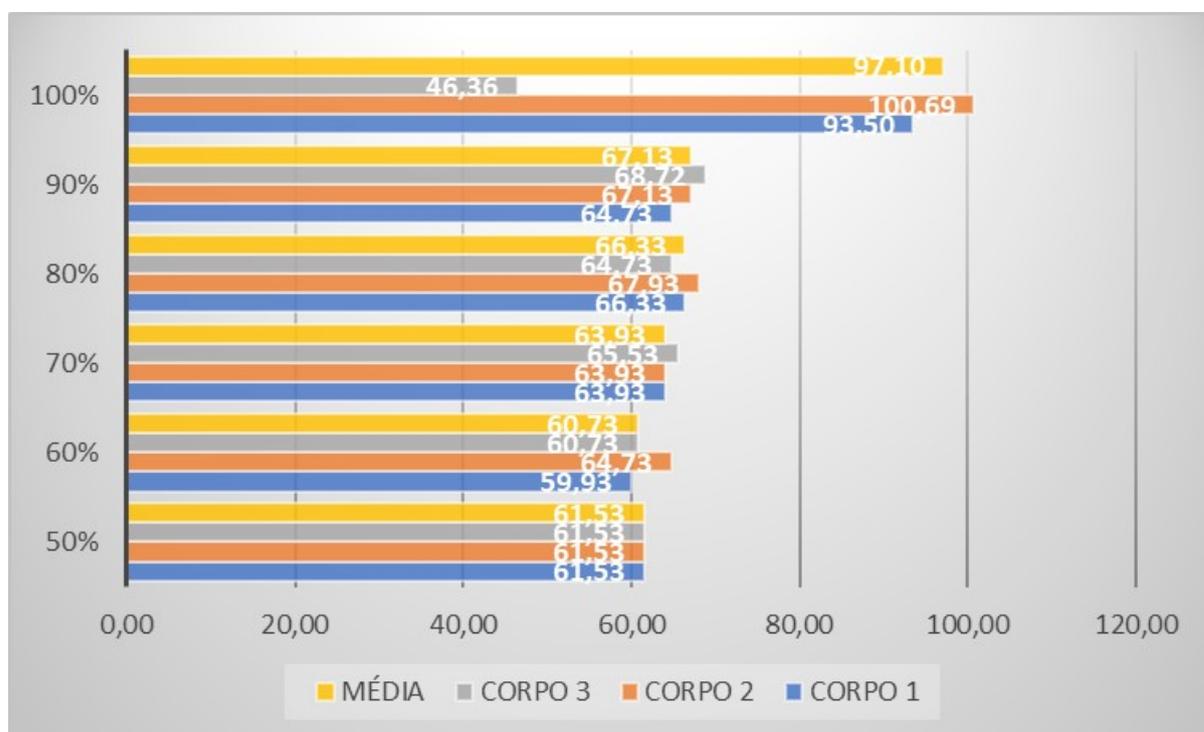


Figura 27: Gráfico da tensão máxima(MPa) dos corpos de prova

Fonte: Autor (2019)

Os valores obtidos de tensão máxima foram superiores a resistência a tração informado pelo fabricante do ABS que foi utilizado no ensaio, segundo a Figura 11 o ABS da marca 3D Squad® possui 44 Mpa de resistência a tração obtidos pelo ensaio seguindo a norma ISO 527 ou 6580 psi que é igual a 45.36 Mpa se ensaiado pela norma ASTM D638.

Não foi possível estimar valores para os corpos de prova com porcentagem de 30% e 40% de preenchimento interno devido os mesmos não romperem no comprimento útil e não apresentarem a curva característica do ABS, o corpo de prova 3 com 100% de preenchimento não foi considerado na média devido a sua falha prematura em relação aos outros e também não apresentar a curva característica conforme ANEXO A – CURVA DO ENSAIO DE TRAÇÃO AXIAL DO ABS. A Figura 28 a seguir mostra a diferença da fratura que ocorreu nos corpos de prova de 30% e 40% de preenchimento interno em relação aos demais, onde se encontra a esquerda um corpo de prova com 30% de preenchimento interno e a direita um com 60% para exemplificar como romperam os demais.



Figura 28: Corpos de prova após ruptura no ensaio de tração

Fonte: Autor (2019)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para determinar a menor taxa de preenchimento que maximize a resistência mecânica e a economia de tempo e material de impressoras 3D FDM foram utilizados os dados da Tabela 1 e 2 realizando uma razão entre a massa utilizada de filamento ABS que foi necessária para fabricação do corpo de prova em gramas dividido pela tensão máxima em MPa formando uma razão de MPa/g, também foi analisado o tempo de fabricação em minutos que será dividido pela tensão máxima em MPa formando uma razão de Mpa/min.

Tabela 3: Eficiência das porcentagens de preenchimento interno

PORCENTAGEM DE PREENCHIMENTO INTERNO (%)	TENSÃO MÁXIMA / TEMPO DE FABRICAÇÃO (Mpa/min)	TENSÃO MÁXIMA / MASSA DE FILAMENTO UTILIZADA (Mpa/g)
30	-	-
40	-	-
50	0.301617647058824	1.56564885496183
60	0.272331838565022	1.38022727272727
70	0.263086419753086	1.29675456389452
80	0.25125	1.21483516483516
90	0.23637323943662	1.13204047217538
100	0.20228125	1.42786764705882

Fonte: Autor (2019)

Ao analisar a tabela podemos perceber a perda de eficiência na relação resistência a tração pelo tempo de fabricação ou pela massa de filamento utilizada ao se aumentar taxa de preenchimento interno acima 50% porque a variação de resistência a tração do corpo de prova com 50% de preenchimento interno até 90% é pequena, visto que as tensões máxima são respectivamente 61,53MPa e 67,13 MPa só aumentando consideravelmente quando utilizado o preenchimento interno de 100% que possui uma tensão máxima de 97,10 MPa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos dados obtidos por meio dessa pesquisa experimental foi possível identificar um padrão de comportamento nos corpos de prova de ABS ao se alterar o seu preenchimento interno, onde a partir de um ponto a relação resistência a tração pelo tempo de fabricação ou pela massa utilizada de filamento começa a decrescer diminuindo a eficiência das impressões.

Nesse estudo o valor de porcentagem de preenchimento interno que obtivemos os melhores valores de eficiência conforme as relações propostas foi a de 50% o que permitiu fabricar um corpo de prova em 204 minutos um tempo consideravelmente menor aos 480 minutos do corpo de prova maciço, o que permitiu reduzir o tempo de fabricação em mais da metade do tempo e ainda garantir uma considerável resistência a tração, visto que da tensão máxima do corpo de prova maciço de 97,10 MPa diminui para 61,53 MPa para o corpo de prova com 50% de preenchimento interno, além disso o consumo de filamento foi menor, pois das 75 gramas gastas no corpo de prova maciço e no de preenchimento interno de 50% o consumo foi de 46 gramas.

É necessário ter um cuidado com relação as formas geométricas uma vez que ao se utilizar a norma ASTM E8/E8M-09 que tem o corpo de prova com a seção transversal em formato circular foi obtido valores diferentes se comparado com os valores do fabricante do filamento de ABS que utilizou a norma ISO 527-1:2012 que possui a seção transversal em forma retangular.

Com a conclusão desse experimento pode-se obter valores quantitativos de qual faixa de porcentagem de preenchimento interno utilizar, para manter uma boa resistência mecânica e diminuir o tempo de fabricação, visto que essas informações pode ajudar em muito o Movimento Maker, ou seja, os trabalhadores autônomos que trabalha com impressoras 3D, lembrando que muitas empresas utiliza esse processo também, além de incentivar novas pesquisas na área.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Ensaiai corpos de prova de ABS impressos em FDM, com diversas porcentagens de preenchimento interno, através de ensaios de compressão para melhor entender seu comportamento.
- Realizar esse estudo usando a norma ISO 527 ou a norma ASTM D638.
- Realizar o mesmo estudo utilizando impressoras FDM, porém usando outro tipo de filamento como PLA, PETG e os demais encontrados no mercado.
- Efetuar um estudo similar usando outra tecnologia de manufatura aditiva que possibilita alterar o preenchimento interno das peças fabricadas.
- Utilizar um software que aplica o Método dos elemento finitos para realizar ensaios mecânicos em peças simulando diversas taxas de preenchimento interno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARO, Mariana. **As impressoras 3D vão mudar o mundo e esses setores já estão se adaptando.** Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/carreira/as-impressoras-3d-vaomudar-o-mundo-e-esses-setores-ja-estao-se-adaptando/>> Acesso em: 28 de maio de 2019

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/E8M-09:** Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 2010.

FRABASILE, Daniela. **Precisamos aprender a usar a impressão 3D para inovar.** Disponível em: <<https://epocanegocios.globo.com/Tecnologia/noticia/2018/05/precisamos-aprender-usar-impressao-3d-para-inovar.html>> Acesso em: 18 de abril de 2019

GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C. A. dos. **Ensaio dos Materiais.** Rio de Janeiro: ETC, 2000.

GIBSON, I.; STUCKER, B.; ROSEN, D. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing.** New York: Springer; 2. Ed.; 2015

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4ªed. São Paulo: E. Atlas, 2002.

GORNI, A. A. **Prototipagem Rápida: O Que É e Quem Faz.** Plástico Industrial, São Paulo, v. 3, n.31, p. 230-239, 2001.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 527-1:2012:** Plastics-Determination of tensile properties. 2012

VOLPATO, N. et al. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D.** São Paulo: E. Blucher, 2017.

VOLPATO, N. et al. **Prototipagem rápida: tecnologia e aplicações.** São Paulo: E. Blucher, 2007.

APÊNDICES

APÊNDICE A – RELATÓRIOS DOS ENSAIOS REALIZADOS



RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

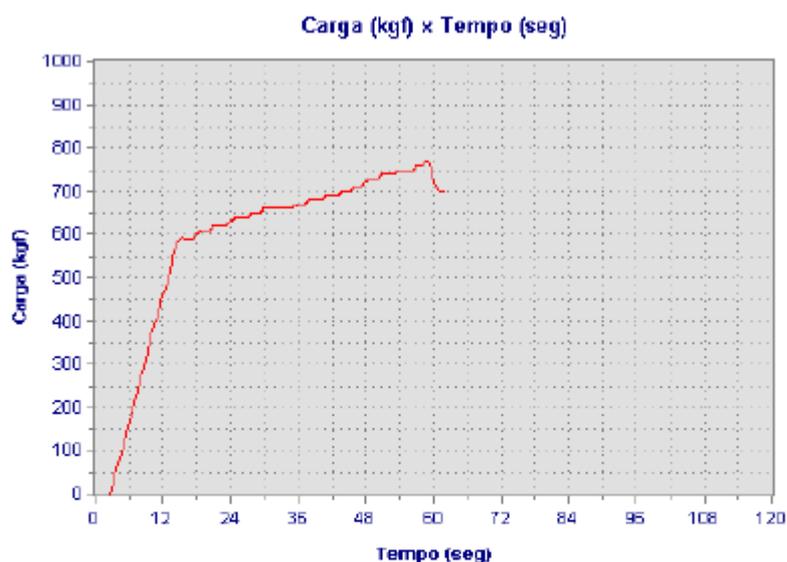
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 01 - 50
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	770 (kgf)	Tensão Máxima:	61,53 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	Não detectado (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	Não detectado
Carga Esc. Superior:	Não detectado (kgf)	Tensão Esc. Superior:	Não detectado
Massa Linear:	0,00 (mm ²)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





FACULDADE ANÍSIO GURGACZ
Cada um a sua

RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

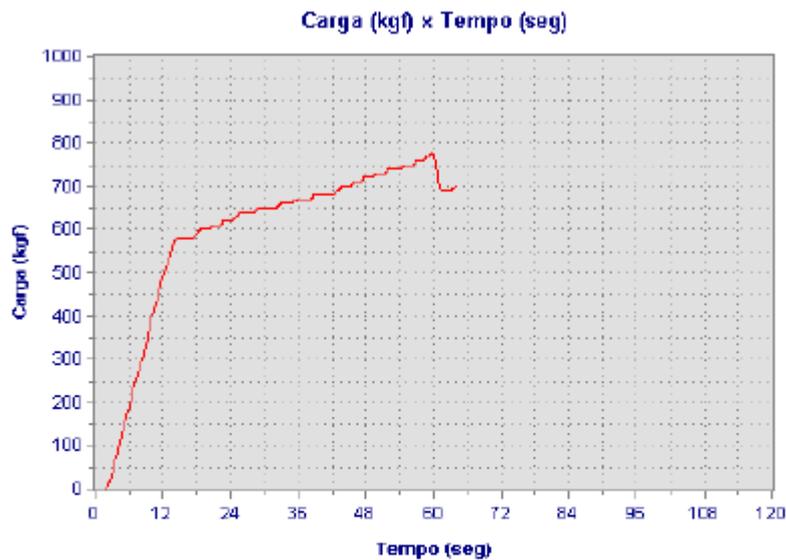
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 02 - 50
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	770 (kgf)	Tensão Máxima:	61,53 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	Não detectado (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	Não detectado
Carga Esc. Superior:	Não detectado (kgf)	Tensão Esc. Superior:	Não detectado
Massa Linear:	0,00 (mm ²)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

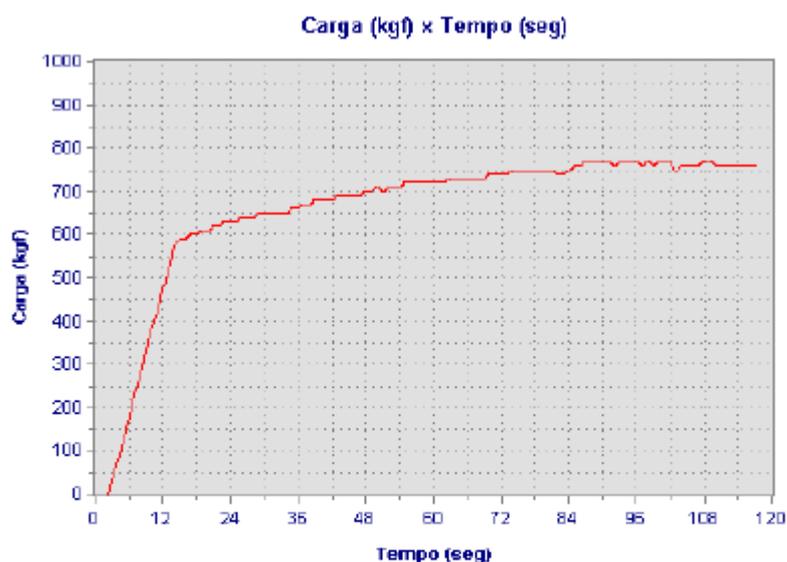
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 03 - 50
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	770 (kgf)	Tensão Máxima:	61,53 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	640 (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	51,14 (MPa)
Carga Esc. Superior:	650 (kgf)	Tensão Esc. Superior:	51,04 (MPa)
Massa Linear:	0,00 (mm ²)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

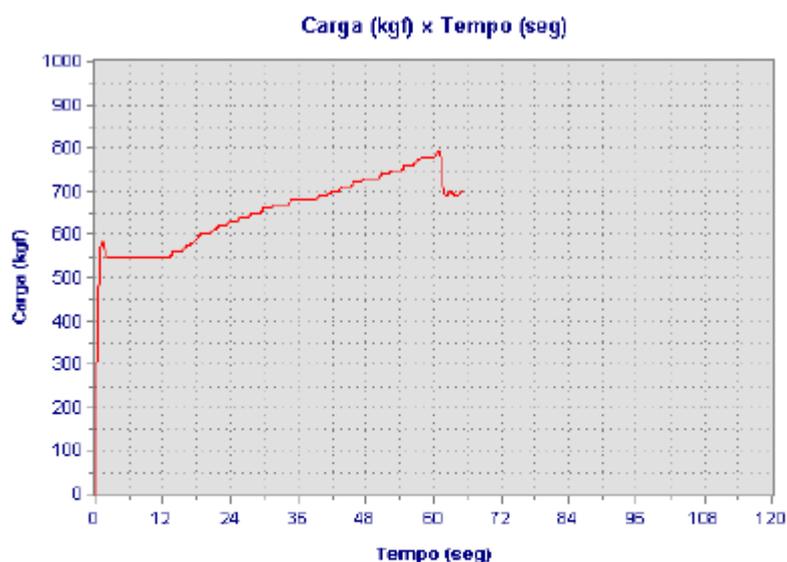
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 03 - 50
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	790 (kgf)	Tensão Máxima:	63,13 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	540 (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	43,15 (MPa)
Carga Esc. Superior:	550 (kgf)	Tensão Esc. Superior:	43,95 (MPa)
Massa Linear:	0,00 (mm ²)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

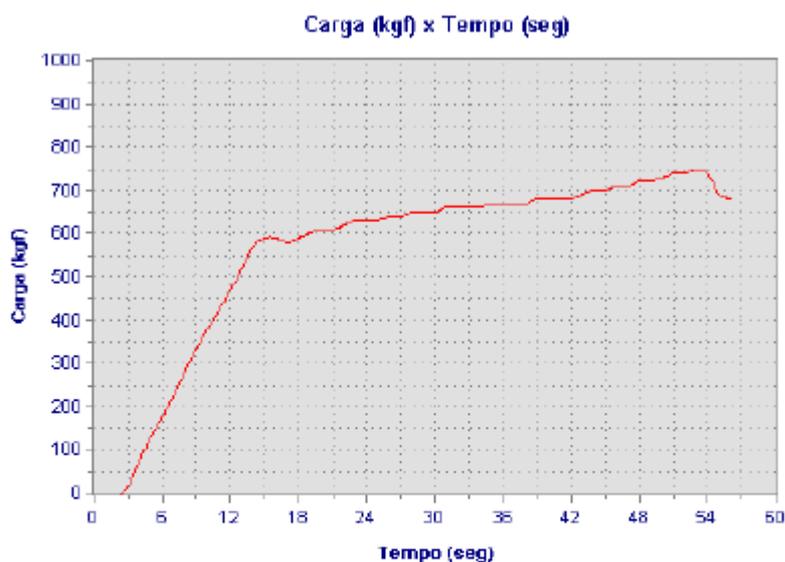
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 01 - 60
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	750 (kgf)	Tensão Máxima:	59,93 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	580 (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	46,35 (MPa)
Carga Esc. Superior:	590 (kgf)	Tensão Esc. Superior:	47,15 (MPa)
Massa Linear:	0,00 (mm ²)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

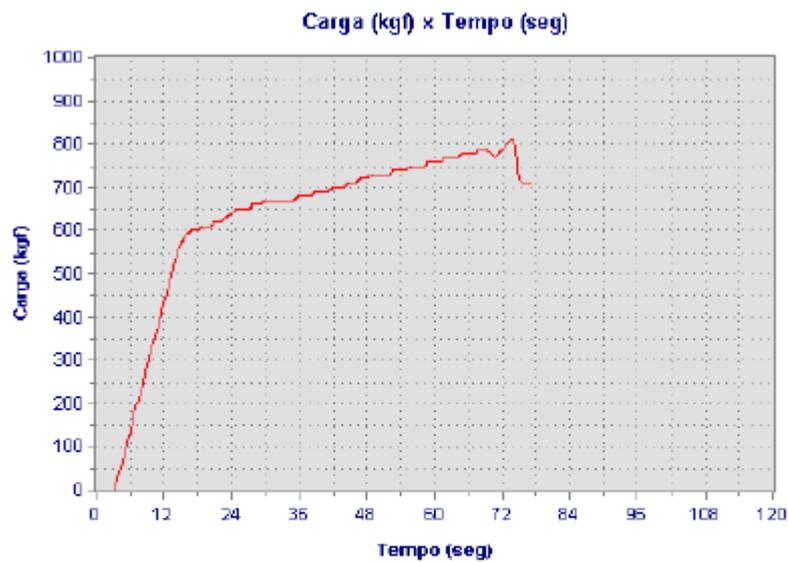
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 02 - 60
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	810 (kgf)	Tensão Máxima:	64,73 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	770 (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	61,53 (MPa)
Carga Esc. Superior:	790 (kgf)	Tensão Esc. Superior:	63,13 (MPa)
Massa Linear:	0,00 (mm ²)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

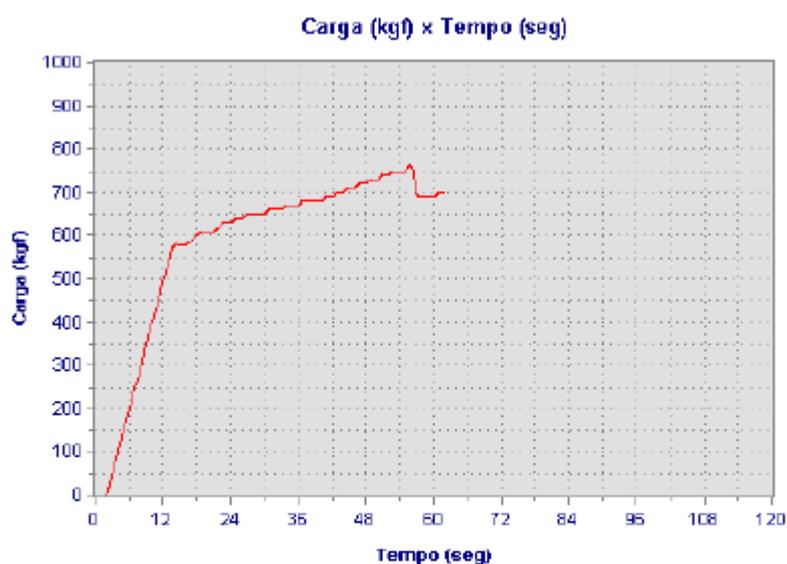
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 03 - 60
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	760 (kgf)	Tensão Máxima:	60,73 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	650 (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	51,94 (MPa)
Carga Esc. Superior:	860 (kgf)	Tensão Esc. Superior:	52,74 (MPa)
Massa Linear:	0,00 (mm ²)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

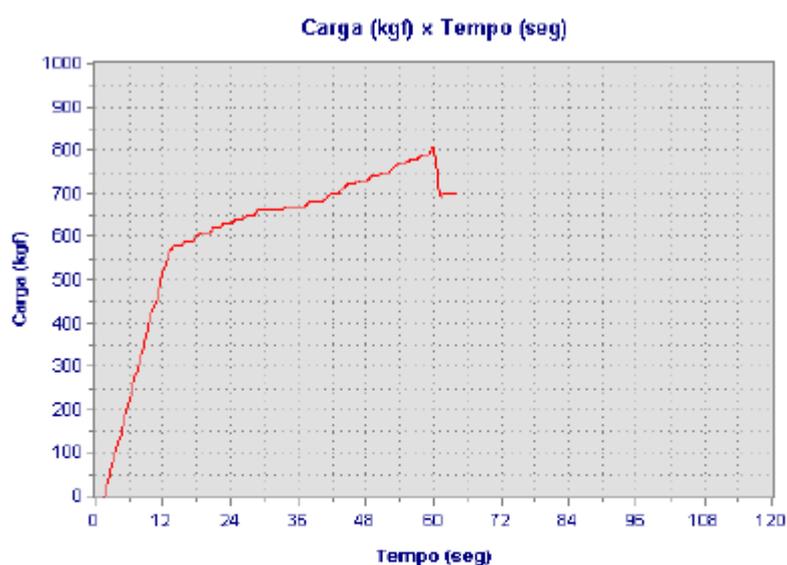
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 01 - 70
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	800 (kgf)	Tensão Máxima:	63,93 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	Não detectado (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	Não detectado
Carga Esc. Superior:	Não detectado (kgf)	Tensão Esc. Superior:	Não detectado
Massa Linear:	0,00 (mm ²)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

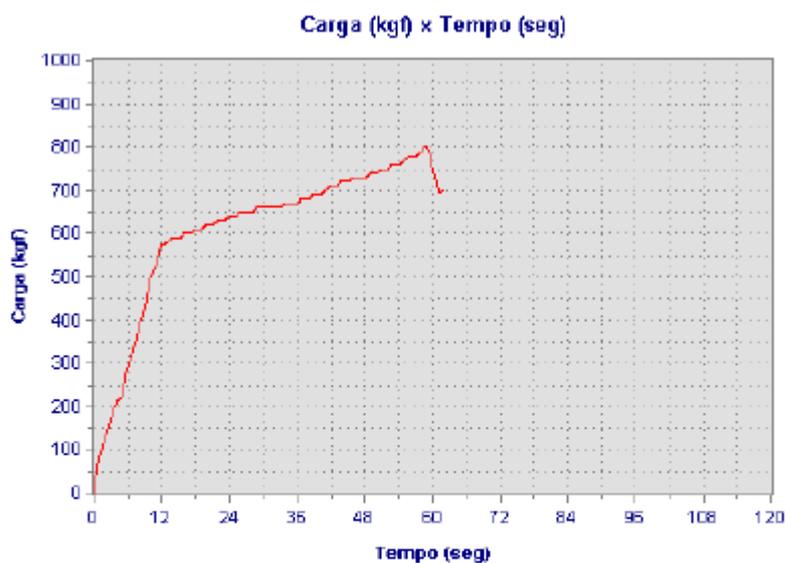
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 02 - 70
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	800 (kgf)	Tensão Máxima:	63,93 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	670 (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	53,54 (MPa)
Carga Esc. Superior:	680 (kgf)	Tensão Esc. Superior:	54,34 (MPa)
Massa Linear:	0,00 (mm ²)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

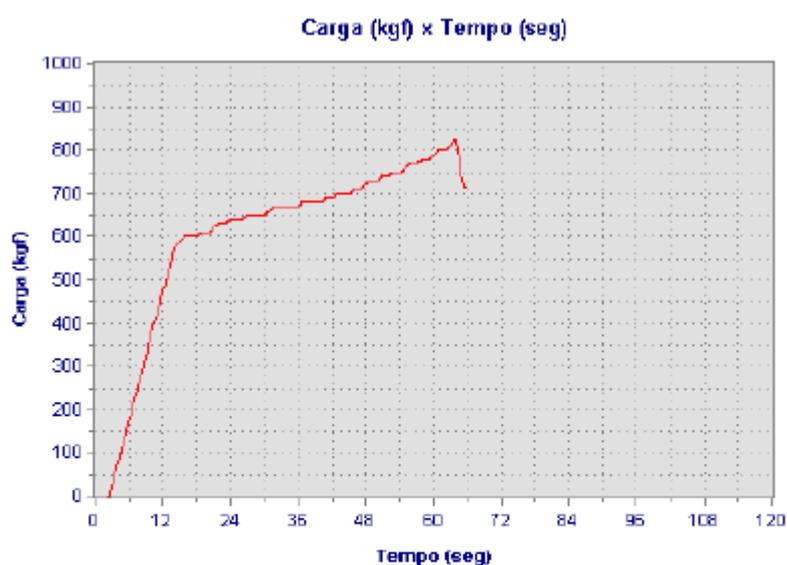
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 03 - 70
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	820 (kgf)	Tensão Máxima:	65,53 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	Não detectado (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	Não detectado
Carga Esc. Superior:	Não detectado (kgf)	Tensão Esc. Superior:	Não detectado
Massa Linear:	0,00 (mm ²)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

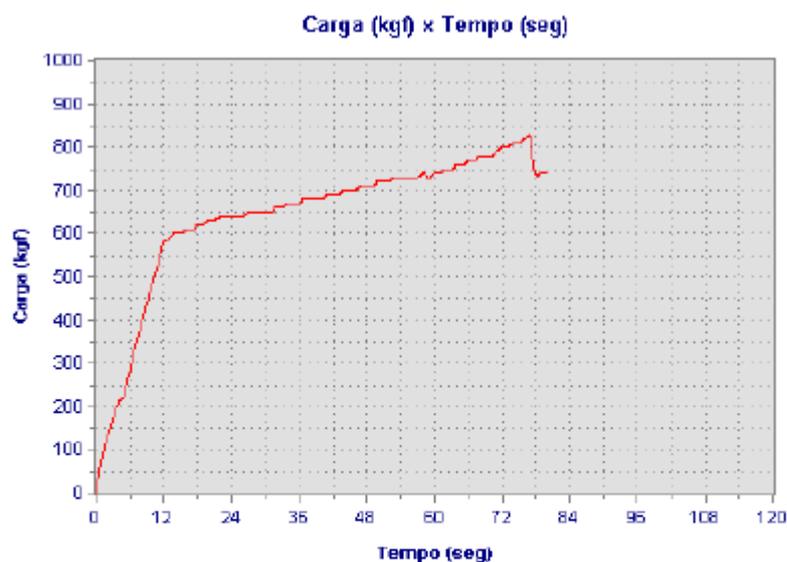
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 01 - 80
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	830 (kgf)	Tensão Máxima:	66,33 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	650 (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	51,94 (MPa)
Carga Esc. Superior:	660 (kgf)	Tensão Esc. Superior:	52,74 (MPa)
Massa Linear:	0,00 (mm ³)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

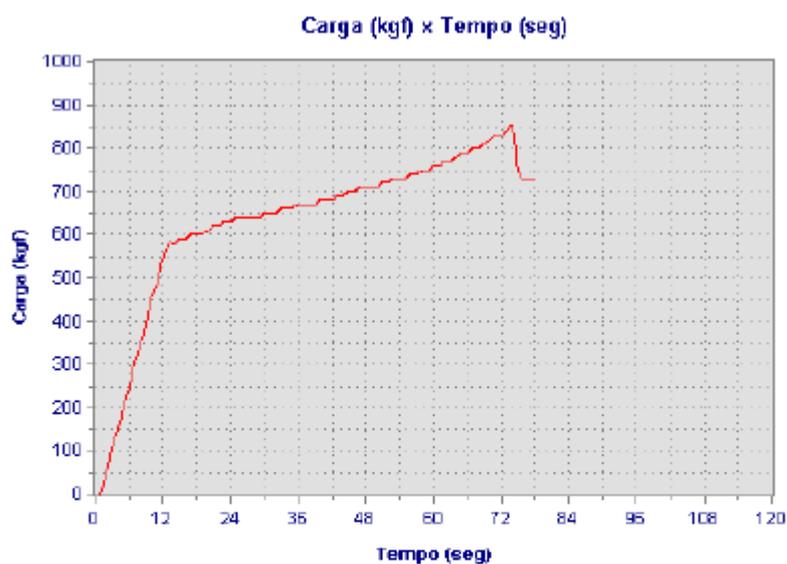
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 02 - 80
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	850 (kgf)	Tensão Máxima:	67,93 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	Não detectado (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	Não detectado
Carga Esc. Superior:	Não detectado (kgf)	Tensão Esc. Superior:	Não detectado
Massa Linear:	0,00 (mm ²)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

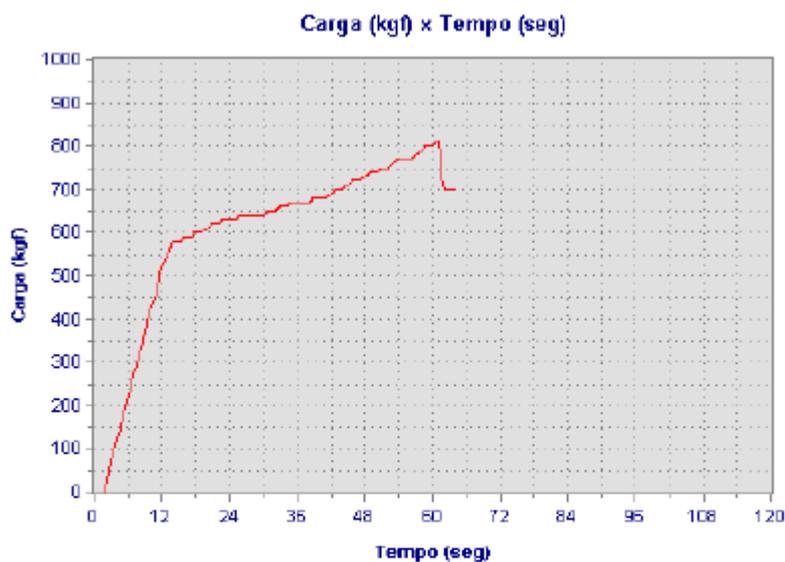
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 03 - 80
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	810 (kgf)	Tensão Máxima:	64,73 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	640 (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	51,14 (MPa)
Carga Esc. Superior:	660 (kgf)	Tensão Esc. Superior:	51,94 (MPa)
Massa Linear:	0,00 (mm ²)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

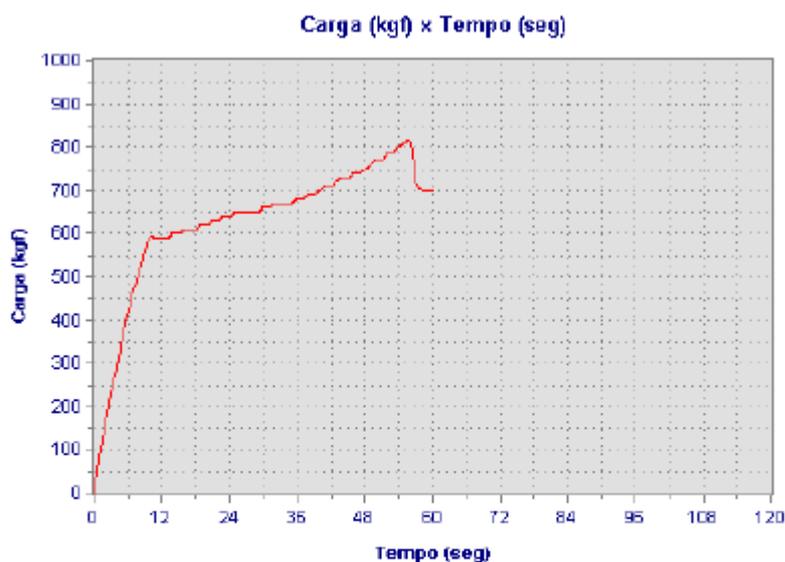
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 01 - 90
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	810 (kgf)	Tensão Máxima:	64,73 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	590 (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	47,15 (MPa)
Carga Esc. Superior:	600 (kgf)	Tensão Esc. Superior:	47,95 (MPa)
Massa Linear:	0,00 (mm ²)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

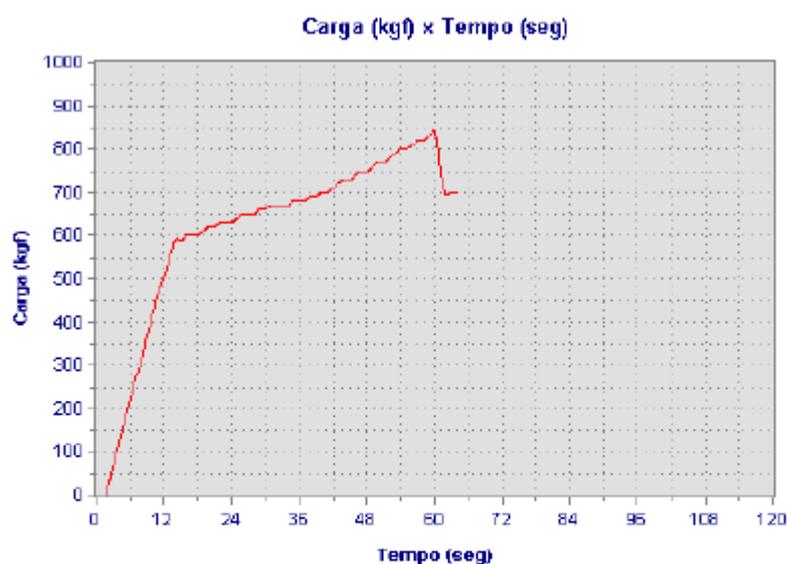
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 02 - 90
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	840 (kgf)	Tensão Máxima:	67,13 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	600 (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	47,95 (MPa)
Carga Esc. Superior:	610 (kgf)	Tensão Esc. Superior:	48,75 (MPa)
Massa Linear:	0,00 (mm ³)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

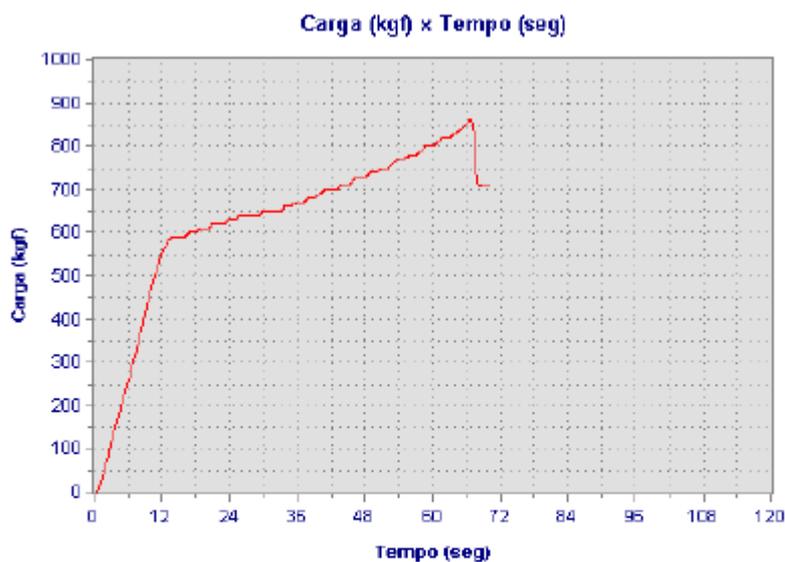
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 03 - 90
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	880 (kgf)	Tensão Máxima:	68,72 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	660 (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	52,74 (MPa)
Carga Esc. Superior:	670 (kgf)	Tensão Esc. Superior:	53,54 (MPa)
Massa Linear:	0,00 (mm ²)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

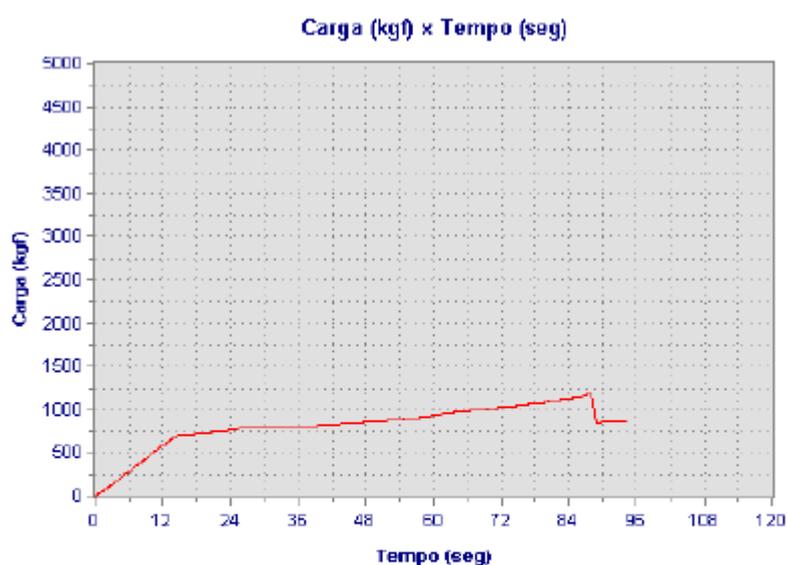
Dados Cadastrais

Nome da amostra: TCC Mario
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	1.170 (kgf)	Tensão Máxima:	93,50 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	Não detectado (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	Não detectado
Carga Esc. Superior:	Não detectado (kgf)	Tensão Esc. Superior:	Não detectado
Massa Linear:	0,00 (mm ²)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

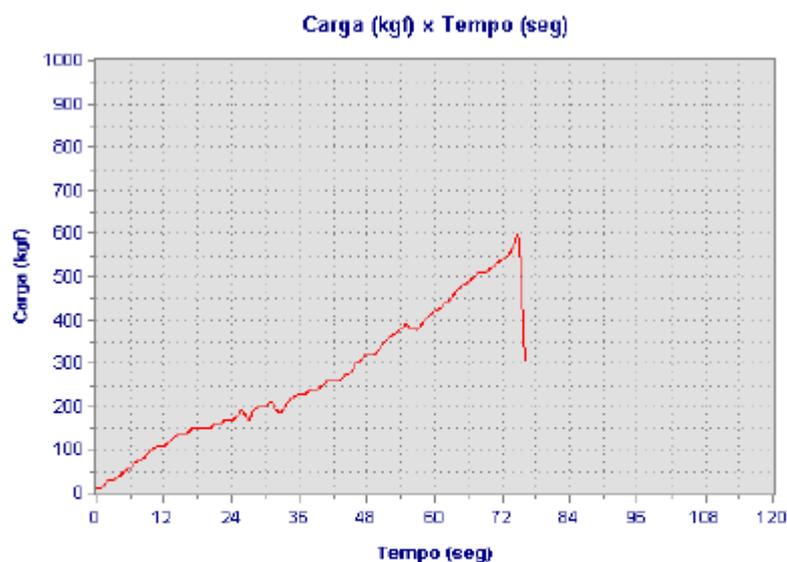
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 02 - 100
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 18/09/2019
 Qualidade1:
 Responsável: João Gabriel
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	580 (kgf)	Tensão Máxima:	46,35 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	150 (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	11,99 (MPa)
Carga Esc. Superior:	160 (kgf)	Tensão Esc. Superior:	12,79 (MPa)
Massa Linear:	154,89 (mm ³)		
Seção Média:	1,21 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado





RELATÓRIO DO ENSAIO REALIZADO

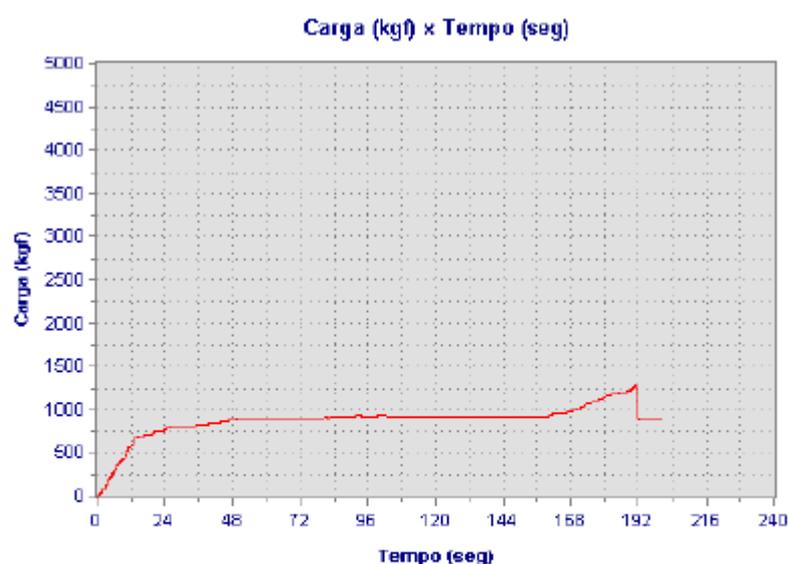
Dados Cadastrais

Nome da amostra: CP 01
 Tipo Ensaio: Tração
 Data do Ensaio: 23/08/2019
 Qualidade1:
 Responsável: Marcos Colaço
 Operador: João Gabriel

Resultado do ensaio

Carga Máxima:	1.260 (kgf)	Tensão Máxima:	100,89 (MPa)
Carga Esc. Conv.:	(kgf)	Tensão Esc. Conv.:	(MPa)
Carga Esc. Inferior:	440 (kgf)	Tensão Esc. Inferior:	35,16 (MPa)
Carga Esc. Superior:	460 (kgf)	Tensão Esc. Superior:	35,96 (MPa)
Massa Linear:	0,00 (mm ²)		
Seção Média:	0,00 (g/mm)		
Alongamento Calc.:	(%)		

Gráfico do ensaio realizado



ANEXOS

ANEXO A – CURVA DO ENSAIO DE TRAÇÃO AXIAL DO ABS

