

Universidade de Brasília – UnB  
Faculdade UnB Gama – FGA  
Engenharia Aeroespacial

# **Caracterização do comportamento em fadiga do plástico ABS produzido por extrusão e manufatura aditiva**

**Autor: Felipe Caixeta Pereira**

**Orientador: Prof. Dr. Sergio Henrique da Silva Carneiro**  
**Coorientador: Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos**  
**Junior**

**Brasília-DF**

**2019**



Felipe Caixeta Pereira

**Caracterização do comportamento em fadiga do plástico  
ABS produzido por extrusão e manufatura aditiva**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Prof. Dr. Sergio Henrique da Silva Carneiro

Coorientador: Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Junior

Brasília-DF

2019

---

Felipe Caixeta Pereira

Caracterização do comportamento em fadiga do plástico ABS produzido por extrusão e manufatura aditiva/ Felipe Caixeta Pereira. – Brasília-DF, 2019-  
120 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Henrique da Silva Carneiro

Coorientador: Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Junior

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB  
Faculdade UnB Gama – FGA , 2019.

1. Comportamento em fadiga. 2. Polímero ABS. 3. Manufatura Aditiva.  
4. Teste de Fadiga. 5. Teste de Tração. I. Prof. Dr. Sergio Henrique da Silva  
Carneiro. II. Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Junior. III. Universidade  
de Brasília. IV. Faculdade UnB Gama. V. Caracterização do comportamento em  
fadiga do plástico ABS produzido por extrusão e manufatura aditiva

CDU 02:141:005.6

---

Felipe Caixeta Pereira

## **Caracterização do comportamento em fadiga do plástico ABS produzido por extrusão e manufatura aditiva**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Trabalho aprovado. Brasília-DF, 4 de Julho de 2019.

---

**Prof. Dr. Sergio Henrique da Silva  
Carneiro**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias  
Barcelos Junior**  
Coorientador

---

**Prof. Dr. Cristian Vendittozzi**  
Convidado 1

---

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maura Angelica Milfont  
Shzu**  
Convidado 2

Brasília-DF  
2019

Dedico este trabalho a todos meus familiares  
e à minha namorada Bárbara.

# Agradecimentos

A Deus pela oportunidade, força e saúde.

À minha família, em especial aos meus pais e minha irmã, à minha namorada, pelo apoio todos esses anos durante meus estudos da graduação.

À Universidade de Brasília e aos professores que participaram da minha jornada na Universidade, bem como todos técnicos e colaboradores da instituição de ensino.

Aos meus orientadores, os Professores Doutores Manuel Barcelos e Sergio Henrique, pela disponibilidade em me ajudar e por todos conhecimentos transmitidos.

Aos professores José Alexander e Fábio Castro membros do Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais (GFFM) - Faculdade de Tecnologia (Departamento de Engenharia Mecânica), pelo auxílio na execução deste trabalho, permitindo o uso do laboratório e da máquina de ensaios de fadiga. A colaboração destes docentes foram fundamentais para realização dos ensaios de fadiga presentes neste trabalho.

Aos meus amigos e colegas de graduação pela amizade, apoio e incentivo.

# Resumo

O presente trabalho trata da caracterização das principais propriedades mecânicas e comportamento à fadiga de um dos polímeros mais utilizados por manufatura aditiva (AM), o acrilonitrila butadieno estireno (ABS). De forma paralela são estudados efeitos em amostras produzidas por extrusão tradicional e manufatura aditiva por moldagem por deposição de material fundido (FDM). Inicialmente, apresenta-se uma breve introdução sobre polímeros, processos de manufatura, impressão 3D, conceito de fadiga e análise de vida em fadiga (Métodos S-N e  $\epsilon$ -N). Com base nos ensaios de tração axial, foi possível determinar a curva tensão por deformação, bem como propriedades do material, dentre elas o módulo de elasticidade, limite de resistência à tração, tensão de ruptura e coeficiente de Poisson. Esta análise é o primeiro passo para estudar o comportamento de materiais poliméricos quando submetidos à fadiga mecânica. Ressalta-se ainda a importância do estudo da fadiga na concepção e previsão de vida de componentes, em especial dos componentes poliméricos, diante da popularização e crescente utilização de impressoras 3D. Verifica-se com base na comparação entre amostras obtidas por impressão 3D e fornecidas por métodos tradicionais de manufatura, a influência do processo de construção nas propriedades mecânicas. Das amostras testadas neste trabalho, os componentes produzidos pela impressão 3D mostraram propriedades similares às aquelas produzidas pela extrusão tradicional. A confecção dos corpos de prova e os procedimentos de ensaios mecânicos estão de acordo com as normas ASTM D638 e ASTM D7791, respectivamente, testes normatizados para ensaios de tração axial e fadiga axial.

**Palavras-chaves:** Comportamento em fadiga. Polímero ABS. Impressão 3D. Manufatura Aditiva. Ensaio de tração e fadiga.

# Abstract

The present work deals with the characterization of the main mechanical properties and fatigue behavior of one of the most used polymers by additive manufacturing (AM), acrylonitrile butadiene styrene (ABS). In parallel, effects on samples produced by traditional extrusion and additive manufacture by fused deposition modeling (FDM) are studied. Initially, a brief introduction on polymers, manufacturing processes, 3D printing, fatigue concept and fatigue life analysis (S-N and  $\varepsilon$ -N methods). Based on the axial tensile tests, it was possible to determine the stress-strain curve as well as the useful properties of the material, such as modulus of elasticity, tensile ultimate strength, tensile stress at failure and Poisson's coefficient. This analysis is the first step to study the behavior of polymeric materials when submitted to mechanical fatigue. It is also important to study fatigue in the design and life expectancy of components, especially polymer components, in face of the popularization and increasing use of 3D printers. It is verified based on the comparison between samples obtained by 3D printing and provided by traditional methods of manufacture, the influence of the construction process on the mechanical properties. From the samples tested in this work, the components produced by 3D printing showed mechanical properties similar to those that were produced by traditional extrusion. The preparation of the test specimens and the mechanical test procedures are in accordance with ASTM D638 and ASTM D7791, respectively, standard tests for uniaxial tensile properties and uniaxial fatigue.

**Key-words:** Behavior in fatigue. ABS Polymer. 3D printing. Additive Manufacturing. Tensile and fatigue tests.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Aeronave De Havilland DH-106 Comet I. Fonte: RAScholefield Collection - Ailiners.net . . . . .	21
Figura 2 – Estrutura Química do PLA. Fonte: Adaptado de (BARROS, 2011) . . . . .	27
Figura 3 – Estrutura Química do ABS. Fonte: KLEIN (2009) adaptado de MANO (2000) . . . . .	28
Figura 4 – Esquemático simplificado de máquina extrusora. Fonte: Adaptado de (SIQUEIRA, 2016) . . . . .	29
Figura 5 – Esquemático simplificado de máquina de moldagem por injeção. Fonte: Adaptado de (INDUSTRIAL, 2018) . . . . .	30
Figura 6 – Impressora 3D RepRap Prusa I3 (Fig. à esquerda) e Esquemático do processo FDM (Fig. à direita). Fonte: Fonte: Amazon.com e (ZIEMIAN C.; SHARMA, 2017) com adaptações. . . . .	32
Figura 7 – Vazios entre filamentos depositados e efeito de variação dimensional. Fonte: (SANTANA, 2015) adaptado de WEEREN et al (1995). . . . .	33
Figura 8 – Tensões cíclicas variantes no tempo. Fonte: (NORTON, 2013). . . . .	34
Figura 9 – Carga em voo típica para uma aeronave de asa fixa. Fonte: (DOWLING, 2013) com adaptações. . . . .	34
Figura 10 – Esquemático para estimativa da vida em Fadiga. Fonte: (AMUCHAS-TEGUI, 2011) com adaptações. . . . .	35
Figura 11 – Curva S-N genérica em escala mono-logarítmica. Fonte: (AMUCHAS-TEGUI, 2011) com adaptações. . . . .	36
Figura 12 – Exemplos de carregamentos cíclicos de amplitude constante. Fonte: (DOWLING, 2013) com adaptações. . . . .	37
Figura 13 – Intervalo de aplicação da curva S-N em gráfico de escala logarítmica. Fonte: (ROSA, 2002) com adaptações. . . . .	37
Figura 14 – Efeito da tensão média nas curvas S-N. Fonte: (SOUZA, 2016). . . . .	38
Figura 15 – Exemplo de diagrama $\sigma_a$ - $\sigma_m$ . Fonte: (ROSA, 2002) com adaptações. . . . .	39
Figura 16 – Deformação elástica, plástica e total <i>versus</i> ciclos. Fonte: (DOWLING, 2013) adaptado de ASTM por Landgraf 70. . . . .	40
Figura 17 – Exemplo de fatura por fadiga. Fonte (ASM, 2008) . . . . .	41
Figura 18 – Esquemático para Curva S-N de um carregamento genérico. Fonte: (CHANDRAN, 2016) com adaptações. . . . .	42
Figura 19 – Metodologia de trabalho . . . . .	44
Figura 20 – Placa ABS antes do processo de corte . . . . .	45
Figura 21 – Formato do corpo de prova para ensaio de tração. Fonte: (ASTM, 2014) com adaptações. . . . .	47

Figura 22 – Router CNC utilizada para corte dos corpos de prova . . . . .	47
Figura 23 – Processo de corte pela Router CNC em execução . . . . .	48
Figura 24 – Router CNC realizando desbaste da camada superior da chapa ABS . . . . .	49
Figura 25 – Corpo de prova com pontes (pontos sem retirada de material) . . . . .	49
Figura 26 – Comparação entre corpos de prova sem desbaste e com desbaste logo após o corte . . . . .	50
Figura 27 – Posicionamento de impressão do corpo de prova. . . . .	50
Figura 28 – Impressora Alumínio I3 da Tek3d . . . . .	51
Figura 29 – Caixa adaptada para fechamento da impressora 3D . . . . .	52
Figura 30 – Diagrama $\sigma$ - $\varepsilon$ para materiais dúcteis e frágeis. Curva AB - material frágil e curva AB' - material dúctil. Fonte: (USP, 2017) com adaptações. . . . .	54
Figura 31 – Determinação do Módulo de Elasticidade. Fonte: (USP, 2017) com adaptações. . . . .	55
Figura 32 – Equipamento de ensaios <i>Instron</i> . . . . .	57
Figura 33 – Corpo de Prova instalado para ensaio de tração e extensômetro na posição horizontal . . . . .	58
Figura 34 – Equipamento de ensaio MTS Landkmark . . . . .	59
Figura 35 – Corpo de prova modelado no <i>Ansys</i> . . . . .	61
Figura 36 – Corpo de prova CPES após ruptura na máquina de ensaios . . . . .	62
Figura 37 – Curva $\sigma$ - $\varepsilon$ para CPED . . . . .	63
Figura 38 – Curva $\sigma$ - $\varepsilon$ para CPES . . . . .	64
Figura 39 – Curva tensão versus deformação para corpos de prova sem desbaste . . . . .	66
Figura 40 – Curva $\sigma$ - $\varepsilon$ para corpos de prova impressos CPI3DL . . . . .	66
Figura 41 – Curva $\sigma$ - $\varepsilon$ para corpos de prova impressos CPIECO . . . . .	67
Figura 42 – Curva $\sigma$ - $\varepsilon$ para os materiais CPES, CPI3DL e CPIECO. . . . .	68
Figura 43 – Curva S-N para CPES em R=0,1 . . . . .	70
Figura 44 – Curva S-N para CPI3DL em R=0,1 . . . . .	71
Figura 45 – Curva S-N para CPIECO em R=0,1 . . . . .	73
Figura 46 – Curva S-N para CPIECO em R=0,1 . . . . .	74
Figura 47 – Curva S-N estimada e projetada para os 3 materiais em R=0,1 . . . . .	74
Figura 48 – Curva S-N para CPES em R=0,3 . . . . .	77
Figura 49 – Curva S-N para CPI3DL em R=0,3 . . . . .	78
Figura 50 – Curva S-N para CPIECO em R=0,3 . . . . .	80
Figura 51 – Curva S-N para CPIECO em R=0,1 . . . . .	81
Figura 52 – Curvas S-N comparativas para CPES em R=0,1 e R=0,3 . . . . .	82
Figura 53 – Curvas S-N comparativas para CPI3DL em R=0,1 e R=0,3 . . . . .	83
Figura 54 – Curvas S-N comparativas para CPIECO em R=0,1 e R=0,3 . . . . .	83
Figura 55 – Simulação no <i>Ansys</i> para CPES com R=0,1 e $F_{max}$ de 417,18 N . . . . .	85
Figura 56 – Simulação no <i>Ansys</i> para CPI3DL com R=0,1 e $F_{max}$ de 268,17 N . . . . .	85

Figura 57 – Simulação no <i>Ansys</i> para CPIPECO com $R=0,1$ e $F_{max}$ de 304,25 . . . . .	85
Figura 58 – Ficha do teste de fadiga de $R=0,1$ para CPES . . . . .	94
Figura 59 – Ficha do teste de fadiga de $R=0,1$ para CPI3DL . . . . .	95
Figura 60 – Ficha do teste de fadiga de $R=0,1$ para CPIPECO . . . . .	96
Figura 61 – Ficha do teste de fadiga de $R=0,3$ para CPES . . . . .	97
Figura 62 – Ficha do teste de fadiga de $R=0,3$ para CPI3DL . . . . .	98
Figura 63 – Ficha do teste de fadiga de $R=0,3$ para CPIPECO . . . . .	99
Figura 64 – Equipamento de ensaio MTS Landmark . . . . .	101
Figura 65 – Ícone do programa <i>MTS Station Manager</i> . . . . .	101
Figura 66 – Escolha dos parâmetro da máquina MTS . . . . .	102
Figura 67 – Ajuste do programa para <i>Basic TestWave</i> . . . . .	102
Figura 68 – Controles da Estação . . . . .	103
Figura 69 – Ajuste de offset . . . . .	103
Figura 70 – Ajuste de limites . . . . .	104
Figura 71 – Comando Manual . . . . .	104
Figura 72 – Botão para abrir <i>Scope e Meters</i> . . . . .	104
Figura 73 – Janela de exibição de <i>Meters</i> . . . . .	105
Figura 74 – Janela de exibição de gráficos de ensaio . . . . .	105
Figura 75 – Painel físico de comandos da máquina MTS . . . . .	106
Figura 76 – Abertura da opção <i>Test Setup</i> . . . . .	106
Figura 77 – Configuração da aba <i>Command</i> para teste de tração . . . . .	107
Figura 78 – Configuração da aba <i>Data Acquisition</i> . . . . .	107
Figura 79 – Configuração da aba <i>Data File</i> . . . . .	108
Figura 80 – Abertura da opção <i>Test Setup</i> . . . . .	108
Figura 81 – Configuração da aba <i>Command</i> para teste de fadiga . . . . .	109
Figura 82 – Configuração da aba <i>Data Acquisition</i> . . . . .	109
Figura 83 – Configuração da aba <i>Data File</i> . . . . .	110
Figura 84 – Habilitar opção <i>Exclusive Control</i> . . . . .	110
Figura 85 – Acionamento <i>Power Low</i> da HPU . . . . .	111
Figura 86 – Acionamento <i>Power High</i> da HPU . . . . .	111
Figura 87 – Acionamento <i>Power Low</i> da HSM . . . . .	111
Figura 88 – Acionamento <i>Power High</i> da HSM . . . . .	112
Figura 89 – Botões para iniciar, pausar ou parar os ensaios . . . . .	112
Figura 90 – Reset de erros do console MTS . . . . .	113
Figura 91 – Desligar <i>Power High</i> da HSM . . . . .	114
Figura 92 – Desligar <i>Power Low</i> da HSM . . . . .	114
Figura 93 – Desligar <i>Power High</i> da HPU . . . . .	114
Figura 94 – Desligar <i>Power Low</i> da HPU . . . . .	114

Figura 95 – Dados técnicos fornecidos pela fabricante de filamentos 3DLAB para  
ABS e outros polímeros. Fonte: 3DLAB. . . . . 116

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Principais propriedades mecânicas do plástico ABS. Fonte: (CAM-BRIDGE, 2003) . . . . .	28
Tabela 2 – Materiais ABS utilizados . . . . .	44
Tabela 3 – Propriedades dos corpos de prova impressos e testados pela fabricante 3DLAB . . . . .	45
Tabela 4 – Propriedades dos grãos informadas pelos fabricantes . . . . .	46
Tabela 5 – Especificações para corpos de prova de tração do Tipo 1. Fonte: (ASTM, 2014) com adaptações. . . . .	47
Tabela 6 – Parâmetros de impressão recomendados pelos fabricantes de filamentos . . . . .	49
Tabela 7 – Parâmetros de impressão utilizados . . . . .	51
Tabela 8 – Especificações de velocidade do teste de tração. Fonte: (ASTM, 2014) com adaptações. . . . .	53
Tabela 9 – Distribuição dos testes de fadiga axial par cada material em $R=0,1$ . . . . .	60
Tabela 10 – Distribuição dos testes de fadiga axial par cada material em $R=0,3$ . . . . .	60
Tabela 11 – Propriedades geométricas e físicas para CPED e CPES . . . . .	62
Tabela 12 – Resultados dos testes para corpos de prova sem e com desbaste . . . . .	63
Tabela 13 – Propriedades geométricas e físicas para CPED, C PIECO e CPI3DL . . . . .	65
Tabela 14 – Resultados dos testes para corpos de prova CPES, C PIECO e CPI3DL . . . . .	65
Tabela 15 – Tensões de limite de resistência à tração para os materiais testados . . . . .	68
Tabela 16 – Resultados experimentais dos ensaios de fadiga com razão de carregamento $R=0,1$ para CPES . . . . .	69
Tabela 17 – Resultados experimentais de CPES para razão de carregamento $R=0,1$ avaliados estatisticamente. . . . .	69
Tabela 18 – Resultados experimentais dos ensaios de fadiga com razão de carregamento $R=0,1$ para CPI3DL . . . . .	70
Tabela 19 – Resultados experimentais de CPI3DL para razão de carregamento $R=0,1$ avaliados estatisticamente. . . . .	71
Tabela 20 – Resultados experimentais dos ensaios de fadiga com razão de carregamento $R=0,1$ para C PIECO . . . . .	72
Tabela 21 – Resultados experimentais de C PIECO para razão de carregamento $R=0,1$ avaliados estatisticamente. . . . .	72
Tabela 22 – Estimativa do limite de resistência à fadiga dos materiais testados para $R=0,1$ em $10^7$ ciclos . . . . .	75
Tabela 23 – Resultados experimentais dos ensaios de fadiga com razão de carregamento $R=0,3$ para CPES . . . . .	76

Tabela 24 – Resultados experimentais de CPES para razão de carregamento $R=0,3$ avaliados estatisticamente. . . . .	76
Tabela 25 – Resultados experimentais dos ensaios de fadiga com razão de carregamento $R=0,3$ para CPI3DL . . . . .	77
Tabela 26 – Resultados experimentais de CPI3DL para razão de carregamento $R=0,3$ avaliados estatisticamente. . . . .	78
Tabela 27 – Resultados experimentais dos ensaios de fadiga com razão de carregamento $R=0,3$ para CPIECO . . . . .	79
Tabela 28 – Resultados experimentais de CPIECO para razão de carregamento $R=0,3$ avaliados estatisticamente. . . . .	79
Tabela 29 – Comparativo entre dados de simulação e experimento para cada material	84

# Lista de abreviaturas e siglas

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
CPED	Corpos de prova extrudados de chapa ABS com desbaste;
CPIECO	Corpos de prova impressos de ABS Reciclado/Ecológico;
CPES	Corpos de prova extrudados de chapa ABS sem desbaste;
CPI3DL	Corpos de prova impressos de ABS 3DLAB;
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
GFFM	Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais
MA	Manufatura Aditiva
PLA	Ácido Polilático
PR	Prototipagem Rápida
SLA	<i>StereoLithography Apparatus</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
STL	<i>STereoLithography</i>

# Lista de símbolos

$\varepsilon_a$	Amplitude da deformação para método $\varepsilon$ -N
$\sigma_a$	Amplitude da tensão axial para método $\sigma$ -N
$F_a$	Amplitude em Força aplicada em um carregamento variável
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$l_0$	Comprimento inicial da seção estreita do corpo de prova
$l$	Comprimento final da seção estreita do corpo de prova
$\sigma'_f$	Constante de material para método $\varepsilon$ -N
$\varepsilon'_f$	Constante de material para método $\varepsilon$ -N
$b$	Constante de material para método $\varepsilon$ -N
$c$	Constante de material para método $\varepsilon$ -N
$\varepsilon_{ea}$	Deformação elástica para método $\varepsilon$ -N
$\varepsilon$	Deformação específica normal
$\varepsilon_z$	Deformação na direção longitudinal z
$\varepsilon_x$	Deformação na direção transversal x
$\varepsilon_y$	Deformação na direção transversal y
$\varepsilon_{pa}$	Deformação plástica para método $\varepsilon$ -N
$F_m$	Força média aplicada em um carregamento variável
$F_{min}$	Força mínima aplicada em um carregamento variável
$F_{max}$	Força máxima aplicada em um carregamento variável
$\sigma_u$	Limite de resistência à tração do material
$E$	Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young
$N$	Número de ciclos em um ensaio de fadiga
$N_f$	Número de ciclos para falha em um ensaio de fadiga



R	Razão de tensão axial para método S-N
A	Razão de amplitude axial para método S-N
$\sigma$	Tensão axial
$\sigma_{max}$	Tensão axial máxima para método S-N
$\sigma_{min}$	Tensão axial mínima para método S-N
$\sigma_m$	Tensão axial média para método S-N
$\Delta\sigma$	Variação da tensão axial para método S-N

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>20</b>
1.1	Contextualização	20
1.2	Justificativa	23
1.3	Objetivos	23
1.3.1	Objetivo Geral	23
1.3.2	Objetivos Específicos	23
1.4	Metodologia	24
1.5	Organização do Trabalho	24
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>26</b>
2.1	<b>OS POLÍMEROS</b>	<b>26</b>
2.1.1	Ácido Polilático	27
2.1.2	Acrilonitrila Butadieno Estireno	27
2.2	<b>MÉTODOS TRADICIONAIS DE MOLDAGEM DE POLÍMEROS</b>	<b>28</b>
2.2.1	Extrusão Industrial	28
2.2.2	Moldagem por Injeção	29
2.3	<b>PRINCIPAIS PROCESSOS DE IMPRESSÃO 3D</b>	<b>30</b>
2.3.1	Estereolitografia	30
2.3.2	Sinterização Seletiva a Laser	31
2.3.3	Modelagem por fusão e deposição	31
2.4	<b>FADIGA ESTRUTURAL</b>	<b>33</b>
2.4.1	O fenômeno da Fadiga	33
2.4.2	Características das falhas	35
2.4.3	Método S-N	35
2.4.4	Método $\epsilon$ -N	39
2.4.5	Fadiga em Polímeros	40
2.4.5.1	Fadiga Térmica	41
2.4.5.2	Fadiga Mecânica	41
<b>3</b>	<b>MÉTODOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>44</b>
3.1	<b>Materiais</b>	<b>44</b>
3.2	<b>Confecção dos corpos de prova</b>	<b>46</b>
3.2.1	A partir da placa ABS	47
3.2.2	A partir da Impressão 3D	49
3.3	<b>Metodologia de Ensaios</b>	<b>52</b>
3.3.1	Norma para Ensaio de Tração	52

3.3.2	Norma para Ensaio de Fadiga Axial . . . . .	55
<b>3.4</b>	<b>Procedimentos para Ensaios . . . . .</b>	<b>57</b>
3.4.1	Máquina de Ensaio de Tração . . . . .	57
3.4.2	Procedimento de Ensaio de Tração . . . . .	57
3.4.3	Máquina de Ensaio de Fadiga axial . . . . .	58
3.4.4	Procedimento de Ensaio de Fadiga axial . . . . .	59
<b>3.5</b>	<b>Análise de vida em fadiga pelo Software <i>Ansys</i> . . . . .</b>	<b>60</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>62</b>
<b>4.1</b>	<b>Teste de Tração . . . . .</b>	<b>62</b>
4.1.1	Comparação dos efeitos do desgaste . . . . .	62
4.1.2	Análise entre os materiais . . . . .	64
<b>4.2</b>	<b>Teste de Fadiga Axial . . . . .</b>	<b>68</b>
4.2.1	Testes para R=0,1 . . . . .	68
4.2.2	Testes para R=0,3 . . . . .	75
4.2.3	Análise e comparação das curvas S-N dos testes . . . . .	81
<b>4.3</b>	<b>Importação das curvas S-N experimentais no <i>Software Ansys</i> . . . . .</b>	<b>84</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>86</b>
<b>5.1</b>	<b>Sugestão para trabalhos futuros . . . . .</b>	<b>87</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>88</b>
	<b>APÊNDICES . . . . .</b>	<b>93</b>
	<b>APÊNDICE A – FICHAS DOS TESTES DE FADIGA AXIAL . . . . .</b>	<b>94</b>
	<b>APÊNDICE B – TUTORIAL PARA MTS LANDMARK . . . . .</b>	<b>100</b>
<b>B.1</b>	<b>Apresentação do Equipamento . . . . .</b>	<b>100</b>
<b>B.2</b>	<b>Preparando a estação . . . . .</b>	<b>101</b>
B.2.1	Definição dos parâmetros da estação . . . . .	101
B.2.2	Conhecendo controles da estação . . . . .	102
<b>B.3</b>	<b>Configuração para Ensaio de Tração ou Compressão . . . . .</b>	<b>106</b>
<b>B.4</b>	<b>Configuração para Ensaio Fadiga Axial . . . . .</b>	<b>108</b>
<b>B.5</b>	<b>Ligando a estação de ensaios . . . . .</b>	<b>110</b>
<b>B.6</b>	<b>Executando os ensaios . . . . .</b>	<b>112</b>
<b>B.7</b>	<b>Desligando a estação de ensaios . . . . .</b>	<b>113</b>

**ANEXOS 115**

**ANEXO A – DADOS TÉCNICOS INFORMADOS PELAS FABRICANTES . . . . . 116**

<b>A.1</b>	<b>CPI3DL - ABS Virgem . . . . .</b>	<b>116</b>
<b>A.2</b>	<b>CPIECO - ABS Reciclado . . . . .</b>	<b>117</b>
<b>A.3</b>	<b>CPES - Material ABS E8000 . . . . .</b>	<b>118</b>
<b>A.4</b>	<b>CPES - Material ABS E112 . . . . .</b>	<b>119</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

A partir do século XIX os fenômenos de fadiga e fratura, bem como suas causas, passaram a ser estudados de forma intensificada e conseqüentemente seus efeitos melhor entendidos.

O primeiro estudo realizado em fadiga de metais foi efetuado por um engenheiro de minas alemão chamado Wilhelm Albert. Por volta de 1829, Wilhelm estudou e relatou as falhas de correntes de ferro utilizadas para içamento em minas, quando estas eram submetidas a pequenas cargas repetidas. Sua constatação foi que: a fadiga não estava associada a uma sobrecarga acidental, mas dependia da carga e do número de repetições de ciclos. Desde então, os progressos e pesquisas efetuadas na área foram promissoras (PEREIRA, 2006).

O trabalho de outro engenheiro alemão chamado de August Wöhler foi notório para avanço na compreensão da fadiga. Seu estudo iniciou-se na década de 1850 e foi motivado por falhas constantes de eixos ferroviários da época. Deste modo, iniciou o desenvolvimento de estratégias de design e testes para evitar as falhas por fadiga. Wöhler testou ferros, aços e outros metais sob flexão, torção e cargas axiais. Também demonstrou que a fadiga foi ocasionada não apenas por estresses cíclicos, mas também tensões constantes ou médias (DOWLING, 2013).

Segundo ROSA (2002) e ARAUJO (2017), a fadiga de materiais pode ser descrita como um processo que leva a falha mecânica local, sendo em maioria de forma inesperada, repentina e perigosa. O fenômeno ocasiona uma redução gradual da capacidade de carga de um componente mecânico ou estrutural ao longo do tempo, sendo causado por cargas alternadas ou cíclicas, que em geral apresentam valores muito abaixo de cargas estáticas que levariam à ruptura.

Ainda de acordo com ROSA (2002), estudos na área demonstram que a maior parte das falhas mecânicas são atribuídos à fadiga do material. Desta forma, entende-se a preocupação dos engenheiros com o fenômeno, para garantir que não ocorram falhas que comprometam a segurança e funcionamento de componentes ou estruturas durante a vida útil prevista em projeto.

As falhas por fadiga já causaram perdas de muitas vidas ao longo dos anos. No setor aeronáutico pode-se lembrar o caso do primeiro avião a jato comercial de passageiros chamado Comet I (Fig. 1), que despedaçou-se em duas ocasiões na década de 1950. As trincas por fadiga começaram a se propagar nas áreas dos cantos das janelas, locais de

difícil detecção visual. E então, duas falhas catastróficas aconteceram. O primeiro acidente ocorreu em 10 de Janeiro de 1954 e o outro em 8 de Abril de 1954. As investigações concluíram que as causas das rupturas foram ocasionadas em decorrência da fadiga gerada pelos ciclos de pressurização/despressurização da fuselagem (NORTON, 2013; NARESSI J. B.; HERNANDES, 2017).



Figura 1 – Aeronave De Havilland DH-106 Comet I. Fonte: RAScholefield Collection - Airliners.net

Muito trabalho foi realizado desde os primeiros estudos na área para determinar o mecanismo físico da falha por fadiga. As solicitações exigidas dos materiais em aplicações aeronáuticas e espaciais, desde a Segunda Guerra Mundial, têm motivado ao constante incremento de investimentos relacionados à pesquisa científica dessa área. Desta forma, foi possível compreender razoavelmente bem o fenômeno da fadiga, com constante busca de respostas para as questões relacionadas ao mecanismo físico da fadiga em si (NORTON, 2013).

Com o desenvolvimento tecnológico, existe ainda a busca por novos materiais que possam substituir aqueles tradicionalmente utilizados. Dentre esses materiais, estão incluídos diversos polímeros que podem permitir sua utilização em substituição a materiais clássicos, como os metais (MANO, 2000).

Os polímeros são moléculas muito grandes constituídas pela repetição de pequenas unidades químicas, denominadas monômeros, que estão ligados entre si através de ligações covalentes. Cada macromolécula de um polímero contém milhares de átomos que se repetem. Desde os primórdios da civilização, os humanos fizeram uso dos polímeros naturais. Porém, somente após estudos do cientista Hermann Staudinger (1881-1963), ganhador do Prêmio Nobel de Química em 1953, foi possível obter os polímeros sintéticos, aproveitando-se do processo de polimerização (SOUZA, 2015).

O interesse no estudo do comportamento mecânico de materiais poliméricos está cada vez mais evidente devido ao seu crescente uso pela indústria. Os polímeros são materiais que conseguem atender simultaneamente, características bastante desejáveis, como por exemplo: baixa densidade, facilidade de fabricação/processamento e preços mais acessíveis que os materiais clássicos. São ainda materiais isolantes que apresentam excelente resistência à corrosão e boa resistência mecânica (apresentam resultados ainda melhores quando reforçados e combinados com fibras) (SOUZA, 2015).

Adicionalmente, deve-se ressaltar a facilidade de reciclagem de certos polímeros a custos mais baixos do que a maioria dos materiais tradicionais. Além disso, os polímeros possuem relação geralmente alta de resistência/massa. Portanto, são materiais bastante atrativos (KNAUSS, 1989).

Com o desenvolvimento da indústria e de novos materiais, ocorreram avanços também nas tecnologias de fabricação dos componentes. Sobretudo, destaca-se a manufatura aditiva (MA). De acordo com PALLAROLAS (2013), essa tecnologia tornou-se comercial na década de 1980, tendo inicialmente a denominação dada pelo termo prototipagem rápida (PR).

Segundo ALIHEIDARI (2017), a manufatura aditiva também conhecida como impressão 3D, pode ser definida como um processo de juntar materiais para criação de objetos diretamente de modelos 3D, utilizando o método de deposição camada por camada. Entre várias tecnologias de fabricação aditiva, existe a modelagem por deposição de material fundido oriunda do termo em inglês *Fused Deposition Modeling* (FDM). Esta foi introduzida pela primeira vez em 1991, sendo o método mais amplamente adotado, sendo uma alternativa aos métodos de produção em série convencionais de moldagem por injeção e extrusão industrial.

No processo FDM, tem-se uma máquina alimentada por um filamento de um polímero que é aquecido acima da temperatura de transição vítrea e em seguida extrudado. Esse processo segue um modelo de desenho assistido por computador denominado em inglês por *Computer Aided Design* (CAD) para criar a peça. Componentes criados por esse processo possuem aplicações no setor aeroespacial, automotivo, indústria médica, na arquitetura e dentre outras (ALIHEIDARI, 2017).

Devido ao processo de *design*, permite-se criar peças complexas, em escala de produção adaptável, com baixo custo de impressão e possibilidades de impressão multi-material, conferindo vantagens inegáveis para o método. Devido as vastas e promissoras aplicações do FDM, as peças impressas são foco de muitos estudos a respeito dos desempenhos mecânicos (ALIHEIDARI, 2017).

## 1.2 Justificativa

Este trabalho possui relevância devido a popularização dos métodos de manufatura aditiva ou prototipagem rápida no mercado, em especial modelagem por fusão e deposição de filamentos de termoplásticos por impressoras 3D, bem como todas vantagens e praticidades oferecidas pelo processo. De mesmo modo, os materiais poliméricos estão cada vez mais presentes no cotidiano, fazendo frente aos materiais tradicionais, bem como aos métodos de produção em série convencionais de injeção ou extrusão industrial.

Desta forma, torna-se de fundamental o estudo do comportamento mecânico dos polímeros, em especial quando submetidos à fadiga, bem como o fenômeno manifesta-se diante de mudanças no processo de confecção dos componentes e dos materiais.

Por exemplo, pode-se citar o estudo de caso de polímeros para confecção de componentes estruturais de drones e veículos aéreos não tripulados.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo Geral

O trabalho tem como propósito avaliar as propriedades mecânicas e o comportamento em fadiga do plástico ABS produzido pelo processo de manufatura aditiva, utilizando o método de modelagem por fusão e deposição, popularmente conhecido como impressão 3D, bem como comparar os resultados com amostras de plástico ABS produzido por extrusão tradicional.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são descritos da seguinte forma:

- Apresentar metodologia para obtenção das principais propriedades mecânicas de corpos de provas de ABS;
- Produzir e preparar os corpos de provas por impressão 3D e extrusão tradicional para ensaios mecânicos de tração e fadiga axiais;
- Realizar ensaios de tração nos corpos de prova e discutir seus resultados;
- Realizar ensaios de fadiga axial do tipo tração-tração nos corpos de prova e discutir seus resultados;
- Avaliar e discutir os efeitos das mudanças das matérias-primas dos corpos de prova, bem como os resultados dos ensaios, quando estes são comparados entre si.



## 1.4 Metodologia

Inicialmente, planejou-se reunir e preparar os materiais necessários, bem como executar os ensaios de tração axiais obrigatórios para avançar no estudo de caracterização mecânica de cada tipo de ABS.

Ressalta-se o processo de obtenção dos espécimes a partir de chapas de ABS produzidas anteriormente por processo tradicional de extrusão. Simultaneamente, houve a produção de amostras por impressão 3D utilizando como matéria prima ABS virgem e reciclado. Assim, permitiu-se obter três grupos de materiais para análise.

Os corpos de prova foram confeccionados e testados conforme normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), bem como os resultados foram processados e analisados.

As impressões 3D dos corpos de prova foram realizadas em equipamento presente no Laboratório de Sistemas Aeroespaciais do Campus Gama. O corte da placa de ABS foi executada em maquinário externo, não pertencente a Universidade. Os ensaios de tração axial foram executados no Laboratório de Caracterização de Materiais do Campus Gama. Os ensaios de fadiga foram realizados no Laboratório do Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais (GFFM) situado no prédio SG-9 do Campus Darcy Ribeiro.

É apresentado um estudo para averiguar o comportamento das diferentes amostras de plástico ABS quando submetidas à fadiga axial. As amostras foram testadas em carregamentos cíclicos com tensões médias positivas, sob regimes de tração-tração.

Os valores de tensões aplicadas e número de ciclos até a falha para cada amostra foram computadas e utilizadas para levantamento inicial das curva S-N para os respectivos materiais e opções de carregamento.

Adicionalmente, dados das curvas S-N levantadas foram inseridas no *software Ansys* para que sejam exploradas e realizadas simulações com carregamentos, bem como geometrias diversas.

Desta forma, o fluxo de atividades assim propostas e executadas forneceram conhecimento teórico para execução experimental do trabalho.

## 1.5 Organização do Trabalho

O Capítulo 1 apresenta breve introdução ao trabalho, buscando uma contextualização ao qual o projeto está sendo desenvolvido. Também é apresentado a motivação e os objetivos propostos.

O Capítulo 2 trata da revisão bibliográfica. Apresenta breve resumo teórico sobre polímeros, processos de manufatura, impressão 3D, conceito de fadiga, análise de vida em

fadiga e normas para ensaios mecânicos.

O Capítulo 3 traz detalhamento dos procedimentos experimentais utilizados para confecção dos corpos de prova e realização dos ensaios mecânicos de tração e fadiga axial.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões. Foram apresentados os dados obtidos após os testes, além do comparativo e análise destes.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões e sugere linhas de pesquisa para trabalhos futuros.

O Apêndice apresenta na Seção A, as planilhas dos ensaios de fadiga, com detalhamento dos carregamentos utilizados e número de ciclos dos espécimes até a falha. Em seguida, o Apêndice de Seção B inclui um breve tutorial de procedimentos para operação da máquina de ensaios mecânicos MTS Landmark.

Por fim, o Anexo Seção A, apresenta tabelas informadas pelas fabricantes com as propriedades mecânicas e físicas das matérias-primas utilizadas na fabricação dos materiais utilizados nos testes deste trabalho.

## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentado uma revisão teórica do conceito de polímeros, evidenciando as características do plástico ABS, os métodos tradicionais de processamento/moldagem dos polímeros, principais processos de impressão 3D, teoria de fadiga mecânica e comportamento dos polímeros quando solicitados ciclicamente.

### 2.1 OS POLÍMEROS

A palavra polímero tem origem do grego *polis* (muitas ou muitos) e *meros* (partes). Desta forma, um polímero é caracterizado como um macromolécula (molécula de alta massa molar) formada por milhares de unidades de repetição unidas por ligação covalente. O polímero pode ser formado de material orgânico ou inorgânico (CANEVAROLO, 2006).

As propriedades dos polímeros dependem bastante dos materiais de partida (monômeros), do tipo de reação empregada na sua obtenção e também na técnica de preparação do composto. Além das macromoléculas encontradas na natureza (polímeros naturais), muitos produtos químicos com longas cadeias podem ser obtidos por processos sintéticos (MANO, 2000).

Ainda segundo MANO (2000), os polímeros podem ser classificados de diversas formas, porém destacam-se duas categorias em especial. Quanto as características de fusibilidade e/ou solubilidade do polímero, podem ser organizados entre termoplásticos e termorrígidos (ou também chamados de termofixos). Quanto ao comportamento mecânico, podem ser distribuídos entre borrachas ou elastômeros, plásticos e fibras.

Para SOUZA (2015), os termorrígidos são componentes que após reação de formação (ou aquecimento até fusão), realizam ligações químicas cruzadas intermoleculares, resultando em produtos com estrutura reticuladas, infusíveis e insolúveis. Os termoplásticos se fundem por aquecimento e solidificam por resfriamento, em um processo reversível.

Já os elastômeros ou borrachas são materiais macromoleculares que exibem elasticidade em longa faixa, à temperatura ambiente, sendo uma classe intermediária entre os termoplásticos e termorrígidos (MANO, 2000).

O plástico (origem do termo em grego que refere-se a "adequado à moldagem") é caracterizado por um material macromolecular que embora sólido no estado final, em algum estágio do seu processamento pode tornar-se fluido e moldável, por ação isolada ou conjunta de calor e pressão (MANO, 2000).

Por último, existem as fibras que possuem alta ductibilidade e resistência a tra-

ção. São macromoléculas lineares, orientáveis longitudinalmente, com estreita faixa de extensibilidade, parcialmente reversível (como os plásticos), permitindo elevada relação comprimento/diâmetro. Resistem às variações de temperatura de -50 a +150°C, sem alteração substancial das propriedades mecânicas (MANO, 2000).

Os principais polímeros utilizados em impressão 3D são o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e o Ácido Polilático (PLA).

### 2.1.1 Ácido Polilático

O ácido polilático (PLA) (Figura 2) é um termoplástico sintético formado pela união em cadeias do ácido lático, sendo este um composto orgânico obtido pelo processo de fermentação de vegetais rico em amido, como a beterraba, milho e mandioca (BARROS, 2011).

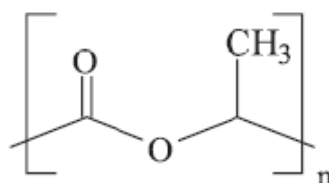


Figura 2 – Estrutura Química do PLA. Fonte: Adaptado de (BARROS, 2011)

É um polímero biodegradável, reciclável e produzido por fontes renováveis. Possui propriedades mecânicas superiores ou semelhantes aos demais polímeros derivados do petróleo (BARROS, 2011).

### 2.1.2 Acrilonitrila Butadieno Estireno

Segundo FERREIRA; PESSAN; JUNIOR (1997), o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) é um copolímero formado por unidades derivadas de três monômeros diferentes, cuja proporção de formação define as características gerais do polímero. O ABS é amorfo com estrutura complexa constituída de três fases diferentes, sendo elas: "uma fase borrachosa de polibutadieno, dispersa numa matriz vítrea formada por copolímero acrilonitrila e estireno (SAN), e uma terceira fase constituída de moléculas de polibutadieno grafitizadas com moléculas de SAN".

Ainda de acordo com FERREIRA; PESSAN; JUNIOR (1997), o ABS possui excelente resistência ao impacto a baixas temperaturas, entretanto tem como desvantagem a baixa resistência a solventes. A representação do ABS é dada pela Fig. 3.

O ABS pode ser definido também como um termoplástico derivado do petróleo que é amplamente utilizado na indústria, sendo um dos principais e primeiros materiais utilizados na impressão 3D. Suas características permitem boa rigidez, elevada estabilidade

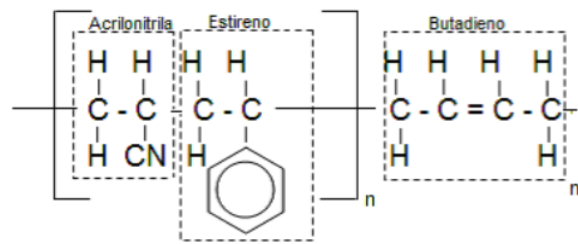


Figura 3 – Estrutura Química do ABS. Fonte: [KLEIN \(2009\)](#) adaptado de [MANO \(2000\)](#)

dimensional, porém baixa resistência a intempéries ambientais ([SILVA, 2017](#); [CANEVAROLO, 2006](#)).

Ainda segundo [BESKO \(2017\)](#), durante o processo de impressão 3D, o aquecimento do filamento gera uma pequena quantidade de gases que são considerada tóxicos, e por isso é recomendável a execução da impressão em áreas ventiladas. Por outro lado, o material pode deformar-se durante o processo de impressão, necessitando aquecimento da mesa de impressão e uso de impressoras fechadas para atenuar o problema de contração do material quando este é resfriado.

A Tab. 1 reúne as principais propriedades mecânicas e os respectivos valores de referencial teórico esperados para o plástico ABS.

Tabela 1 – Principais propriedades mecânicas do plástico ABS. Fonte: ([CAMBRIDGE, 2003](#))

Propriedades	ABS - Referencial Teórico
Módulo de Elasticidade – E (GPa)	1,1 a 2,9
Tensão de Ruptura (MPa)	25,2 a 45,6
Resistência à Tração (MPa)	27,6 a 55,2
Tensão de Escoamento (MPa)	18,5 a 51
Coef. Poisson Estimado	0,35

## 2.2 MÉTODOS TRADICIONAIS DE MOLDAGEM DE POLÍMEROS

### 2.2.1 Extrusão Industrial

Durante o processo de extrusão (Fig. 4), o polímero é adicionado em forma de *pallets* ao funil e conduzido pela rosca, que o impulsiona por todo percurso. Durante esta fase, variáveis como temperatura de processamento, tipo de rosca e a velocidade do processamento são cuidadosamente escolhidas e controladas, dependendo diretamente das características do material a ser processado ([BETAEQ, 2016](#)).

A rosca pode ainda ser dividida em três partes, fazendo parte de etapas de processamento, sendo elas: a alimentação, a compressão e a dosagem. O diâmetro da rosca aumenta ao longo dessas etapas, proporcionando a geração de calor por cisalhamento. O polímero fundido antes da saída da extrusora, passa por um filtro, que tem o poder de remover impurezas e partes não fundidos, favorecendo bom controle do produto entregue pela máquina de extrusão (BETAEQ, 2016).

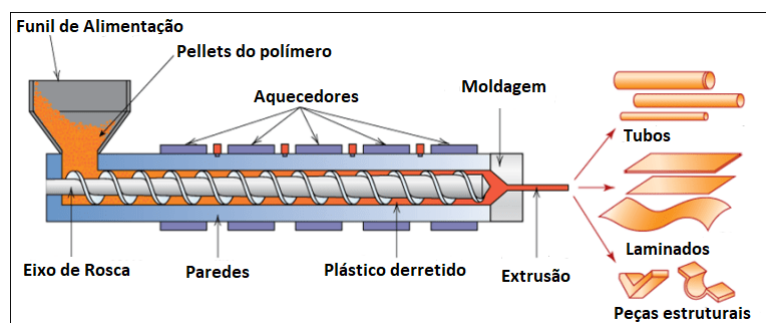


Figura 4 – Esquemático simplificado de máquina extrusora. Fonte: Adaptado de (SIQUEIRA, 2016)

O processo de extrusão é vantajoso devido alta produtividade e continuidade, aliado a excelente eficiência na fusão do plástico, bem como possibilidade de usar matérias-primas de diferentes formas e até material reciclado. Além disso, o material extrudado possui em geral características isotrópicas. Por outro lado, quando a peça possui perfis complexos, a extrusão não é o processo mais indicado, devido limitações de confecção associadas à geometria (BETAEQ, 2016).

### 2.2.2 Moldagem por Injeção

O processo de moldagem por injeção (Fig. 5) consiste em uma técnica em que o material é fundido e forçado a entrar em uma cavidade através de uma rosca simples, até ao interior de um molde. É descrito como um processo complexo em função do número de variáveis de controle associadas que afetam diretamente a qualidade da peça injetada. Os moldes são geralmente confeccionados de aço e podem ter uma ou mais cavidades (BETAEQ, 2016; RIBEIRO, 2018).

Segundo RIBEIRO (2018), para obter-se uma injeção estável e peças com qualidade, faz-se necessário haver um equilíbrio entre os principais parâmetros de controle: tempo de injeção, temperatura do molde e do material injetado, pressão de injeção e recalque, tempo de resfriamento, volume do material injetado, dentre outros. As peças moldadas por injeção são usadas em larga escala pela indústria.

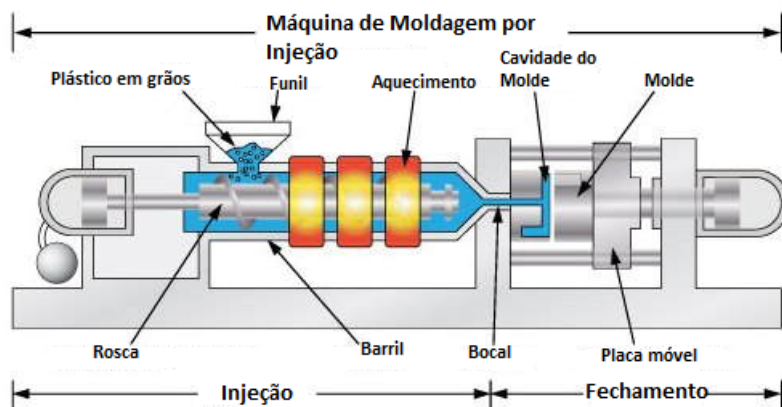


Figura 5 – Esquemático simplificado de máquina de moldagem por injeção. Fonte: Adaptado de (INDUSTRIAL, 2018)

## 2.3 PRINCIPAIS PROCESSOS DE IMPRESSÃO 3D

### 2.3.1 Estereolitografia

Segundo ARAUJO (2018), na década de 80 o tempo médio de prototipagem de um novo produto demandava um longo período e custos altos. Naquela época, programas de computadores voltados para modelagem 3D estavam sendo aprimorados e existiam pesquisadores empenhados no desenvolvimento necessários para a tecnologia de impressão 3D.

Desta forma, surgiu em 1986 a primeira impressora 3D criada por Charles Hull. Esse equipamento era baseado em uma técnica denominada *StereoLithography Apparatus (SLA)* ou Estereolitografia (ASTROSCIENCE3D, 2018).

Esse método, basicamente utiliza feixes de laser com alta precisão que são projetados em uma resina para imitar e solidificar (curar) sucessivamente os contornos do projeto 3D desenvolvido. Há um reservatório onde a resina fotopolimerizante é depositada e uma base de impressão se movimenta no eixo Z em conjunto com o feixe de laser, constituindo camada por camada do objeto (ARAUJO, 2018).

Esse método possui alto grau de precisão (até 15  $\mu\text{m}$ ) e acabamento superficial, sendo uma das tecnologias mais caras atualmente. Quando o modelo é finalizado, a base de impressão emerge da resina impregnada com resina líquida, então a peça e a base precisam ser limpas em uma solução aquosa para posteriormente este ser submetido a uma câmara de luz ultravioleta para completar a cura da resina. Portanto, As peças produzidas por esse processo não podem ser utilizadas imediatamente (ARAUJO, 2018).

### 2.3.2 Sinterização Seletiva a Laser

Em 1989 Carl Deckard desenvolveu a tecnologia *Selective Laser Sintering (SLS)* ou Sinterização Seletiva a Laser, sendo compreendida por um laser de sinterização seletiva (ARAUJO, 2018).

Pulsos controlados de laser são direcionados para uma plataforma e este desenha a seção transversal da peça a ser impressa por meio de micropartículas de plástico, cerâmica ou vidro. O pó é aquecido até uma temperatura próxima do seu ponto de fusão, fazendo com que as partículas se solidifiquem no formato desejado. A plataforma é então rebaixada, o pó repostado para que a próxima camada seja sinterizada. O processo é então repetido até que a peça seja formada (ASTROSCIENCE3D, 2018).

### 2.3.3 Modelagem por fusão e deposição

De acordo com BESKO (2017), o processo mais utilizado nas impressoras 3D (Fig. 6) convencionais é baseado no processo FDM. O autor afirma ainda que a impressão 3D pode ser definida como um processo em que um modelo tridimensional é confeccionado em CAD, em seguida é gerado um arquivo que é enviado a um sistema de Manufatura Auxiliada por Computador, originado do termo em inglês *Computer Aided Manufacturing (CAM)*, para ser dividido em inúmeras camadas (partes).

Segundo FERNANDES (2016), o processo de impressão 3D pode ser dividido nas seguintes etapas:

- Modelagem;
- *Slicing* ou Fatiamento;
- Processo de impressão em si;

A Modelagem consiste na criação de um modelo 3D com as mais variadas geometrias utilizando algum software CAD. Já o *Slicing* ou fatiamento consiste na divisão do modelo em várias seções transversais, criando um arquivo de código G com todas as informações necessárias para que a impressora possa imprimir um modelo CAD. Este passo também é responsável por orientar o modelo para a melhor posição de impressão, criar estruturas de suporte e preenchimento, definindo ainda os parâmetros de impressão, como por exemplo temperatura e velocidade (FERNANDES, 2016).



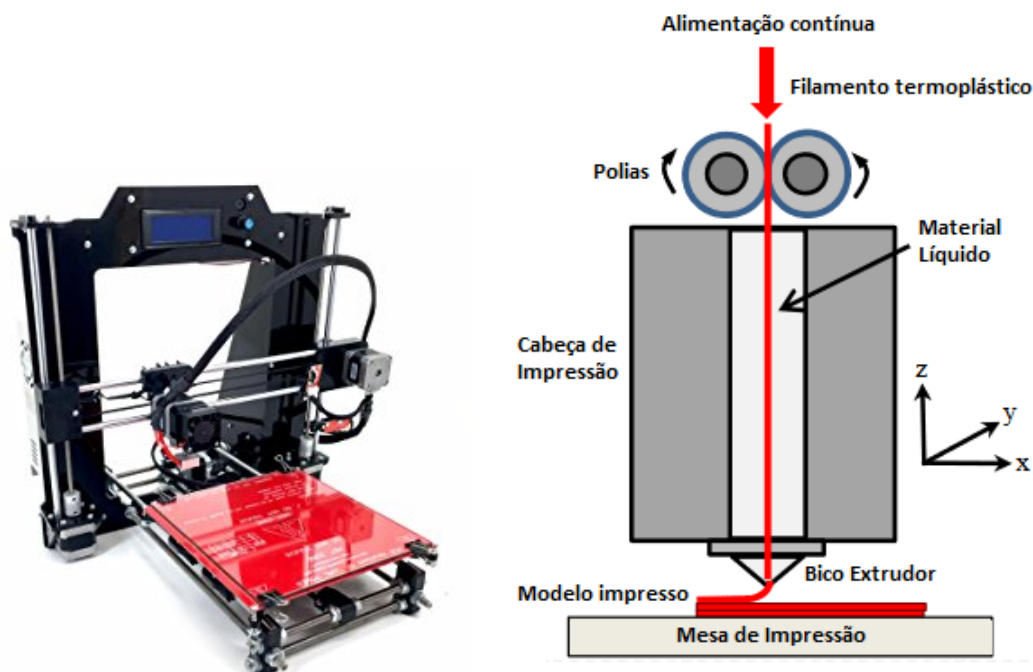


Figura 6 – Impressora 3D RepRap Prusa I3 (Fig. à esquerda) e Esquemático do processo FDM (Fig. à direita). Fonte: Fonte: Amazon.com e (ZIEMIAN C.; SHARMA, 2017) com adaptações.

Durante o processo de impressão, o filamento é tracionado por meio de polias até o bico extrusor, onde é aquecido para fundir-se e ser empurrado até um bico de saída, permitindo a vazão do material para deposição de camadas sobre camadas (Fig. 6). Durante o procedimento contínuo de deposição de camadas sobre a mesa, quando o filamento da camada superior toca a camada anteriormente depositada, esta se solidifica unindo-se à peça. A cabeça de impressão ou a mesa pode movimentar-se em três eixos: X, Y e Z, inserindo material conforme o modelo e formato de impressão desejado.

De acordo com PERES (2016), quanto maior a espessura das camadas, maior a resistência mecânica do objeto. O processo de deposição de camadas é responsável pela anisotropia na impressão 3D. Declara ainda, que podem existir concentradores de tensão devido baixa soldabilidade destas camadas, resultando em diminuição da resistência mecânica da peça.

Os espaços vazios demonstrado na Fig. 7 são causados pelo preenchimento incompleto (falha de preenchimento) da área dentro do perímetro da peça, inerente ao método de deposição de material sobre camadas. Para reduzir e preencher esses vazios, pode-se adotar um espaçamento negativo ao perímetro da peça e/ou aumentar a taxa de deposição nos pontos de interseção das camadas. Outros defeitos que podem ocorrer, envolvem a variação das dimensões do filamento ocasionadas por fluxo inconsistente de material - devido ao escorregamento do filamento no sistema de alimentação (SANTANA, 2015).

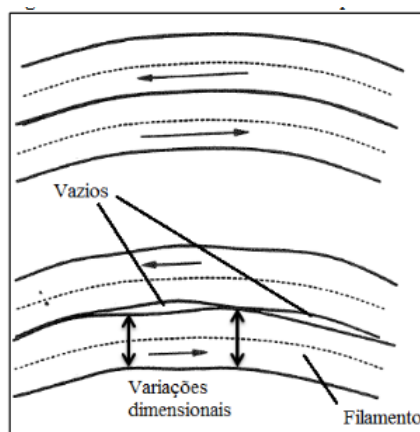


Figura 7 – Vazios entre filamentos depositados e efeito de variação dimensional. Fonte: (SANTANA, 2015) adaptado de WEEREN et al (1995).

## 2.4 FADIGA ESTRUTURAL

### 2.4.1 O fenômeno da Fadiga

De acordo ROSA (2002), a fadiga pode ser definida como uma redução gradual da capacidade de carga de um componente. Desta forma, ocorre a ruptura lenta do material em razão do avanço quase infinitesimal das fissuras que se formam no seu interior. O crescimento dessas fissuras ocorre para cada flutuação do estado de tensões.

Ainda segundo ROSA (2002), como uma estrutura está sujeita à cargas contantes ou variáveis, que fazem com que, ao menos em alguns pontos, ocorra deformações plásticas também variáveis com o tempo. Estas deformações levam o material a uma deterioração progressiva, dando origem à trinca, a qual cresce até atingir um tamanho crítico, suficiente para a ruptura final, em geral brusca, apresentando características macroscópicas de uma fratura frágil.

Os componentes de máquinas, veículos e estruturas são frequentemente submetidos a cargas alternadas (modelagem ideal), pulsantes ou flutuantes (Fig. 8).

Os efeitos resultantes dessas tensões podem levar a danos físicos microscópicos aos materiais envolvidos, resultando em sua posterior falha. (DOWLING, 2013).

Segundo (SHIGLEY, 2005), existem três estágios na falha por fadiga (crescimento da trinca):

- Início da trinca (fase de iniciação);
- Propagação da trinca (fase de propagação);
- Ruptura repentina devido ao crescimento instável da trinca - instantâneo, sem aviso prévio, súbito (falha propriamente dita).

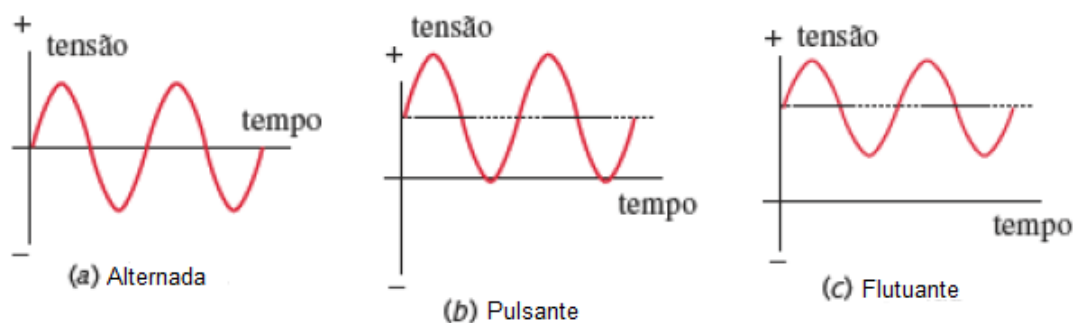


Figura 8 – Tensões cíclicas variantes no tempo. Fonte: (NORTON, 2013).

Na prática, os carregamentos em que um componente pode estar sujeito podem ser diferentes, modificando os valores de amplitude, frequência e tensões médias. Na Fig. 9 verifica-se o exemplo de carga em voo típica para uma aeronave fixa (imagem superior) e o carregamento equivalente simplificado (imagem inferior).

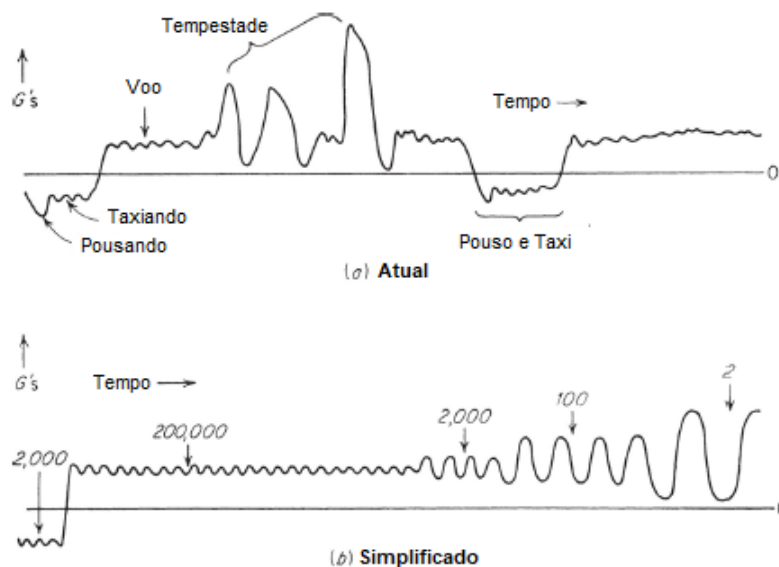


Figura 9 – Carga em voo típica para uma aeronave de asa fixa. Fonte: (DOWLING, 2013) com adaptações.

Segundo (DOWLING, 2013; AMUCHASTEGUI, 2011), existem atualmente as seguintes abordagens para analisar e estudar as falhas por fadiga:

- Método S-N - baseado na curva de tensão pelo número de ciclos do componente. Considera a vida de fadiga até a ruptura total. A análise é baseada nas tensões nominais (médias) na região afetada. A tensão nominal que pode ser resistida sob carga cíclica é determinada considerando as tensões médias e ajustando aos pontos concentradores de tensão (furos, entalhes, juntas parafusadas e rebetadas, mudanças

bruscas de geometria). É um método mais antigo e mais utilizado, indicado para fadiga de alto ciclos onde a deformação é predominantemente elástica;

- Método  $\varepsilon$ -N - baseado na curva de deformação pelo número de ciclos do componente. Considera a vida de fadiga até a nucleação da trinca. É o método mais complexo que o S-N, indicado para fadiga de baixo e alto ciclo, abrangendo deformações plástica e elástica;
- Mecânica da Fratura - cálculo da vida no estágio da detecção e propagação da trinca. Considera o início da contagem de ciclos com a nucleação da trinca. É um método bastante complexo, sensível a condições iniciais da trinca.

As curvas de fadiga são obtidas por meio de ensaios mecânicos considerando as propriedades do material, a amplitude e tipo de carregamento, correlacionando a tensão ou deformação com o número de ciclos até a falha ou nucleação da trinca do corpo de prova (AMUCHASTEGUI, 2011).

#### 2.4.2 Características das falhas

Segundo CARNEIRO (2015), as falhas por fadiga não provocam mudanças drásticas de comportamento mecânico da estrutura até que se esteja próximo à ruptura. As trincas em geral, se iniciam a partir de concentradores de tensão como: furos, entalhes, juntas parafusadas e transições geométricas acentuadas.

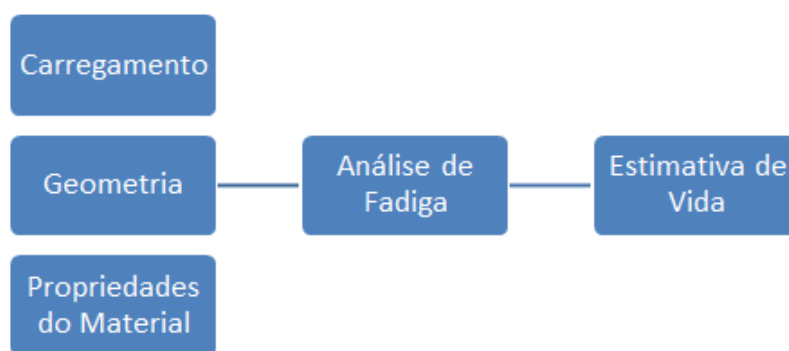


Figura 10 – Esquemático para estimativa da vida em Fadiga. Fonte: (AMUCHASTEGUI, 2011) com adaptações.

#### 2.4.3 Método S-N

A curva de tensão *versus* número de ciclos ou Curva de Wöhler é utilizada para determinar a vida útil de componentes de máquinas e estruturas, onde S representa a tensão aplicada e N o número de ciclos. Esta é construída a partir de ensaios de fadiga. O procedimento para estimativa do número de ciclos está esquematizado na Fig. 10.

A origem do método remete-se aos trabalhos do engenheiro alemão August Wöhler que ensaiou corpos de prova simulando eixos de vagões ferroviários, onde estes falhavam em pouco tempo de serviço, mesmo quando submetidos à cargas inferiores aos limites estáticos conhecidos.

Nestas simulações foi introduzido o conceito de tensão alternada, submetida ao corpo de prova até sua falha por fratura, que acontecia após um número  $N$  de ciclos. Assim, foi compreendido que a tensão que um material pode suportar ciclicamente é inferior que o suportável em condições estáticas, existindo um patamar de tensão em que a vida em ciclos não apresentava risco para fratura do material.

O número de ciclos até a falha mudam rapidamente com o nível de tensão da curva, onde esta pode variar ao longo de vários ordens de magnitude. Por esse motivo, os números dos ciclos são geralmente plotados em um gráfico (Fig. 11) de escala mono-logarítmica ou logatítmica para melhor visualização. (DOWLING, 2013).

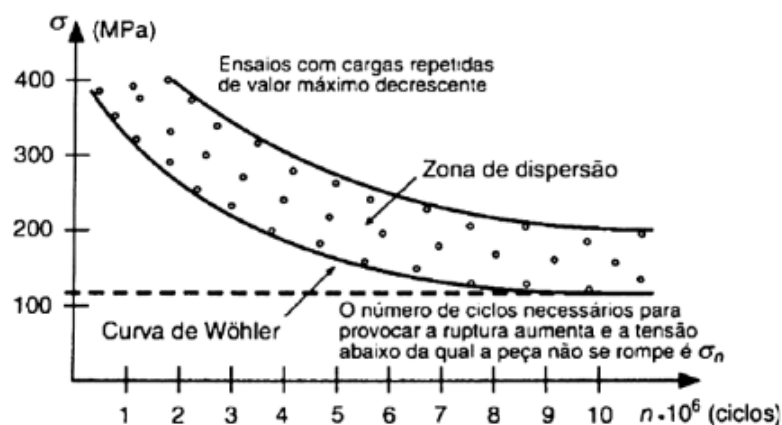


Figura 11 – Curva S-N genérica em escala mono-logarítmica. Fonte: (AMUCHASTEGUI, 2011) com adaptações.

Considerando um carregamento cíclico senoidal, os parâmetros envolvidos podem ser vistos pela Fig. 12 e calculados a partir das equações:

- Variação de tensão:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2.1)$$

- Amplitude de tensão:

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.2)$$

- Tensão média:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.3)$$

- Tensão máxima:

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a \quad (2.4)$$

- Tensão mínima:

$$\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a \tag{2.5}$$

- Razão (R) de tensão:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \tag{2.6}$$

- Razão (A) de amplitude:

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \tag{2.7}$$

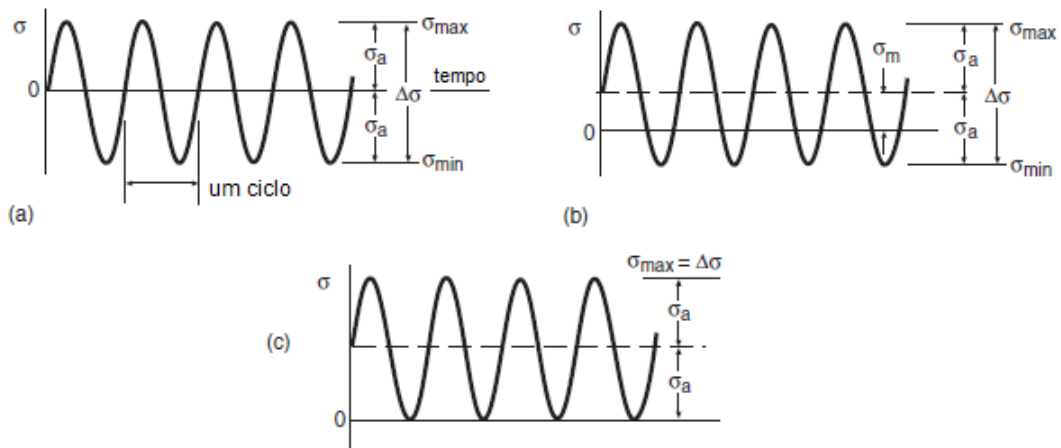


Figura 12 – Exemplos de carregamentos cíclicos de amplitude constante. Fonte: (DOWLING, 2013) com adaptações.

Assim, se  $\sigma_m = 0$ , a carga é dita alternante, caso contrário ela será flutuante. Se  $\sigma_{min} = 0$ , a solicitação embora flutuante, será agora denominada pulsante.

No gráfico S-N em escala logarítmica, a equação que aproxima o comportamento para um dado material pode ser descrita como uma equação de uma reta do tipo:

$$\sigma_a = AN^b \tag{2.8}$$

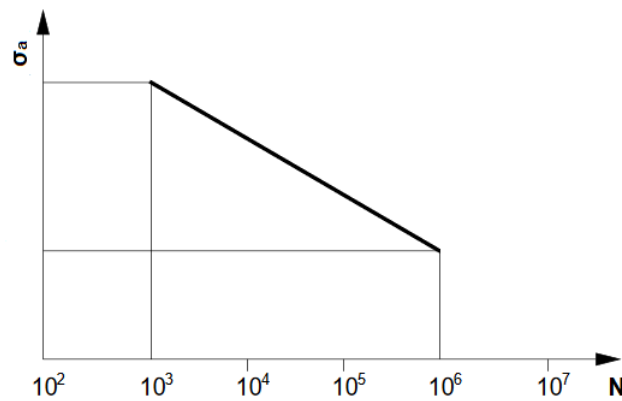


Figura 13 – Intervalo de aplicação da curva S-N em gráfico de escala logarítmica. Fonte: (ROSA, 2002) com adaptações.

A Eq. 2.8 apresenta uma relação entre amplitude de tensão de um carregamento ( $\sigma_a$ ) e número de ciclos até a falha ( $N$ ). Os valores de  $A$  e  $b$  são constantes que vão depender das propriedades de resistência à fadiga do material. Essa equação pode descrever o comportamento à fadiga (Fig. 13) da curva S-N em geral no intervalo de  $10^3$  e  $10^6$  ciclos (ROSA, 2002).

De acordo com SILVA (2014, para ciclos de tensão altos, os materiais tendem a falhar com número relativamente baixo de ciclos. Já para tensões baixas, poderão ser submetidos por um número alto de vezes, pois o ponto de falha é indefinido. Este último, que limita o valor de tensão abaixo do qual o material não falhará, é chamado o limite de resistência à fadiga. O limite de resistência à fadiga também pode ser definido como a tensão em que a curva S-N se torna assintótica à linha horizontal (SHAH, 2002), comportamento observado para o caso de ligas metálicas e metais ferrosos (SHIGLEY, 2005).

A tensão média é caracterizada levando em consideração a razão de tensão  $R$ . Se o valor de  $R$  for igual a  $-1$ , o ciclo possui tensão totalmente revertida. Se este for igual a  $0$ , o ciclo possui tensão zero. Se  $R$  possuir valor igual a  $1$ , será um carregamento estático (SURESH, 2018).

Quando uma tensão média diferente de zero atua em conjunto a uma tensão alternante, o limite de resistência à fadiga do material se torna prejudicado (SURESH, 2018). Esse efeito pode ser visualizado na Fig. 14.

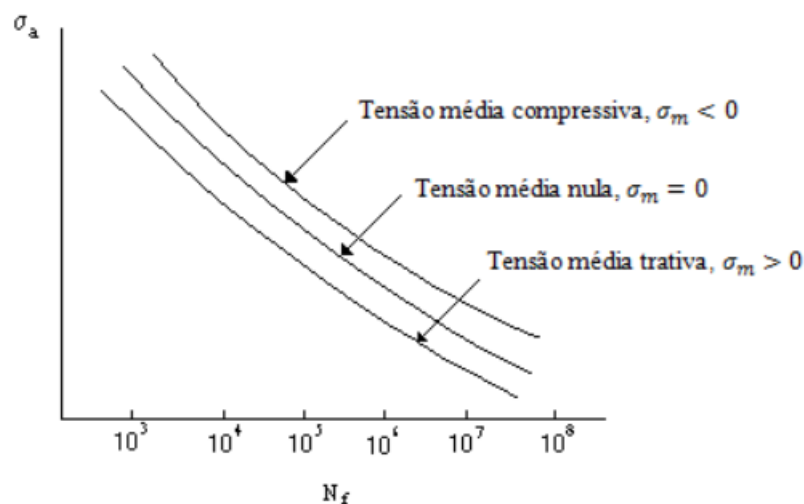


Figura 14 – Efeito da tensão média nas curvas S-N. Fonte: (SOUZA, 2016).

Um outro método de apresentar os resultados do efeito de uma tensão média, não nula, sobre a resistência à fadiga do material é conhecido como diagrama  $\sigma_a$ - $\sigma_m$ . Assim, o efeito da tensão média  $\sigma_m$  é marcado pela redução da tensão alternante  $\sigma_{min}$  que o material resiste, para  $N$  diferentes vidas.

A construção desse gráfico pode ser iniciada pela determinação de dois pontos. O primeiro ponto é obtido pela amplitude da tensão alternante que leva à falha, com a tensão média  $\sigma_m$  igual a zero, obtido da curva S-N para uma vida de  $N$  ciclos. O outro ponto característico é obtido considerando um limite para a tensão média, como por exemplo o limite de resistência à tração  $\sigma_u$  ou outra tensão de interesse (ROSA, 2002).

A partir desses dois pontos pode-se traçar uma curva ou utilizar uma reta unindo os dois pontos, determinando o limite do diagrama (Fig. 15). Pontos intermediários podem se distribuir de diversas formas dentro desse intervalo, dependendo do material, da geometria do corpo ensaiado, das condições de carregamento e outros fatores (ROSA, 2002).

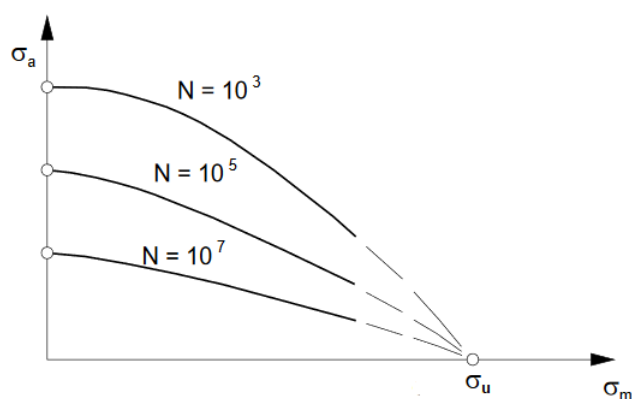


Figura 15 – Exemplo de diagrama  $\sigma_a$ - $\sigma_m$ . Fonte: (ROSA, 2002) com adaptações.

De acordo com GUERRA (2016), existem vários critérios para definir a curva do diagrama  $\sigma_a$ - $\sigma_m$ . Isso dependerá de como será definido o modo de falha para carga estática do componente, e assim como é limitada a resistência para este modo de falha. Este limite também pode ser a tensão do limite de escoamento, a tensão limite de resistência ou então a tensão última. A escolha do tipo de tensão dependerá da aplicação a qual a peça será submetida ou a forma em que as tensões são analisadas, como por exemplo, tensões locais, no ponto crítico ou como tensões nominais na seção crítica.

#### 2.4.4 Método $\varepsilon$ -N

Segundo DOWLING (2013), o método  $\varepsilon$ -N foi desenvolvido entre as décadas de 1950 e 1960. Considera a deformação plástica que pode ocorrer em regiões onde as trincas se iniciam. Normalmente estes locais são regiões de bordas, furos e pontos concentradores de tensão. Este procedimento permite considerar situações de fadiga onde o escoamento local está envolvido, que normalmente é empregado na análise de metais dúcteis em vidas relativamente curtas. A abordagem também é aplicável onde há pouca plasticidade em vidas longas.

O método compreende os efeitos de plasticidade e elasticidade (Fig. 16). Fornece



ainda estimativas melhoradas especialmente para vidas curtas de fadiga, permitindo um tratamento mais racional e preciso dos efeitos de deformação empregando a tensão média local em entalhes, ao invés da tensão média nominal (DOWLING, 2013).

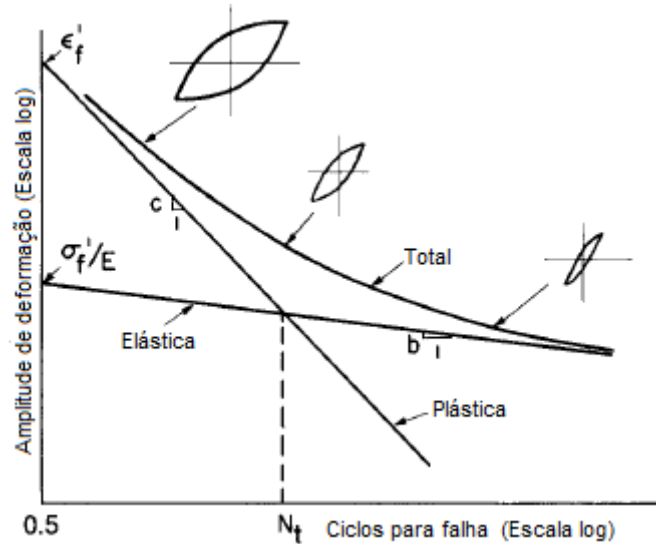


Figura 16 – Deformação elástica, plástica e total *versus* ciclos. Fonte: (DOWLING, 2013) adaptado de ASTM por Landgraf 70.

Onde as propriedades podem ser calculadas por:

- Amplitude da deformação:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ea} + \varepsilon_{pa} \quad (2.9)$$

Onde  $\varepsilon_{ea}$  é a parcela da deformação elástica e  $\varepsilon_{pa}$  a parcela da deformação plástica.

- Amplitude da deformação reescrita:

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (2.10)$$

Onde  $\sigma_f'$ ,  $\varepsilon_f'$ ,  $b$ ,  $c$  são valores dependentes do material.  $N_f$  são os números de ciclos até a falha.  $E$  é módulo de elasticidade do material.

- Amplitude de tensão pode ser relacionada como:

$$\sigma_a = \sigma_f' (2N_f)^b \quad (2.11)$$

### 2.4.5 Fadiga em Polímeros

As falhas por fadiga em materiais poliméricos podem ocorrer por duas formas: por fadiga mecânica, com iniciação e propagação de uma trinca até a falha, bem como por fadiga térmica (SCHULTZ, 1977), onde a falha ocorre por amolecimento térmico e derretimento devido ao aquecimento histerético.

### 2.4.5.1 Fadiga Térmica

Em carregamentos com altas frequências ou taxas de deformação relativamente altas, as falhas por fadiga térmica ocorrem por amolecimento térmico devido aos efeitos de histerese que resultam da viscoelasticidade, do alto amortecimento e baixa condutividade térmica dos polímeros (CHANDRAN, 2016).

A energia histerética da carga cíclica é dissipada principalmente como calor, mas grande parte é absorvida pelo material, aumentando sua temperatura e causando consequentemente perda de rigidez. Esse aumento de temperatura leva à degradação do material e a diminuição da vida em fadiga. Desta forma, aplicações mecânicas de polímeros que envolvam carregamentos com altas frequências são pouco prováveis e aconselháveis (DAO; DICKEN, 1987).

Em frequências mais baixas, os efeitos térmicos tornam-se pouco dominantes e a vida em fadiga passa a depender em maior proporção pelos efeitos causados pelo carregamento mecânico.

### 2.4.5.2 Fadiga Mecânica

A fadiga mecânica para polímeros é um processo de separação física na qual uma superfície de fratura frágil é produzida pela iniciação e crescimento da trinca (HERTZBER, 2012; CRAWFORD; BENHAM, 1975), conforme exemplo da Fi. 17.



Figura 17 – Exemplo de fatura por fadiga. Fonte (ASM, 2008)

As falhas mecânicas devido a cargas mecânicas cíclicas, normalmente são caracterizadas pelo método S-N. Os mecanismos de fadiga e crescimento de trincas desde a iniciação e crescimento são baseadas em abordagens genéricas derivadas daquelas dos metais, pois atualmente não há uma teoria física específica para os polímeros (CHANDRAN, 2016).

De acordo com CHANDRAN (2016), ao analisar a maioria dos dados de fadiga dos polímeros, independentemente de sua composição química ou microestrutura, estes demonstram similaridade em forma àquelas encontradas nos metais. Essa semelhança, permite afirmar que é possível existir um mecanismo macroscópico comum de início e

crescimento de trincas (embora com graus variáveis de ruptura em diferentes polímeros) no nível da amostra estudada.

A fadiga de um material polimérico ocorre devido à aplicação de tensões cíclicas com valores abaixo dos requeridos para causar escoamento ou fratura. O efeito destas tensões cíclicas causam a iniciação de trincas microscópicas em centros de concentração de tensões ou sobre a superfície, onde a propagação destas trincas levam a falha do material (OLIVIER, 2007).

A falha por fadiga ocorre de forma repentina, em pontos localizados de uma dada estrutura. Essas áreas normalmente correspondem a regiões de elevadas tensões e deformações devido ao carregamento aplicado, como locais de mudanças abruptas de geometria, presença de tensões residuais e imperfeições do material, como poros e descontinuidades. A falha do material ocorre pela propagação de uma trinca até que esta atinja um comprimento tal que parte do material remanescente não possa mais suportar as tensões e deformações decorrentes do carregamento externo, ocorrendo a falha por fratura frágil (OLIVIER, 2007).

A fonte básica das trincas são os defeitos dos materiais. Essas explicam a grande dispersão estatística dos dados e o número alto de ensaios necessários para a construção da curva S-N. Ressalta-se ainda que os materiais possuem defeitos que desenvolvem trincas submicroscópicas se as tensões são superiores que um valor crítico. Durante os picos de carga de cada ciclo, ocorre um pequeno crescimento das trincas microscópicas até um ponto em que estas começam a se propagar rapidamente ocasionando a falha (OLIVIER, 2007).

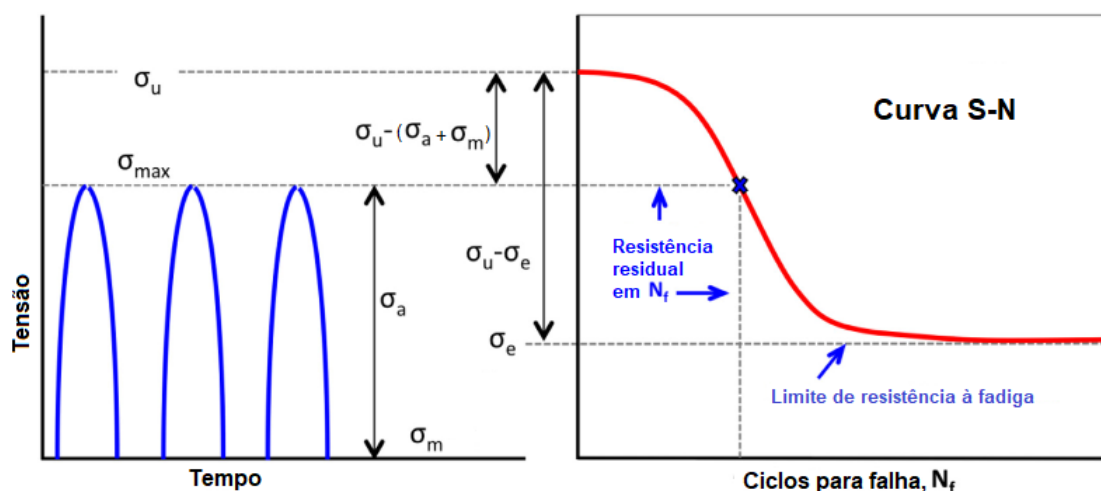


Figura 18 – Esquemático para Curva S-N de um carregamento genérico. Fonte: (CHANDRAN, 2016) com adaptações.

De acordo com NIELSEN L.; LANDEL (1994), para grande parte dos polímeros o limite de resistência à fadiga está entre 20 a 40% da resistência à tração do material.

Para o autor [SHAH \(2002\)](#), esta faixa está compreendida entre 25 a 30% da resistência à tração do material.

As curvas S-N para os polímeros possuem duas características importantes: (a) uma forma de curva sigmoideal e (b) um comportamento assintótico nos extremos de vida de fadiga. Uma teoria física sobre o comportamento macroscópico da fadiga que descreva o comportamento assintótico exato nos extremos da vida útil ainda não foi desenvolvida ([CHANDRAN, 2016](#)).

Na a Fig. 18 apresenta-se uma curva S-N genérica para um dado carregamento cíclico com amplitude  $\sigma_a$  e tensão média  $\sigma_m$ , onde  $\sigma_u$  é o limite a resistência à tração do material,  $\sigma_{max}$  tensão máxima do carregamento,  $\sigma_e$  tensão para vida infinita e  $N_f$  número de ciclos para falha.

## 3 Métodos e Procedimentos Experimentais

A metodologia experimental (Fig. 19) obedece à padronização das normas ASTM para os respectivos ensaios. As atividades foram executadas nos Laboratórios da Universidade de Brasília do Campus Gama, em especial nos de Caracterização de Materiais e Sistemas Aeroespaciais.



Figura 19 – Metodologia de trabalho

O material de teste em estudo será o ABS em diferentes formas de composição e processamento. Os corpos de provas são obtidos de placas laminadas por co-extrusão e também pela confecção da impressão 3D, a partir de filamentos de duas fabricantes distintas (Tab. 2).

Os dados obtidos e processados serão analisados pela distribuição de probabilidade estatística, Distribuição T de Student, mediante cálculo do erro padrão e nível de confiança das amostras para 95%.

Tabela 2 – Materiais ABS utilizados

<b>Materiais</b>	<b>Formato</b>	<b>Matéria-prima</b>
ABS Laminado	Placa 870x1400x3,2mm	20% ABS E112 e 80% ABS AE8000
ABS Premium	Filamento de 1,75 mm	Não informado pelo fabricante
ABS Reciclado	Filamento de 1,75 mm	Reciclado

### 3.1 Materiais

O ABS laminado é obtido pelo processo de co-extrusão. São utilizados dois tipos de material em sua confecção. O primeiro é o ABS E112, utilizado na parte superior da chapa, sendo um grade de ABS fosco voltado para o acabamento do produto, que possui propriedades mecânicas inferiores. Por esse motivo, é utilizado o ABS AE8000 na parte inferior da chapa, na proporção de mais de 80%, sendo este um grade de ABS com condições mecânicas superiores.

De acordo com a fabricante, a produção das placas são nacionais, porém os grãos são importados. Dados foram solicitados referentes as propriedades mecânicas da placa

após o processo de co-extrusão, porém foram fornecidos somente informações da matéria-prima.

Desta forma, realizou-se a compra de 3 unidades de placa no formato 870x1400x3,2mm, sendo suficientes para todas análises previstas deste trabalho. A Fig. 20 exibe uma unidade da chapa ABS antes do processo de corte dos corpos de prova.



Figura 20 – Placa ABS antes do processo de corte

O ABS Premium da fabricante 3DLAB também é de produção nacional, sendo obtidas informações a cerca dos dados dos grãos utilizando na fabricação do filamento e do resultado mecânico de peças impressas.

E por fim, o ABS reciclado da marca Print Green 3D, confeccionado a partir de material reciclado oriundo de carcaças de eletrônicos e peças do setor automotivo. A empresa produtora informou dados das propriedades mecânicas somente dos grãos utilizados na fabricação dos filamentos (Tab. 3).

Tabela 3 – Propriedades dos corpos de prova impressos e testados pela fabricante 3DLAB

<b>Propriedades</b>	
Módulo de Elasticidade por Tração (GPa)	1,34
Módulo de Elasticidade por Flexão (GPa)	-
Tensão de Escoamento (MPa)	14,7
Tensão de Ruptura (MPa)	29
Resistência à Tração (MPa)	-
Resistência à Flexão (MPa)	-

As propriedades dos grãos de todos materiais utilizados nos experimentos estão reunidos na Tab. 4.

Tabela 4 – Propriedades dos grãos informadas pelos fabricantes

<b>Propriedades dos Grãos (Matéria-prima) informadas pelas Fabricantes</b>				
<b>Propriedades</b>	<b>PRINT GREEN 3D</b>	<b>3DLAB</b>	<b>ABS E112 (Camada Superior)</b>	<b>ABS AE8000 (Camada Inferior)</b>
Módulo de Elasticidade por Tração (GPa)	2,6	2,2	1,52	-
Módulo de Elasticidade por Flexão (GPa)	2,175	-	1,45	2,26
Tensão de Escoamento (MPa)	-	38	19,30	-
Tensão de Ruptura (MPa)	-	-	22,06	43,00
Resistência à Tração (MPa)	58,42	-	-	-
Resistência à Flexão (MPa)	62,14	66	-	69,00
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	-	1,04	1,06	-
Temperatura de Fusão (°C)	-	220	230,00	220,00

## 3.2 Confecção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram organizados com a seguinte denominação para facilitar a identificação e análise dos seus resultados:

- CPES - Corpos de prova extrudados de chapa ABS sem desbaste;
- CPED - Corpos de prova extrudados de chapa ABS com desbaste;
- C PIECO - Corpos de prova impressos de ABS Reciclado/Ecológico;
- CPI3DL - Corpos de prova impressos de ABS 3DLAB;

Todos os corpos de prova foram numerados e identificados individualmente para propiciar monitoramento de cada amostra com maior controle possível.

A padronização geométrica dos corpos de provas obedece ao do Tipo 1 da norma ASTM D638-14 (Fig. 21), indicado para plásticos rígidos e semi-rígidos de espessura inferior ou igual a 7 mm conforme a Tab. 5 (ASTM, 2014).

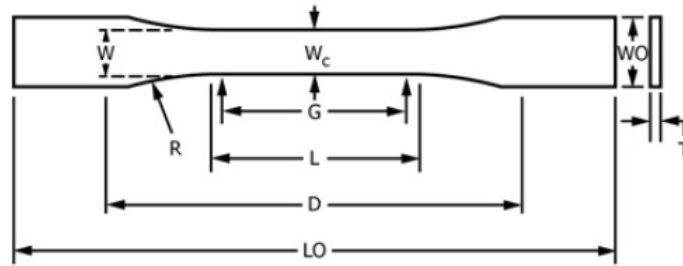


Figura 21 – Formato do corpo de prova para ensaio de tração. Fonte: (ASTM, 2014) com adaptações.

Tabela 5 – Especificações para corpos de prova de tração do Tipo 1. Fonte: (ASTM, 2014) com adaptações.

Dimensões (em mm)		Tolerância
W – Largura da seção estreita	13	$\pm 0,5$
L – Comprimento da seção estreita	57	$\pm 0,5$
WO – Largura total	19	$\pm 6,4$
LO – Comprimento total	165	-
G – Comprimento de calibração	50	$\pm 0,25$
D – Distância entre fixação	115	$\pm 5$
R – Raio do contorno	76	$\pm 1$
T – Espessura	3,2	$\pm 0,4$

### 3.2.1 A partir da placa ABS

O desenho do corpo de prova padrão foi executado no software CAD denominado *CATIA V5R21*, de acordo com a norma ASTM D638-17.



Figura 22 – Router CNC utilizada para corte dos corpos de prova



Para confeccionar os corpos de prova no formato adequado, foi utilizada uma Router CNC (Fig. 22) de um local fora da Universidade (empresa particular) para corte da placa ABS e obtenção das amostras no formato desejado. O formato CAD da geometria é importado para o Software *Aspire* e posteriormente convertido em código G para correta interpretação execução de corte pela máquina.

A Fig. 23 mostra momento de corte dos corpos de provas da chapa de ABS.



Figura 23 – Processo de corte pela Router CNC em execução

Adicionalmente, a placa ABS possui uma face de acabamento com textura superficial, sendo esta parte da camada por ABS E112, que apresenta propriedades mecânicas inferiores do restante da chapa. Foi realizado processo de desbaste (Fig. 24) de aproximadamente 0.4 mm para remover a textura e a camada ABS E112, permitindo ensaios comparativos nas duas configurações, verificando a influência da camada nos resultados.

A produção dos corpos de prova desbastados requerem maior cuidado devido ao processo adicional de desbaste da camada de ABS superior da chapa. Ressalta-se a necessidade do corte homogêneo e uniforme da superfície, bem como manter a espessura do corpo de prova de acordo com a espessura mínima de 2,8 mm conforme a norma ASTM D638-14.

Portanto, foi necessário adicionar 4 pontes (a fresa afasta-se e não corta material por 0.3 mm) durante o percurso de corte (Fig. 25). Desta forma, realizava-se 2 passagens com profundidades diferentes, preservando as pontes e contribuindo para melhor acabamento da peça.

Os corpos de provas foram retirados e lixados cuidadosamente para remover qualquer imperfeição ou resíduo deixado pela lâmina de corte, preservando ao máximo sua geometria e similaridade com o modelo não desbastado (Fig. 26).



Figura 24 – Router CNC realizando desbaste da camada superior da chapa ABS

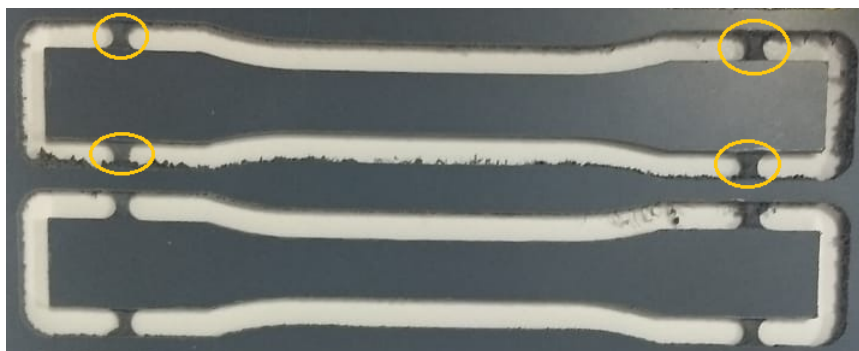


Figura 25 – Corpo de prova com pontes (pontos sem retirada de material)

### 3.2.2 A partir da Impressão 3D

Os dois tipos de filamentos utilizados para produção das amostras foram de 1.75 mm. O desenho do corpo de prova foi exportado pelo *Software CATIA* no formato STL compatível com grande parte dos *Softwares* de fatiamento adequados para impressoras 3D do mercado.

Tabela 6 – Parâmetros de impressão recomendados pelos fabricantes de filamentos

Tipo de Filamento	Temperatura da Mesa (°C)	Temperatura de impressão (°C)	Velocidade (mm/s)
ABS Premium	110	220 a 240	60
ABS Sustentável	100 a 110	210 a 240	30 a 80

O fatiamento utilizado foi realizado pela ferramenta *Simplify 3D*, respeitando os intervalos recomendados pelos fabricantes (Tab. 6). Desta forma, é gerado o código G,



Figura 26 – Comparação entre corpos de prova sem desbaste e com desbaste logo após o corte

linguagem com comandos suportados pela impressora 3D. O tempo previsto de impressão para cada corpo de prova é de 45 minutos. Estes foram impressos na posição de chapa com as faces voltadas para o eixo Z, conforme Fig. 27.

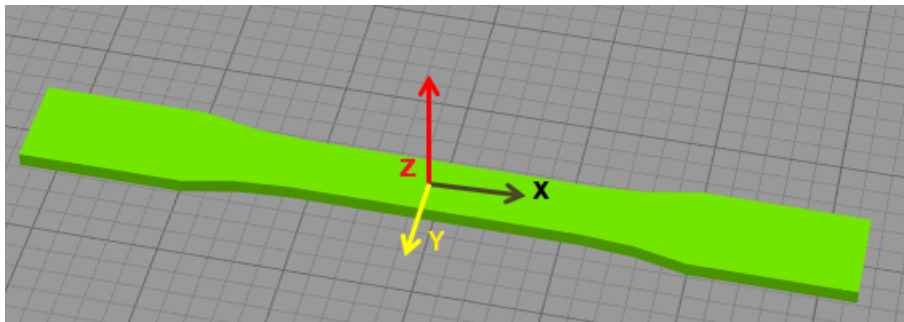


Figura 27 – Posicionamento de impressão do corpo de prova.

A impressora 3D utilizada foi a versão Alumínio I3 da Tek3d (Fig. 28) disponível no Laboratório de Sistemas Aeroespaciais da Universidade. Possui volume útil de impressão de 200x200x200 mm, resolução de impressão de até 0,1 mm e diâmetro do bico extrusor de 0.3 mm. Os parâmetros utilizados nas impressões estão descritos na Tab. 7.

Tabela 7 – Parâmetros de impressão utilizados

Tipo de Fila-mento	Temperatura da Mesa (°C)	Temperatura de impressão (°C)	Velocidade (mm/s)	Preenchimento interno da peça
ABS Premium	110	230	60	100%
ABS Sustentável	110	230	60	100%

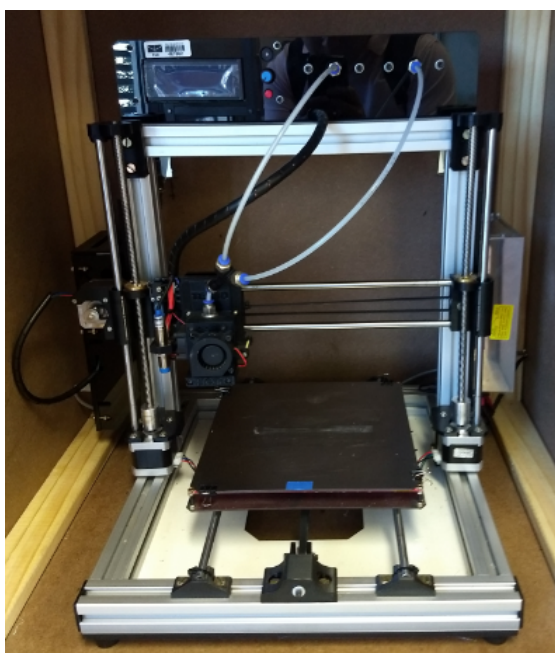


Figura 28 – Impressora Alumínio I3 da Tek3d

Para a impressão do ABS é recomendável que esta seja executada em ambiente controlado e fechado, tendo em vista que o material apresenta uma forte contração quando esfria, evitando descolamento de camadas durante o processo de impressão e consequentemente o empenamento da peça. Portanto, foi adaptada uma caixa de madeira para abrigar a impressora em seu interior durante o processo de funcionamento (Fig. 29).

Os corpos de prova C PIECO produzidos pela impressora 3D, apresentaram maior grau de dificuldade de impressão devido a empenamentos nas primeiras tentativas. O problema foi contornado desativando o cooler de resfriamento das camadas depositadas durante a impressão e alterando a substância aplicada na base da impressora, que auxilia na fixação da peça, de cola em bastão para spray de fixação capilar.



Figura 29 – Caixa adaptada para fechamento da impressora 3D

### 3.3 Metodologia de Ensaios

Os ensaios mecânicos dos mais diversos materiais visam caracterizar e obter as propriedades mecânicas desejadas. Podem ser divididos quanto à integridade, sejam destrutivos ou não-destrutivos; ou quanto à velocidade, sejam estáticos ou dinâmicos.

Esses procedimentos são uniformizados por normas, definidos e reconhecidos por laboratórios de alta tecnologia, permitindo a correta execução e obtenção dos resultados de cada tipo de teste. A instituição referência será a *American Society for Testing and Materials* (ASTM International).

#### 3.3.1 Norma para Ensaio de Tração

Este método é padronizado pela norma ASTM D638-14, que define procedimento de ensaio padrão para determinação das propriedades dos plásticos submetidos à tração, sejam eles reforçados e não reforçados na forma de corpos de prova em haltere com geometria especificada, bem como em condições definidas de pré-tratamento, temperatura, umidade e velocidade de execução (ASTM, 2014).

A partir deste método pode-se obter o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, bem como propriedades diversas extraídas a partir da construção da curva Tensão *versus* Deformação. A utilização de sensores denominados extensômetros (axiais e transversais) durante o teste permite a obtenção de dados de deformação axial e transversal fundamentais para determinação das propriedades do material.

Segundo a ASTM (2014), todas as superfícies do corpo de prova devem estar isentas de falhas, arranhões ou imperfeições. Orienta-se testar pelo menos cinco amostras em caso de materiais isotrópicos. Já para materiais anisotrópicos, quando aplicável, a norma orienta testar cinco amostras normais ao eixo principal de anisotropia e outras

cinco paralelas. As amostras que quebram fora da seção de teste transversal estreita ou por alguma outra falha devem ser descartadas, a menos que tais falhas constituam uma variável a ser estudada.

A configuração de velocidade do ensaio de tração é definido conforme a classificação do material e o tipo de corpo de prova. Ainda segundo a norma, deve-se selecionar a velocidade mais baixa que produz ruptura em 0,5 a 5 min para a amostra de geometria utilizada, utilizando como referência a Tab. 8.

Tabela 8 – Especificações de velocidade do teste de tração. Fonte: (ASTM, 2014) com adaptações.

Classificação	Tipo de Corpo de Prova	Velocidade do teste (mm/min)	Deformação Nominal – Taxa no início do teste (mm/mm * min)
Rígido e Semirrígido	Hastes, tubos, Tipos 1, 2 e 3	5	0,1
		50	1
		500	10

A tensão ( $\sigma$ ) submetida ao corpo de prova durante o teste é obtida pela divisão da carga aplicada ( $P$ ) pela área ( $A$ ) da seção transversal do corpo de prova:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

A deformação específica normal do corpo de prova é determinado pelo alongamento relativo, que envolve o comprimento final da seção estreita do corpo de prova ( $l$ ) em relação ao seu comprimento inicial ( $l_0$ ), dada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (3.2)$$

A tensão ( $\sigma$ ) pode ser relacionada ao módulo de elasticidade ( $E$ ) e deformação específica normal ( $\varepsilon$ ) durante o regime elástico pela seguinte relação:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.3)$$

O coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) para materiais homogêneos e isotrópicos é definido como sendo formado pela razão da deformação transversal pela deformação em relação à direção longitudinal de aplicação da carga. Desta forma, é representado como:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (3.4)$$

Com as equações citadas, a construção e análise da curva Tensão *versus* Deformação, permitem que as propriedades mecânicas desejadas sejam determinadas.

De acordo com a Fig. 30, para a curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  de materiais frágeis, pode-se determinar por exemplo os pontos de limite de escoamento, tensão máxima de tração e tensão de ruptura.

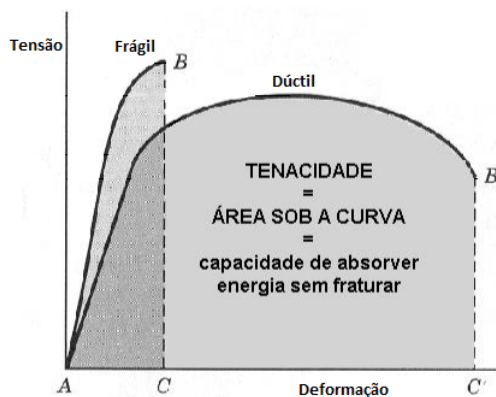


Figura 30 – Diagrama  $\sigma$ - $\varepsilon$  para materiais dúcteis e frágeis. Curva AB - material frágil e curva AB' - material dúctil. Fonte: (USP, 2017) com adaptações.

Um material dúctil pode ser caracterizado como aquele que admite deformação plástica permanente. Na curva  $\sigma$ - $\varepsilon$ , a região plástica é bem definida com um ponto de transição. Já o material frágil rompe-se com facilidade logo após a fase elástica ou ao final desta, não possuindo uma região plástica dominante ou pouco definida. Esse tipo de material possui baixa capacidade de absorção de deformações permanentes (CIMM, 2017).

Na região linear da curva o material experimenta a deformação elástica (Fig. 31). A constante de proporcionalidade denominada módulo de elasticidade (E) pode ser utilizada como indicador de rigidez do material. Quando há a mudança do regime elástico para plástico, há o ponto limite de elasticidade do material. Abaixo dele o material experimenta deformação elástica e acima deformação plástica (GAMA, 2017).

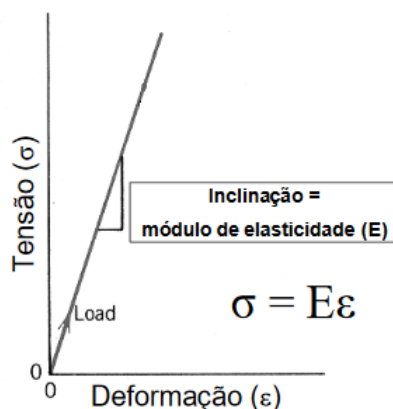


Figura 31 – Determinação do Módulo de Elasticidade. Fonte: (USP, 2017) com adaptações.

### 3.3.2 Norma para Ensaio de Fadiga Axial

O método é padronizado pela norma ASTM D7791-17 e engloba a determinação das propriedades de fadiga de plásticos em carregamento axial. De acordo com esta, o método é aplicável a plásticos rígidos e semi-rígidos. O carregamento axial pode ser em tensão ou compressão, porém este último é recomendável aos plásticos rígidos. Os níveis de tensão e deformação deverão estar abaixo dos limites proporcionais do material e desta forma em regime elástico.

O procedimento de teste determina que o corpo de prova obedeça a geometria de amostra determinada pela norma de teste de tração monotônico ASTM D638-14. Este deverá ser agarrado pelas extremidades, tensionado igualmente em direções opostas, e liberado de volta à sua posição ou carga inicial. A amostra deverá ser carregada ciclicamente até uma tensão específica ou nível de deformação com frequência uniforme até sua fratura ou falha por escoamento (ASTM, 2017).

Desta forma, a resistência à fadiga pode ser determinada em número específico de ciclos. Pelo menos, quatro diferentes níveis de tensão ou níveis de deformação deverão ser testados para construir uma curva de tensão *versus* número de ciclos até falha (S-N) ou deformação *versus* número de ciclos até a falha ( $\varepsilon$ -N), determinando assim o limite de resistência axial do material em tensão cíclica (ASTM, 2017).

Os testes de fadiga são usados para determinar o efeito de processamento, condição de superfície, tensões e outros, diante da resistência à fadiga do material plástico submetido a estresse axial para números relativamente grandes de ciclos. Os resultados também podem ser usados como um guia para a seleção de materiais plásticos para serem solicitados sob condições de estresse flexional repetido (ASTM, 2017).

As propriedades do material podem variar com a espessura da amostra e a frequência do teste. A frequência de teste desejável está entre 1 a 25 Hz, mas é recomendada que



seja utilizada uma frequência de 5 Hz ou inferior. Pelo menos três amostras devem ser testadas em cada um dos quatro níveis de estresse ou de deformação (mínimo de doze para cada teste) (ASTM, 2017).

A resposta do material ao teste não é idêntica para todos plásticos. Se um plástico não exibir uma região elástica, onde tensão é reversível, a deformação plástica ocorrerá durante teste de fadiga, causando mudança na amplitude da carga programada ou deformação durante o teste. Nesta situação, deve-se ter cuidado ao usar os resultados para projeto, pois geralmente não são indicativos das verdadeiras propriedades de fadiga do material (ASTM, 2017).

O programa de teste deverá ser configurado para carregamento dinâmico (onda sinusoidal, quadrada ou trapezoidal). O tipo de onda padrão é sinusoidal com a amplitude ajustada para o nível de carga ou deflexão especificado, que deverá estar abaixo do limite proporcional do material conforme determinado pelo método de teste da norma ASTM D638-14 (ASTM, 2017).

O programa de teste deverá ser configurado para carregamento dinâmico (onda sinusoidal, quadrada ou trapezoidal). O tipo de onda padrão é sinusoidal caso não seja especificado com a amplitude ajustada para o nível de carga ou deflexão determinada, que deverão estar abaixo do limite proporcional do material, conforme determinado pelo método de teste da norma ASTM D638-14. O teste deverá ter limite para  $10^7$  ciclos e encerrará quando houver o rompimento na seção de análise do corpo de prova ou quando houver escoamento (ASTM, 2017).

De acordo com a norma ASTM D7791-17, o teste continua até que uma das seguintes condições é atingida:

1. Fratura da amostra na seção de teste;
2. Falha por escoamento na seção de teste. Se o teste for controlado por carga, a amostra falha por escoamento quando a deformação máxima aumenta. Se o teste for controlado por deformação, a amostra falha por escoamento se a carga máxima atingida diminuir;
3. Atingir o limite de  $10^7$  ciclos;
4. Alcançar um intervalo personalizado de interesse do pesquisador.

## 3.4 Procedimentos para Ensaios

### 3.4.1 Máquina de Ensaio de Tração

Para o ensaio de tração foi utilizado o equipamento *Instron 8801* (Fig. 32). Esta máquina é um dispositivo servo hidráulico indicado para testes mecânicos estáticos e dinâmicos, compatível para execução de testes de fadiga e mecânica da fratura.



Figura 32 – Equipamento de ensaios *Instron*.

A capacidade de carga axial é de até 100 kN. Para aferir com maior precisão os dados de deformação na seção axial do corpo de prova, foi indicado o uso do extensômetro unidirecional, que pode ser utilizado na posição vertical para medir deformação na direção transversal (determinação do módulo de elasticidade - Fig. 33) e na posição horizontal para medir a deformação na direção longitudinal (determinação do coeficiente de Poisson).

### 3.4.2 Procedimento de Ensaio de Tração

Conforme norma ASTM D-638-14, para obtenção das propriedades da curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  é necessário um mínimo de 5 espécimes para cada configuração/material a ser testado. Dessa forma, para análise do ABS obtido a partir da chapa foram testados 5 espécimes para a configuração com desbaste (CPED) e 5 espécimes para configuração sem desbaste (CPES).

Para a comparação entre os materiais impressos (CPI3DL e CPIECO) e de chapa (CPES), foram testados 10 espécimes em cada configuração. Para determinação do coeficiente de Poisson dos materiais (CPES, CPI3DL e CPIECO) foram testados 5 espécimes



Figura 33 – Corpo de Prova instalado para ensaio de tração e extensômetro na posição horizontal

com extensômetro na posição horizontal e 5 espécimes com extensômetro na posição transversal para cada um.

A velocidade de execução do teste escolhida foi de 5 mm/min. Os resultados gerados pelo equipamento de ensaio foram exportados do *Software Bluehill* da Instron em formato de tabela compatível com os *softwares Microsoft Excel* ou *MATLAB*. Desta forma, os dados podem ser tratados, ajustados e analisados estatisticamente.

### 3.4.3 Máquina de Ensaio de Fadiga axial

O equipamento utilizado para os ensaios mecânicos de fadiga axial citado foi o Sistema de Testes Servo-hidráulicos MTS Landmark (Fig. 64) disponível no Laboratório do Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais (GFFM) da Universidade. Sua capacidade de carga reduzida de 5 kN permite melhor controle e precisão para execução de testes com cargas cíclicas de magnitude demandadas ao plástico ABS.

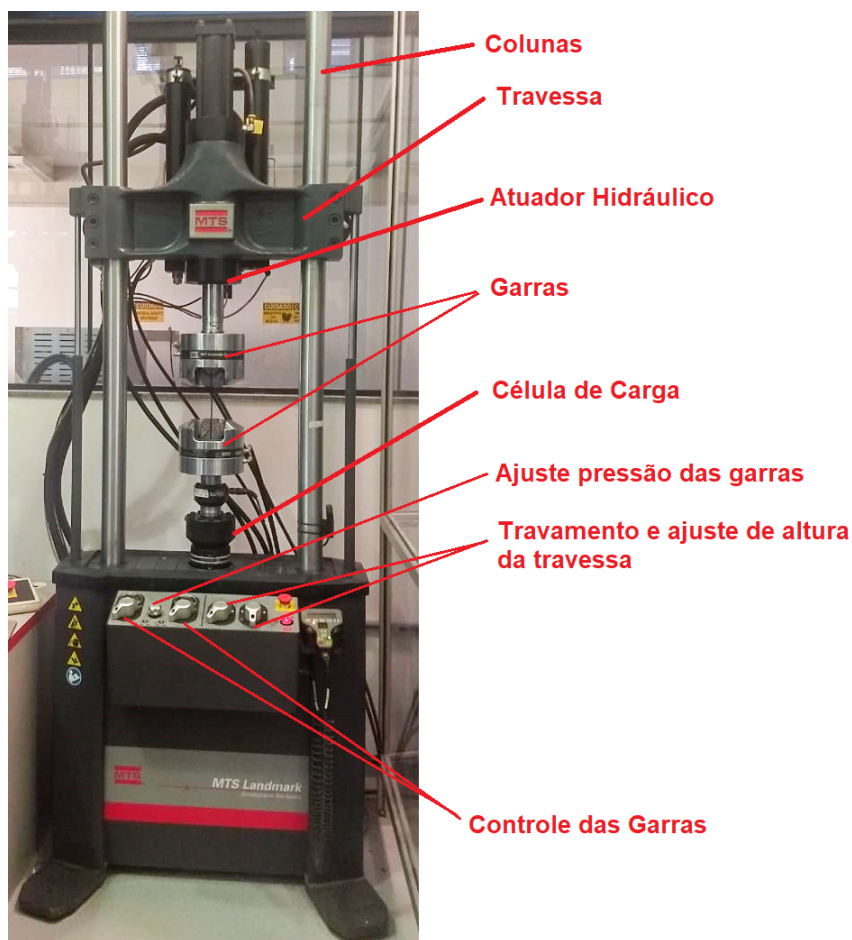


Figura 34 – Equipamento de ensaio MTS Landmark

O funcionamento da máquina e a programação dos ensaios é realizada por um computador, que é ligado a um sistema de bomba hidráulica que comanda um atuador hidráulico. Existem também comandos que podem ser realizados manualmente, como: elevação da travessa para o encaixe do corpo de prova, a abertura e o fechamento das garras e a escolha da pressão de agarramento. A célula de carga envia para o computador informações sobre a força que está sendo exercida no corpo de prova. Ressalta-se que o atuador hidráulico possui um sensor de deslocamento que envia tais informações ao computador (SOUZA, 2016).

#### 3.4.4 Procedimento de Ensaio de Fadiga axial

Conforme norma ASTM D7791-17 é necessário um mínimo de 12 espécimes para levantamento inicial da curva (S-N) de um material com razão (R) de tensão mínima/máxima constante, sendo grupos de 3 espécimes repetidos em um mesmo nível de tensão máxima. Desta forma, foram testados 12 espécimes na configuração R=0,1 e R=0,3, respectivamente, para cada um dos materiais CPES, CPI3DL e C PIECO.

O nível de tensão máxima para conjunto de 3 espécimes foi escolhido com base em

uma porcentagem do limite de resistência à tração de cada material. Para  $R = 0,1$ , foram escolhidos as seguintes valores: 90%, 80%, 70% e 50% do limite de resistência à tração (Tab. 9). Para  $R = 0,3$  foram escolhidos as seguintes valores: 90%, 80%, 70% e 60% limite de resistência à tração (Tab. 10).

Tabela 9 – Distribuição dos testes de fadiga axial par cada material em  $R=0,1$ 

Quantidade de espécimes	R	Tensão máxima
3	0,1	90% de $\sigma_u$
3	0,1	80% de $\sigma_u$
3	0,1	70% de $\sigma_u$
3	0,1	50% de $\sigma_u$
Total: 12		

Tabela 10 – Distribuição dos testes de fadiga axial par cada material em  $R=0,3$ 

Quantidade de espécimes	R	Tensão máxima
3	0,1	90% de $\sigma_u$
3	0,1	80% de $\sigma_u$
3	0,1	70% de $\sigma_u$
3	0,1	60% de $\sigma_u$
Total: 12		

Para execução dos testes de fadiga foi determinado conforme norma os seguintes parâmetros: frequência de teste recomendada de 5 Hz para plásticos, forma de onda de tensão alternada sinusoidal, critério de parada do teste personalizado para  $10^7$  ciclos ou rompimento do corpo de prova.

### 3.5 Análise de vida em fadiga pelo Software *Ansys*

O *Ansys* pertence a família de softwares CAE, sendo uma poderosa ferramenta que auxilia no desenvolvimento, aperfeiçoamento de produtos e soluções de engenharia. O software permite análises estruturais, sejam estáticas ou dinâmicas, de fluidos, térmicas, eletromagnéticas, de vibrações e acústicas, entre outras.

No caso da mecânica estrutural, os métodos utilizam a Análise por Elementos Finitos (FEA), também conhecida em inglês como *Finite element analysis*. A análise por elementos finitos é uma técnica de resolução numérica baseada na hipótese que uma peça ou componente pode ser descrita por um conjunto de diversos elementos de dimensão reduzida, de geometria simples e comportamento físicos conhecidos.

Foi realizado a modelagem do corpo de prova padrão para os testes de fadiga a ser realizados conforme a Fig. 35.

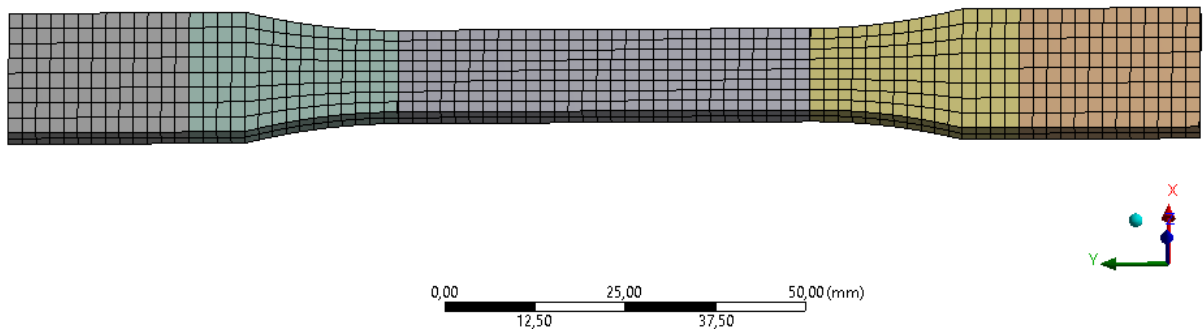


Figura 35 – Corpo de prova modelado no *Ansys*

O modelo sólido (tipo *SOLID186*) foi ajustado com uma malha com 8421 nós e 1392 elementos. A qualidade de elemento *Mesh* para 93,2%, dimensão de 2 mm e tipo *Hex20*.

As condições de contorno para o modelo foram engaste em uma das extremidades (sem liberdade de movimento) e a adoção de um carregamento cíclico alternado na extremidade oposta, permitindo movimento no sentido axial da placa (deslocamento eixo *y*). O módulo a ser utilizado nas simulações é o *ANSYS Mechanical Workbench Fatigue Module*.

Porém, o programa só realiza a simulação caso os dados físicos e mecânicos do material aplicado à peça estejam presentes na biblioteca de materiais. Para o caso do plástico ABS, essa informação não está disponível. Desta forma, é necessário o levantamento inicial das propriedades físicas e mecânicas, incluindo a curva S-N para o material, seguida da inserção manual destas no banco de dados do programa.

Desta forma, essa análise só será possível após tratamento dos dados das seções anteriores.

## 4 Resultados e Discussões

### 4.1 Teste de Tração

#### 4.1.1 Comparação dos efeitos do desbaste

Os ensaios foram realizados para 5 amostras de cada tipo (com desbaste e sem desbaste). A Tab. 11 apresenta os dados geométricos e físicos calculados para esse grupo de amostras antes de serem submetidas aos ensaios.

Tabela 11 – Propriedades geométricas e físicas para CPED e CPES

Propriedades	CPED		CPES	
	Desvio padrão	Medida	Desvio padrão	Medida
Espessura da seção de teste (mm)	0,05	$2,88 \pm 0,07$	0,03	$3,32 \pm 0,04$
Largura da seção de teste (mm)	0,02	$12,97 \pm 0,03$	0,04	$13,19 \pm 0,05$
Comprimento da seção de teste (mm)	0,17	$56,8 \pm 0,40$	0,22	$56,6 \pm 0,5$
Peso (g)	0,37	$7,71 \pm 0,46$	0,05	$9,14 \pm 0,06$
Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0,04	$1,05 \pm 0,05$	0,02	$1,07 \pm 0,03$

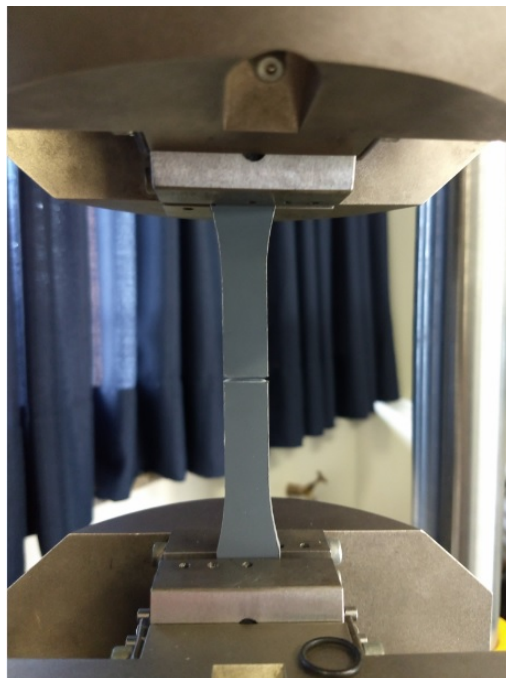


Figura 36 – Corpo de prova CPES após ruptura na máquina de ensaios

Os ensaios foram realizados (Fig.36) e os resultados foram extraídos e confeccionados gráficos (Fig. 37 e 38), bem como Tab. 12 para comparação dos dados.

Tabela 12 – Resultados dos testes para corpos de prova sem e com desbaste

Propriedades	CPED		CPES	
	Desvio padrão	Medida	Desvio padrão	Medida
Módulo de Elasticidade – E (GPa)	0,07	1,70 ±0,09	0,04	1,66 ±0,05
Tensão de Ruptura (MPa)	1,14	23,39 ±1,41	1,18	22,64 ±1,46
Resistência à Tração (MPa)	1,1	24,37 ±1,36	0,46	23,34 ±0,57
Tensão de Escoamento (MPa)	0,81	18,11 ±1,00	1,07	16,81 ±1,33

A diferença do módulo de elasticidade foi de aproximadamente 2,35%. A variação dos demais parâmetros pode ser explicada devido ao processo de corte e aleatoriedade de imperfeições associadas ao material, bem como a execução dos ensaios. Ressalta-se ainda com o desbaste, há consequente diminuição da área da seção transversal.

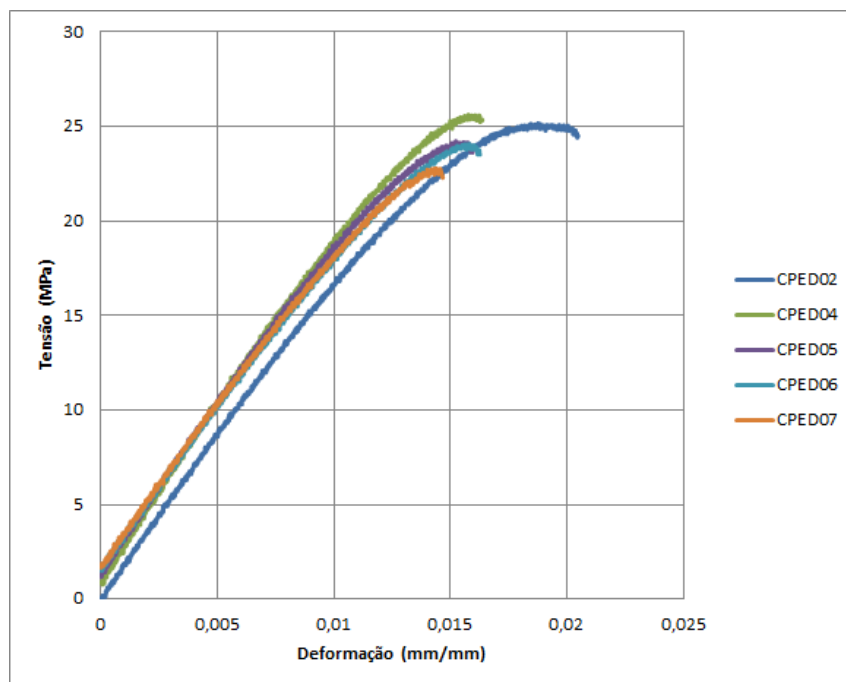
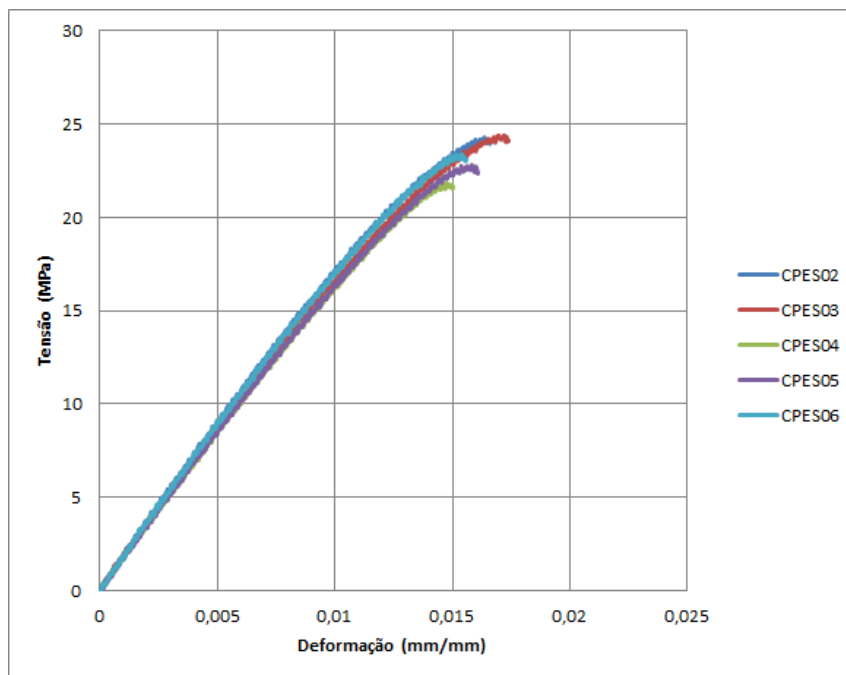


Figura 37 – Curva  $\sigma$ - $\epsilon$  para CPED



Figura 38 – Curva  $\sigma$ - $\epsilon$  para CPES

Verifica-se que os resultados se mostraram numericamente próximos, com valores discrepantes em aproximadamente 3%. Desta forma, pode-se afirmar que a existência da camada superficial do ABS menos resistente não altera significativamente o desempenho do material diante dos ensaios executados.

Como pode-se observar, o comportamento de ambos grupos é semelhante. De acordo com o ressaltado pela bibliografia, verifica-se uma região elástica bem definida, apesar de não possuir uma região plástica dominante, com rápida ruptura, de modo frágil e baixa tenacidade.

#### 4.1.2 Análise entre os materiais

Assume-se que as propriedades calculadas na subseção anterior para os corpos de prova CPES são válidas para comparativo com os demais, tendo em vista a similaridade de comportamento mecânico entre as amostras CPED e CPES.

A Tab. 13 apresenta os dados geométricos e físicos calculados para esse grupo de amostras antes de serem submetidas aos ensaios.

Tabela 13 – Propriedades geométricas e físicas para CPED, C PIECO e CPI3DL

Propriedades	CPES		C PIECO		CPI3DL	
	Desvio padrão	Medida	Desvio padrão	Medida	Desvio padrão	Medida
Espessura da seção de teste (mm)	0,01	3,28 $\pm 0,02$	0,02	3,18 $\pm 0,03$	0,01	3,18 $\pm 0,02$
Largura da seção de teste (mm)	0,02	12,97 $\pm 0,03$	0,02	12,98 $\pm 0,03$	0,02	13,98 $\pm 0,03$
Comprimento da seção de teste (mm)	0,03	56,80 $\pm 0,05$	0,03	56,80 $\pm 0,02$	0,02	56,85 $\pm 0,03$
Peso (g)	0,22	8,90 $\pm 0,16$	0,06	8,67 $\pm 0,04$	0,07	8,07 $\pm 0,04$
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,01	1,06 $\pm 0,02$	0,01	1,03 $\pm 0,02$	0,01	1,01 $\pm 0,02$

Desta forma, foram testadas 10 amostras de cada material com extensômetro na posição vertical (para aferir a deformação nesta orientação e estimar o Módulo de Elasticidade). Adicionalmente, os testes foram repetidos com 5 amostras de cada material com o extensômetro na posição horizontal (para aferir a deformação nesta orientação e estimar o Coeficiente de Poisson).

Tabela 14 – Resultados dos testes para corpos de prova CPES, C PIECO e CPI3DL

Propriedades dos CP	CPES		C PIECO		CPI3DL	
	Desvio padrão	Medida	Desvio padrão	Medida	Desvio padrão	Medida
Módulo de Elasticidade – E (GPa)	0,04	1,75 $\pm 0,04$	0,04	2,13 $\pm 0,06$	0,08	1,80 $\pm 0,05$
Tensão de Ruptura (MPa)	0,8	24,14 $\pm 1,18$	1,29	30,82 $\pm 0,90$	1,42	22,21 $\pm 0,88$
Resistência à Tração (MPa)	0,38	24,97 $\pm 1,17$	0,42	30,93 $\pm 1,28$	1,39	23,24 $\pm 0,45$
Tensão de Escoamento (MPa)	0,42	17,62 $\pm 0,31$	1,28	21,45 $\pm 0,90$	0,71	18,14 $\pm 0,44$
Coef. Poisson	0,0199	0,3236 $\pm 0,0247$	0,0203	0,3295 $\pm 0,0323$	0,0229	0,3660 $\pm 0,0284$

Os dados dos testes foram processados e as propriedades calculadas conforme referencial teórico. Os resultados obtidos estão na Tab. 14, Fig. 39, 40 e 41.

Ao analisar as propriedades mecânicas dos grupos testados, verifica-se que as amostras C PIECO apresentaram propriedades mecânicas superiores. Os resultados das amostras CPES e CPI3DL apresentaram resultados mais próximos e dentro da faixa esperada para materiais impressos, conforme dados técnicos de filamentos disponíveis no mercado. O referencial bibliográfico para o plástico ABS foi apresentado pela Tab. 1.

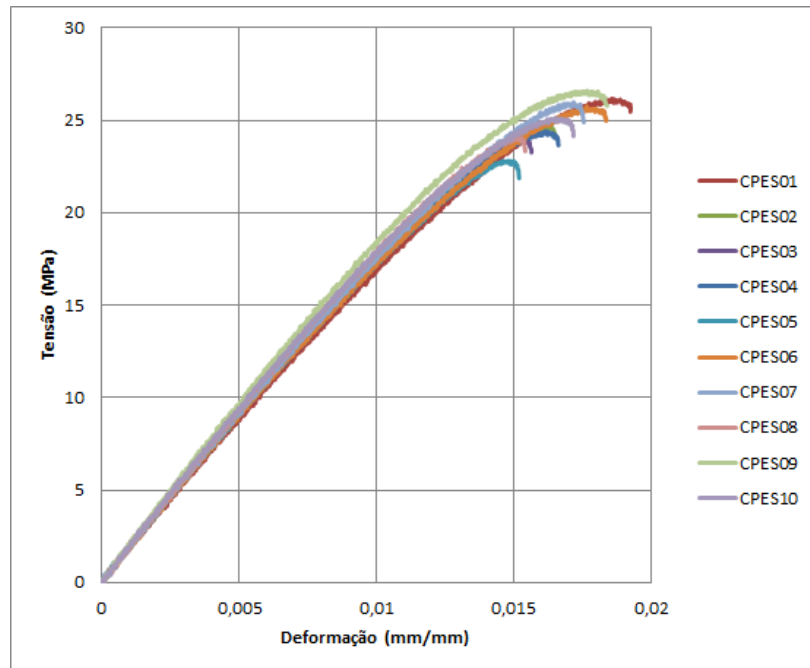


Figura 39 – Curva tensão versus deformação para corpos de prova sem desbaste

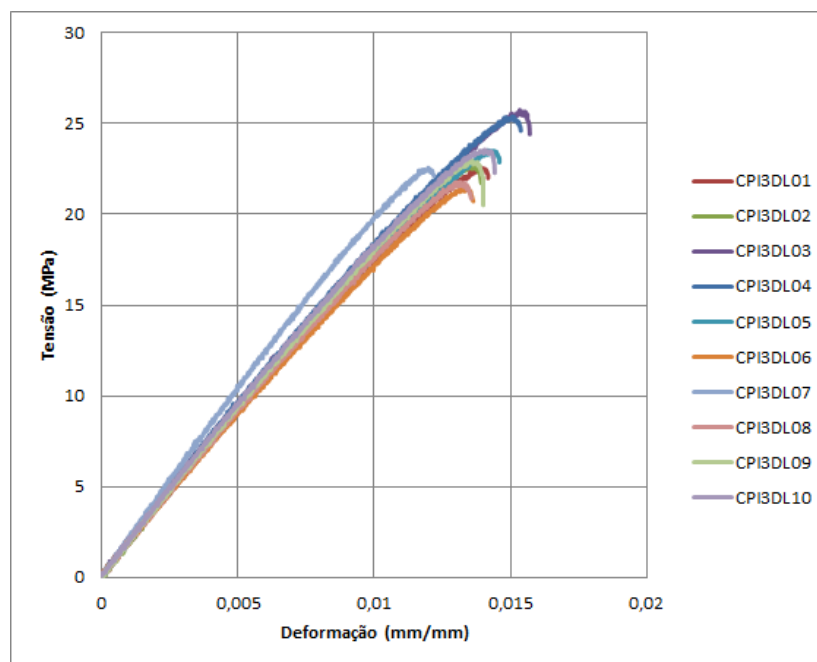


Figura 40 – Curva  $\sigma$ - $\epsilon$  para corpos de prova impressos CPI3DL

As propriedades estimadas das curvas de tensão *versus* deformação das Fig. 39, 40 e 41, em comparação com os referenciais teóricos da Tab. 1 estão inferiores, porém coerentes com o comportamento do material.

Verifica-se que apesar dos grãos informados pelos fabricantes possuírem propriedades mecânicas superiores, o processo de co-extrusão da chapa ABS e impressão dos corpos de prova não permitem preservar as características da sua matéria-prima. Isto é explicado e esperado pelo processo termomecânico ao qual são submetidos durante o processamento.

A deformação até a ruptura dos materiais foram semelhantes, predominante elástico e frágil. Pode-se afirmar que no geral não houve diferença significativa no comportamento das três amostras. Para as amostras CPES e CPI3DL os valores das propriedades ficaram dentro do erro padrão das medidas.

Por fim, para as amostras C PIECO verifica-se comportamento intensificado e característico de materiais frágeis, com menor capacidade em suportar deformações plásticas. Apresenta módulo de elasticidade, tensões de escoamento, resistência à tração e ruptura numericamente acima das demais amostras.

Este fato pode ser explicado pela origem da matéria-prima dos grãos utilizados para confecção do filamento. Ressalta-se que apesar dos grãos da matéria-prima deste ABS possuírem propriedades melhores que das demais amostras, trata-se de um material reciclado, que já sofreu maior degradação termomecânica, não sendo um material virgem como os demais.

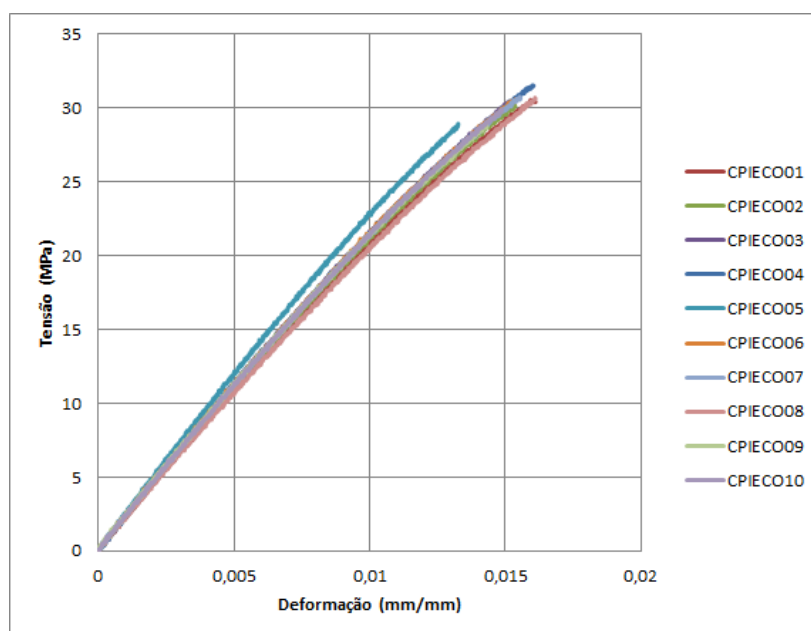


Figura 41 – Curva  $\sigma$ - $\epsilon$  para corpos de prova impressos C PIECO

A Fig. 42 apresenta a curva  $\sigma$ - $\epsilon$  para os três materiais. Os dados foram tratados e processados para determinação das curvas aproximadas para o comportamento dos

materiais testados.

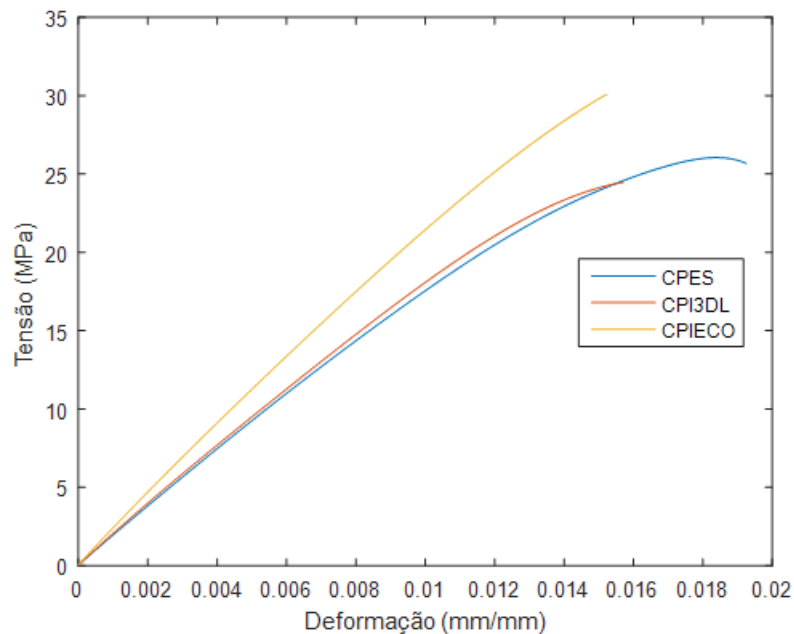


Figura 42 – Curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  para os materiais CPES, CPI3DL e C PIECO.

## 4.2 Teste de Fadiga Axial

Para realização dos ensaios foi necessário utilizar as propriedades de limite de resistência à tração determinados pelos testes da seção anterior conforme a Tab. 15.

Tabela 15 – Tensões de limite de resistência à tração para os materiais testados

Materiais	Resistência à Tração (MPa)
CPES	24,97 $\pm$ 1,17
CPI3DL	23,24 $\pm$ 0,45
CPIECO	30,93 $\pm$ 1,28

### 4.2.1 Testes para R=0,1

Para levantamento da curva S-N do plástico CPES foram realizados testes para 12 amostras. Os resultados são exibidos na Tab. 16. O valor da tensão máxima do carregamento  $\sigma_{max}$  ficou compreendido dentro da faixa de 50% a 90% do limite de resistência à tração do material.

Tabela 16 – Resultados experimentais dos ensaios de fadiga com razão de carregamento  $R=0,1$  para CPES

Material	R	$\sigma_{max}(MPa)$	$\sigma_{min}(MPa)$	$\sigma_a(MPa)$	$\sigma_m(MPa)$	Vida (Ciclos)	
CPES	0,1	$0,9.\sigma_u$	22,47	2,25	10,11	12,36	4896
	0,1	$0,9.\sigma_u$	22,47	2,25	10,11	12,36	4136
	0,1	$0,9.\sigma_u$	22,47	2,25	10,11	12,36	5554
	0,1	$0,8.\sigma_u$	19,98	2,00	8,99	10,99	10244
	0,1	$0,8.\sigma_u$	19,98	2,00	8,99	10,99	14894
	0,1	$0,8.\sigma_u$	19,98	2,00	8,99	10,99	13857
	0,1	$0,7.\sigma_u$	17,48	1,75	7,87	9,61	23238
	0,1	$0,7.\sigma_u$	17,48	1,75	7,87	9,61	26150
	0,1	$0,7.\sigma_u$	17,48	1,75	7,87	9,61	20154
	0,1	$0,5.\sigma_u$	12,49	1,25	5,62	6,87	308052
	0,1	$0,5.\sigma_u$	12,49	1,25	5,62	6,87	315819
	0,1	$0,5.\sigma_u$	12,49	1,25	5,62	6,87	368134

Com os dados da Tab. 16 foi possível verificar os dados estatísticos das amostras conforme a Tab. 17. Tem-se o desvio padrão para cada conjunto de amostras, erro padrão, média e os limites inferiores e superiores equivalentes para um dado nível de tensão em número de ciclos.

Tabela 17 – Resultados experimentais de CPES para razão de carregamento  $R=0,1$  avaliados estatisticamente.

$\sigma_a(MPa)$	Nº de Ciclos Médio	Desvio padrão	Erro Padrão	Limites de Confiança 95%	
				Superior	Inferior
10,11	4862	710	803	6625	3099
8,99	12376	2349	2658	18211	6540
7,87	23181	2998	3393	30629	15732
5,62	330668	32678	36978	411844	249492

Assim, é possível utilizar uma linha de tendência de potência para apresentar a curva S-N para as amostras CPES na Fig. 43. Verifica-se que a curva de tendência na forma de potência consegue abranger ou representar o comportamento para 98,85% dos pontos. Os coeficientes A e b que caracterizam a curva foram obtidos, sendo 32,642 e -0,139 respectivamente.

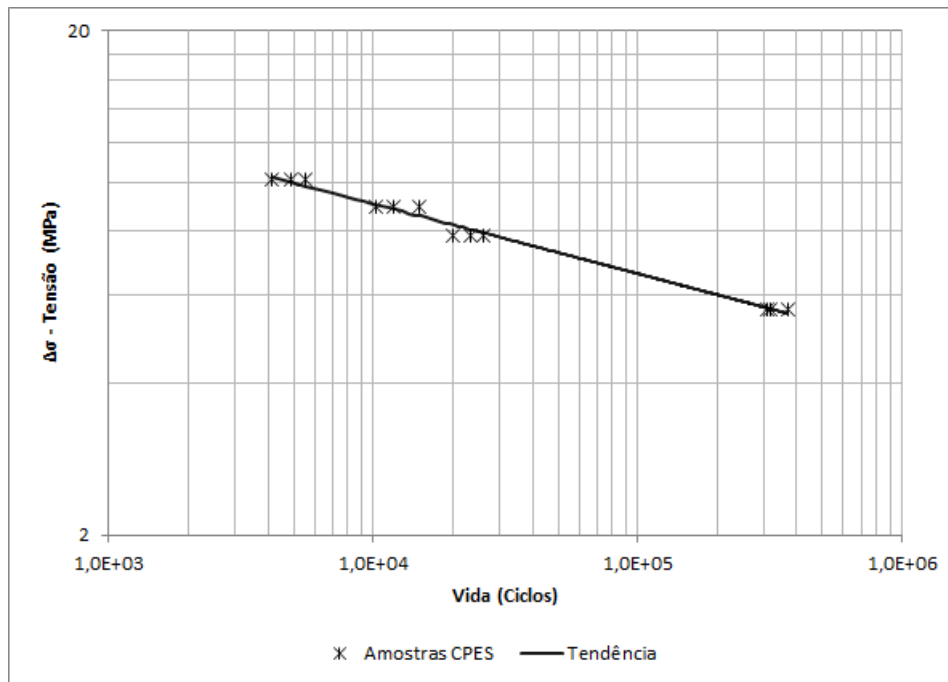


Figura 43 – Curva S-N para CPES em R=0,1

Seguindo adiante, foi realizado procedimento análogo para determinação da curva S-N para as amostras CPI3DL conforme demonstrado na Tab.18. Neste caso, adotou-se mais um conjunto de 3 pontos em  $\sigma_{max}$  limitado a 50% da tensão máxima de resistência à tração material, totalizando 15 pontos para construção da curva S-N. Esse conjunto de pontos adicionais foi realizado intencionalmente pelo pesquisador para verificar tendência da curva no intervalo descrito.

Tabela 18 – Resultados experimentais dos ensaios de fadiga com razão de carregamento R=0,1 para CPI3DL

Material	R	$\sigma_{max}(MPa)$	$\sigma_{min}(MPa)$	$\sigma_a(MPa)$	$\sigma_m(MPa)$	Vida (Ciclos)	
CPI3DL	0,1	$0,9.\sigma_u$	20,92	2,09	9,41	11,50	2655
	0,1	$0,9.\sigma_u$	20,92	2,09	9,41	11,50	2669
	0,1	$0,9.\sigma_u$	20,92	2,09	9,41	11,50	2266
	0,1	$0,8.\sigma_u$	18,59	1,86	8,37	10,23	4618
	0,1	$0,8.\sigma_u$	18,59	1,86	8,37	10,23	6994
	0,1	$0,8.\sigma_u$	18,59	1,86	8,37	10,23	4429
	0,1	$0,7.\sigma_u$	16,27	1,63	7,32	8,95	7978
	0,1	$0,7.\sigma_u$	16,27	1,63	7,32	8,95	7101
	0,1	$0,7.\sigma_u$	16,27	1,63	7,32	8,95	13531
	0,1	$0,6.\sigma_u$	13,94	1,39	6,27	7,67	21211
	0,1	$0,6.\sigma_u$	13,94	1,39	6,27	7,67	24043
	0,1	$0,6.\sigma_u$	13,94	1,39	6,27	7,67	17350
	0,1	$0,5.\sigma_u$	11,62	1,16	5,23	6,39	43272
	0,1	$0,5.\sigma_u$	11,62	1,16	5,23	6,39	37490
	0,1	$0,5.\sigma_u$	11,62	1,16	5,23	6,39	40343

Com os dados da Tab. 18 foi possível verificar os dados estatísticos das amostras conforme a Tab. 19. Tem-se o desvio padrão para cada conjunto de amostras, erro padrão, média e os limites inferiores e superiores equivalentes para um dado nível de tensão em número de ciclos.

Tabela 19 – Resultados experimentais de CPI3DL para razão de carregamento  $R=0,1$  avaliados estatisticamente.

$\sigma_a(MPa)$	Nº de Ciclos Médio	Desvio padrão	Erro Padrão	Limites de Confiança 95%	
				Superior	Inferior
9,41	2530	229	259	3098	1962
8,37	5347	1429	1618	8898	1796
7,32	9537	3487	3946	13482	5591
6,27	20868	3360	3802	29214	12522
5,23	40368	2891	3272	47550	33136

Desta forma, foi possível confeccionar a curva S-N apresentada na Fig. 44 para as amostras CPI3DL. Verifica-se que a curva de tendência calculada consegue abranger ou representar o comportamento para 96,31% dos pontos. Os coeficientes A e b que caracterizam a curva foram obtidos, sendo 47,369 e -0,205 respectivamente.

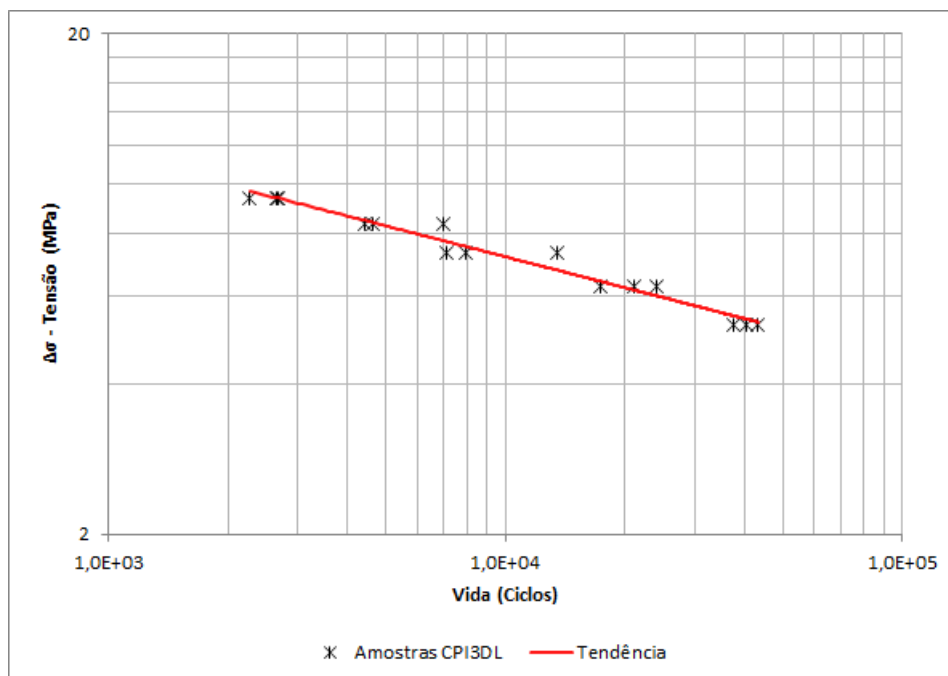


Figura 44 – Curva S-N para CPI3DL em  $R=0,1$

Por fim, foi realizado o mesmo procedimento adotado para os materiais CPES e CPI3DL para determinação da curva S-N para as amostras CPIECO conforme demonstrado na Tab.20.



Tabela 20 – Resultados experimentais dos ensaios de fadiga com razão de carregamento  $R=0,1$  para CPIPECO

Material	R	$\sigma_{max}(MPa)$	$\sigma_{min}(MPa)$	$\sigma_a(MPa)$	$\sigma_m(MPa)$	Vida (Ciclos)	
CPIPECO	0,1	$0,9.\sigma_u$	27,83	2,78	12,52	15,31	1006
	0,1	$0,9.\sigma_u$	27,83	2,78	12,52	15,31	762
	0,1	$0,9.\sigma_u$	27,83	2,78	12,52	15,31	1172
	0,1	$0,8.\sigma_u$	24,74	2,47	11,13	13,61	2078
	0,1	$0,8.\sigma_u$	24,74	2,47	11,13	13,61	1861
	0,1	$0,8.\sigma_u$	24,74	2,47	11,13	13,61	1859
	0,1	$0,7.\sigma_u$	21,65	2,16	9,74	11,91	3002
	0,1	$0,7.\sigma_u$	21,65	2,16	9,74	11,91	3134
	0,1	$0,7.\sigma_u$	21,65	2,16	9,74	11,91	4147
	0,1	$0,5.\sigma_u$	15,46	1,55	6,96	8,50	16341
	0,1	$0,5.\sigma_u$	15,46	1,55	6,96	8,50	11060
	0,1	$0,5.\sigma_u$	15,46	1,55	6,96	8,50	25582

Com os dados da Tab. 20 foi possível verificar os dados estatísticos das amostras conforme a Tab. 21. Tem-se o desvio padrão para cada conjunto de amostras, erro padrão, média e os limites inferiores e superiores equivalentes para um dado nível de tensão em número de ciclos.

Tabela 21 – Resultados experimentais de CPIPECO para razão de carregamento  $R=0,1$  avaliados estatisticamente.

$\sigma_a(MPa)$	Nº de Ciclos Médio	Desvio padrão	Erro Padrão	Limites de Confiança 95%	
				Superior	Inferior
12,52	980	206	233	1492	468
11,13	1933	126	142	2245	1620
9,74	3428	626	709	4984	1871
6,96	17661	7350	8318	25979	9343

Mediante os dados da Tab. 21 foi possível confeccionar a curva S-N apresentada na Fig. 45 para as amostras CPIPECO. Verifica-se que a curva de tendência calculada consegue abranger ou representar o comportamento para 96,05% dos pontos. Os coeficientes A e b que caracterizam a curva foram obtidos, sendo 50,055 e -0,201 respectivamente.

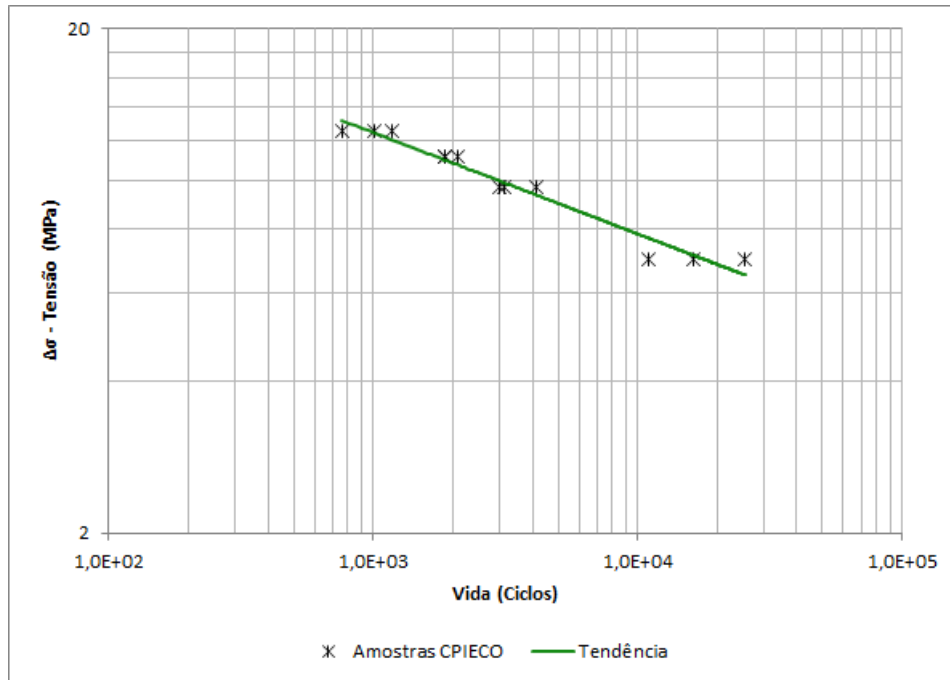


Figura 45 – Curva S-N para CPIPECO em R=0,1

Portanto, quanto ao nível de confiança da linha de tendência de potência, a curva para CPES apresentou a melhor representação das amostras, seguido pelas amostras CPIPECO e CPI3DL respectivamente.

Desta forma, realizando a combinação das curvas obtidas para os três tipos de materiais, tem-se a Fig. 46. Permite-se constatar que os melhores desempenhos em vida para carregamentos de R=0,1 (número de ciclos) foram para as amostras CPES, seguido pelas amostras CPIPECO e CPI3DL respectivamente.

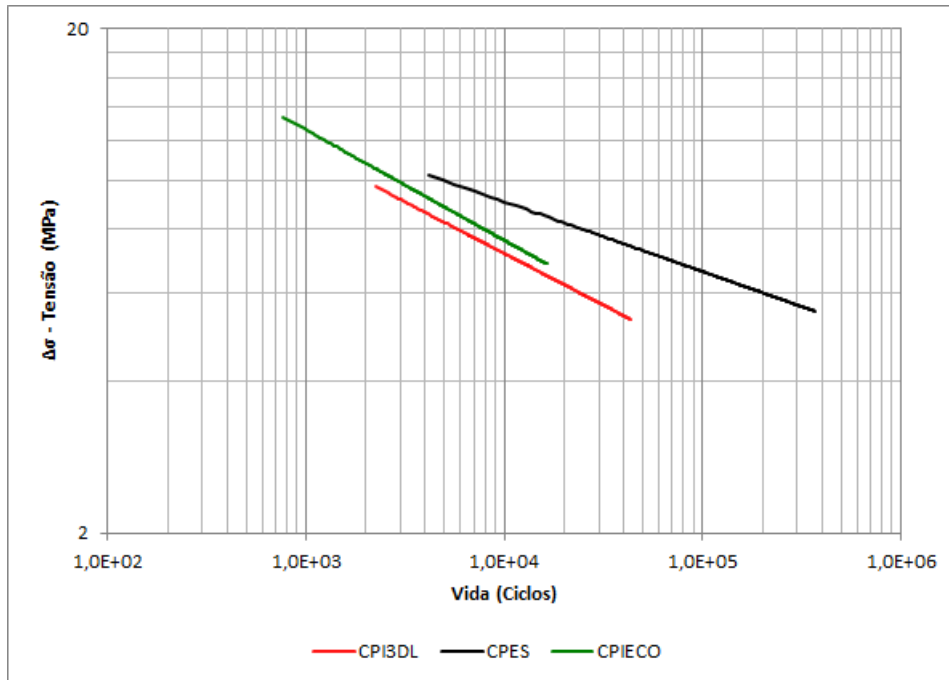


Figura 46 – Curva S-N para CIECO em R=0,1

Realizou-se a extrapolação dos dados médios para cada uma das curvas de tendência dos materiais. Assim, foi possível apresentar o limite de resistência de fadiga estimado dos materiais para  $N_f = 10^7$  conforme a Fig. 47 e Tab 22.

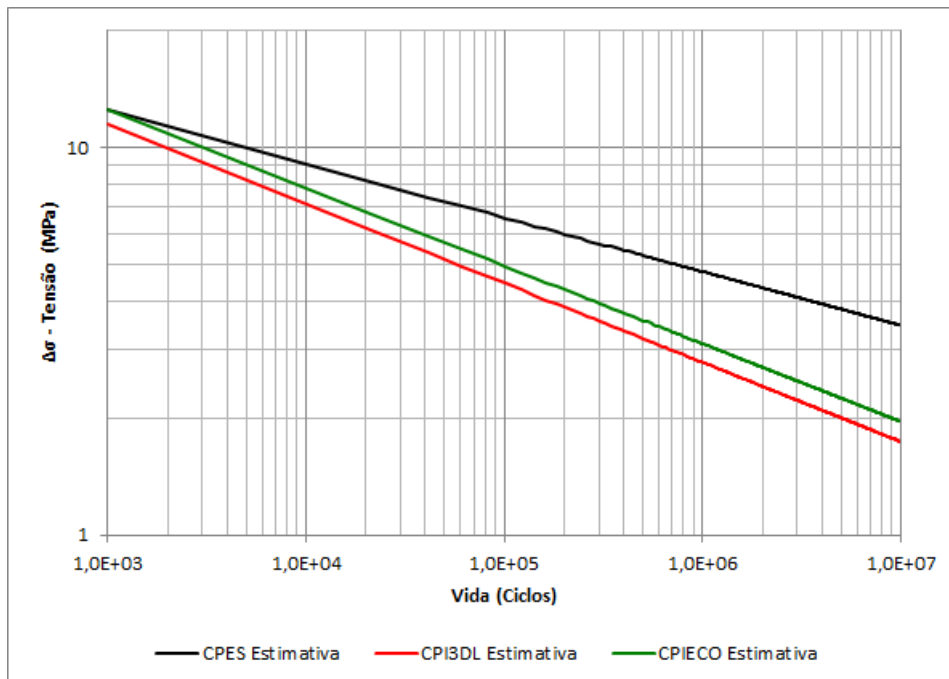


Figura 47 – Curva S-N estimada e projetada para os 3 materiais em R=0,1

Tabela 22 – Estimativa do limite de resistência à fadiga dos materiais testados para  $R=0,1$  em  $10^7$  ciclos

Material	$\sigma_u$ do Material	$\sigma_a$ em $10^7$ ciclos	$\sigma_{max}$ em $10^7$ ciclos	% de $\sigma_{max}$ em relação $\sigma_u$
CPES	24,97	3,47	7,72	30,91
CPI3DL	23,24	1,74	3,87	16,64
CPIECO	30,93	1,96	4,36	14,09

Conforme relatado na bibliografia, o limite de resistência à fadiga para os polímeros geralmente está compreendido entre 20% a 40% do limite de resistência à tração do material. Verifica-se que para o material CPES a estimativa está dentro deste limite inferior estimado, porém os materiais impressos ficam abaixo dessa faixa de valores. Esses resultados também são influenciados pelo efeito da tensão média associada aos carregamentos utilizados.

Esses resultados podem ser explicados pelo processo termomecânico em que o ABS é submetido para produção dos filamentos de impressão 3D e também ao procedimento de impressão, como a orientação das camadas e/ou falhas e imperfeições no preenchimento, bem como problemas na adesão das camadas entre si.

Portanto, apesar das propriedades mecânicas similares, o material CPES é fabricado por processo de co-extrusão industrial, em que o preenchimento interno e uniformidade estão em grau superior aos materiais impressos.

Ressalta-se que essa estimativa requer um maior número de testes em diferentes níveis de tensão, preferencialmente com cargas menores, para que seja realizada a confirmação da curva de tendência.

#### 4.2.2 Testes para $R=0,3$

De forma semelhante ao executado na seção anterior, foram realizados testes a fim de realizar levantamento da curva S-N dos materiais CPES, CPI3DL e CPIECO na nova configuração de carregamento.

Inicialmente, para o plástico CPES foram realizados testes para 12 amostras. Os resultados são exibidos na Tab. 23. O valor da tensão máxima do carregamento  $\sigma_{max}$  ficou compreendido dentro da faixa de 60% a 90% do limite de resistência à tração do material.

Tabela 23 – Resultados experimentais dos ensaios de fadiga com razão de carregamento  $R=0,3$  para CPES

Material	R	$\sigma_{max}(MPa)$	$\sigma_{min}(MPa)$	$\sigma_a(MPa)$	$\sigma_m(MPa)$	Vida (Ciclos)	
CPES	0,3	$0,9.\sigma_u$	22,47	6,74	7,87	14,61	13091
	0,3	$0,9.\sigma_u$	22,47	6,74	7,87	14,61	15129
	0,3	$0,9.\sigma_u$	22,47	6,74	7,87	14,61	9174
	0,3	$0,8.\sigma_u$	19,98	5,99	6,99	12,98	34752
	0,3	$0,8.\sigma_u$	19,98	5,99	6,99	12,98	26527
	0,3	$0,8.\sigma_u$	19,98	5,99	6,99	12,98	29824
	0,3	$0,7.\sigma_u$	17,48	5,24	6,12	11,36	50151
	0,3	$0,7.\sigma_u$	17,48	5,24	6,12	11,36	53078
	0,3	$0,7.\sigma_u$	17,48	5,24	6,12	11,36	64090
	0,3	$0,6.\sigma_u$	14,98	4,49	5,24	9,74	161195
	0,3	$0,6.\sigma_u$	14,98	4,49	5,24	9,74	141701
	0,3	$0,6.\sigma_u$	14,98	4,49	5,24	9,74	127290

A partir dos dados da Tab. 23 foi possível verificar os dados estatísticos das amostras conforme a Tab. 24. Tem-se o desvio padrão para cada conjunto de amostras, erro padrão, média e os limites inferiores e superiores equivalentes para um dado nível de tensão em número de ciclos.

Tabela 24 – Resultados experimentais de CPES para razão de carregamento  $R=0,3$  avaliados estatisticamente.

$\sigma_a(MPa)$	Nº de Ciclos Médio	Desvio padrão	Erro Padrão	Limites de Confiança 95%	
				Superior	Inferior
7,87	12465	3027	3425	19983	4946
6,99	30368	4139	4684	40650	20085
6,12	55773	7350	8317	74032	37515
5,24	143395	17016	19255	185665	101126

A partir da Tab. 24 foi possível confeccionar a curva S-N apresentada na Fig. 48 para as amostras CPES. Verifica-se que a curva de tendência calculada consegue abranger ou representar o comportamento para 96,87% dos pontos. Os coeficientes A e b que caracterizam a curva foram obtidos, sendo 37,115 e -0,164 respectivamente.

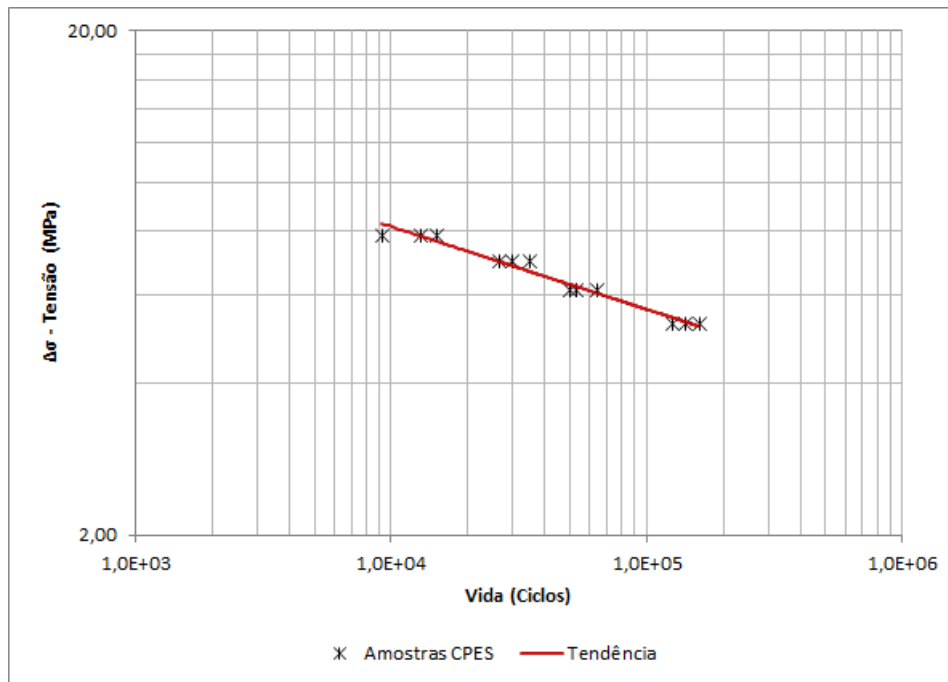


Figura 48 – Curva S-N para CPES em R=0,3

Em seguida, foi realizado procedimento análogo para determinação da curva S-N para as amostras CPI3DL conforme demonstrado na Tab.25 totalizando 12 pontos em quatro níveis de tensão diferentes.

Tabela 25 – Resultados experimentais dos ensaios de fadiga com razão de carregamento R=0,3 para CPI3DL

Material	R	$\sigma_{max}(MPa)$	$\sigma_{min}(MPa)$	$\sigma_a(MPa)$	$\sigma_m(MPa)$	Vida (Ciclos)	
CPI3DL	0,3	$0,9.\sigma_u$	20,92	6,27	7,32	13,60	6016
	0,3	$0,9.\sigma_u$	20,92	6,27	7,32	13,60	4673
	0,3	$0,9.\sigma_u$	20,92	6,27	7,32	13,60	7546
	0,3	$0,8.\sigma_u$	18,59	5,58	6,51	12,08	13732
	0,3	$0,8.\sigma_u$	18,59	5,58	6,51	12,08	12366
	0,3	$0,8.\sigma_u$	18,59	5,58	6,51	12,08	13100
	0,3	$0,7.\sigma_u$	16,27	4,88	5,69	10,57	23133
	0,3	$0,7.\sigma_u$	16,27	4,88	5,69	10,57	25678
	0,3	$0,7.\sigma_u$	16,27	4,88	5,69	10,57	29353
	0,3	$0,6.\sigma_u$	13,94	4,18	4,88	9,06	51618
	0,3	$0,6.\sigma_u$	13,94	4,18	4,88	9,06	65861
	0,3	$0,6.\sigma_u$	13,94	4,18	4,88	9,06	37505

A partir dos dados da Tab. 25 foi possível verificar os dados estatísticos das amostras conforme a Tab. 26. Tem-se o desvio padrão para cada conjunto de amostras, erro padrão, média e os limites inferiores e superiores equivalentes para um dado nível de tensão em número de ciclos.

Tabela 26 – Resultados experimentais de CPI3DL para razão de carregamento R=0,3 avaliados estatisticamente.

$\sigma_a$ (MPa)	Nº de Ciclos Médio	Desvio padrão	Erro Padrão	Limites de Confiança 95%	
				Superior	Inferior
7,32	6078	1438	1627	9649	2507
6,51	13066	684	774	14764	11368
5,69	26055	3127	3539	33823	18287
4,88	51661	14178	16044	86882	16441

Utilizando os dados da Tab. 26 foi possível confeccionar a curva S-N apresentada na Fig. 49 para as amostras CPES. Verifica-se que a curva de tendência calculada consegue abranger ou representar o comportamento para 95,15% dos pontos. Os coeficientes A e b que caracterizam a curva foram obtidos, sendo 35,956 e -0,182 respectivamente.

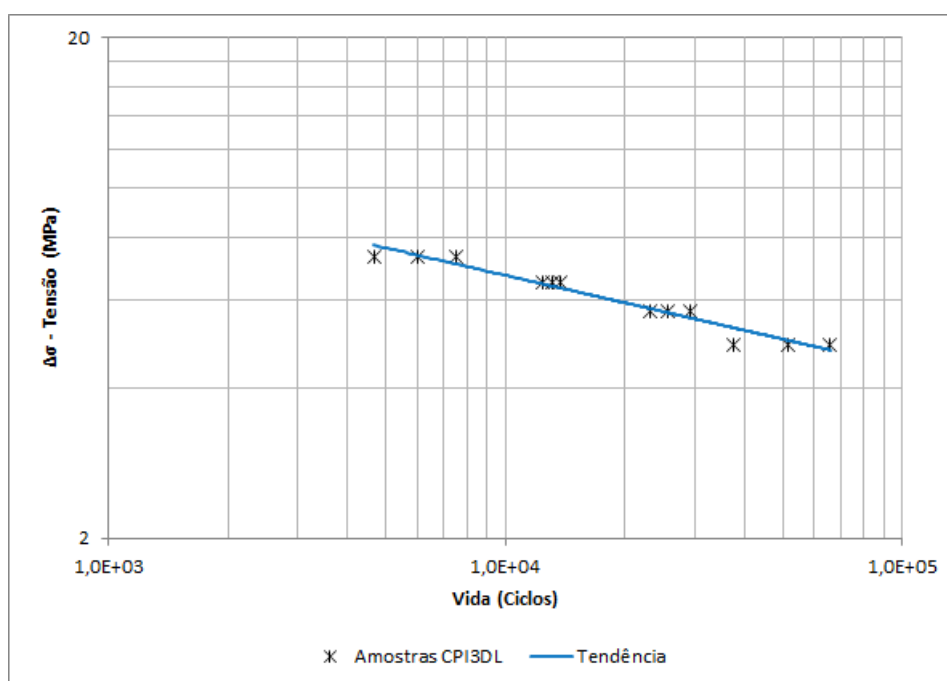


Figura 49 – Curva S-N para CPI3DL em R=0,3

Adiante, foi realizado procedimento para determinação da curva S-N para as amostras CPECO conforme demonstrado na Tab. 25 totalizando 12 pontos em quatro níveis de tensão diferentes.

Tabela 27 – Resultados experimentais dos ensaios de fadiga com razão de carregamento  $R=0,3$  para CPIPECO

Material	R	$\sigma_{max}(MPa)$	$\sigma_{min}(MPa)$	$\sigma_a(MPa)$	$\sigma_m(MPa)$	Vida (Ciclos)	
CPIPECO	0,3	$0,9.\sigma_u$	27,83	8,35	9,74	18,09	2357
	0,3	$0,9.\sigma_u$	27,83	8,35	9,74	18,09	3080
	0,3	$0,9.\sigma_u$	27,83	8,35	9,74	18,09	2298
	0,3	$0,8.\sigma_u$	24,74	7,42	8,66	16,08	4026
	0,3	$0,8.\sigma_u$	24,74	7,42	8,66	16,08	4268
	0,3	$0,8.\sigma_u$	24,74	7,42	8,66	16,08	4009
	0,3	$0,7.\sigma_u$	21,65	6,49	7,58	14,07	6480
	0,3	$0,7.\sigma_u$	21,65	6,49	7,58	14,07	7029
	0,3	$0,7.\sigma_u$	21,65	6,49	7,58	14,07	5218
	0,3	$0,6.\sigma_u$	15,46	4,64	5,41	10,05	35670
	0,3	$0,6.\sigma_u$	15,46	4,64	5,41	10,05	33738
	0,3	$0,6.\sigma_u$	15,46	4,64	5,41	10,05	31278

A partir dos dados da Tab. 27 foi possível verificar os dados estatísticos das amostras conforme a Tab. 28. Tem-se o desvio padrão para cada conjunto de amostras, erro padrão, média e os limites inferiores e superiores equivalentes para um dado nível de tensão em número de ciclos.

Tabela 28 – Resultados experimentais de CPIPECO para razão de carregamento  $R=0,3$  avaliados estatisticamente.

$\sigma_a(MPa)$	Nº de Ciclos Médio	Desvio padrão	Erro Padrão	Limites de Confiança 95%	
				Superior	Inferior
8,35	2578	435	493	3660	1497
7,42	4101	145	164	4461	3741
6,49	6242	929	1051	8549	3936
4,64	33562	2201	2491	39030	28094

Utilizando os dados da Tab. 28 foi possível confeccionar a curva S-N apresentada na Fig. 50 para as amostras CPIPECO. Verifica-se que a curva de tendência calculada consegue abranger ou representar o comportamento para 98,2% dos pontos. Os coeficientes A e b que caracterizam a curva foram obtidos, sendo 55,203 e -0,224 respectivamente.



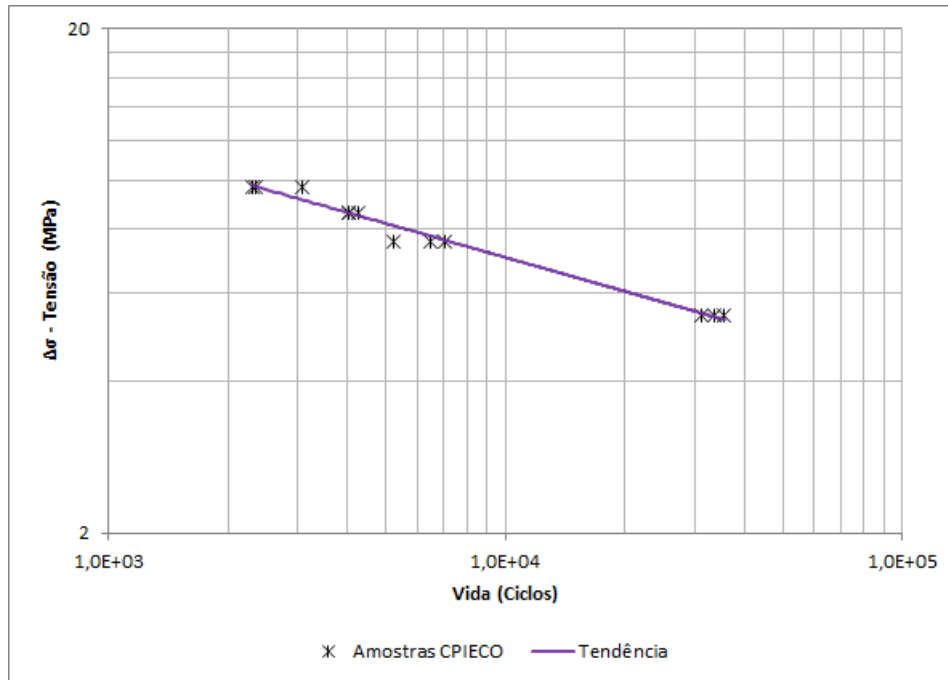


Figura 50 – Curva S-N para CPIPECO em R=0,3

Analisando o nível de confiança da linha de tendência de potência, a curva projetada para CPIPECO demonstra melhor representação das amostras, seguido pelas amostras CPES e CPI3DL respectivamente.

Ao realizar a combinação das curvas obtidas para os três tipos de materiais, tem-se a Fig. 51. Permite-se constatar que os melhores desempenhos em vida para carregamentos semelhantes em R=0,3 (número de ciclos) foram para as amostras CPES, seguido pelas amostras CPIPECO e CPI3DL respectivamente. Porém, por volta de 20 mil ciclos o comportamento de CPIPECO e CPI3DL passa a torna-se bem próximos.

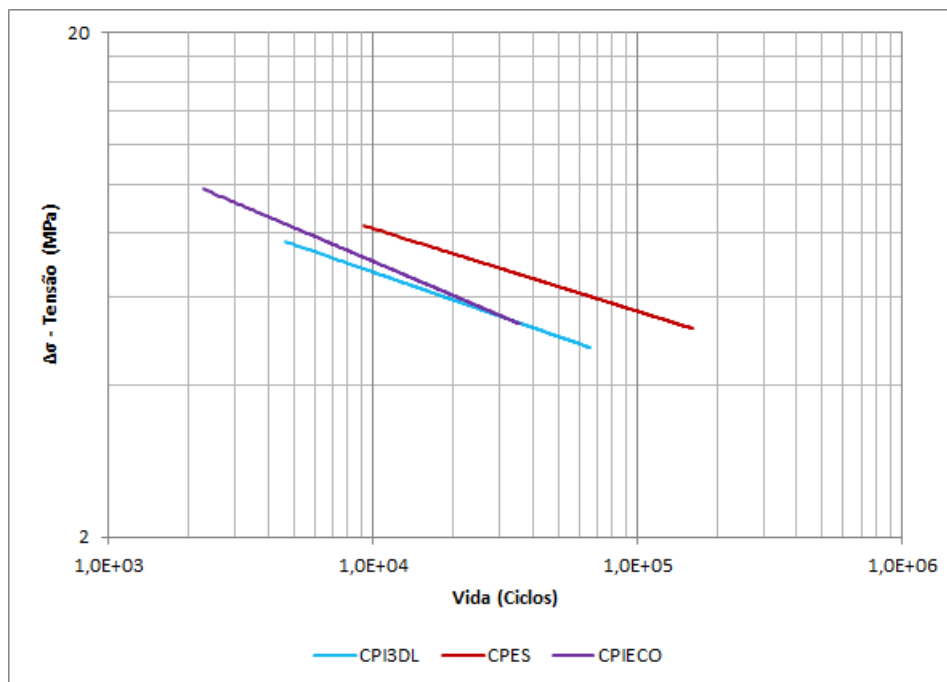


Figura 51 – Curva S-N para C PIECO em R=0,1

Em seguida, realizou-se a extrapolação dos dados médios para cada uma das curvas de tendência dos materiais. Assim, foi possível apresentar o limite de resistência de fadiga estimado dos materiais para  $N_f = 10^7$  conforme a Fig. 47 e Tab 22.

Os resultados inferiores para as amostras fabricadas por impressão 3D podem ser explicados pelo processo termomecânico em que o ABS é submetido para produção dos filamentos. No caso especial do C PIECO, também pelo processo de reciclagem da matéria-prima. As falhas decorrentes do procedimento de impressão em si também podem ser responsabilizada, pois o material está sujeito às imperfeições no preenchimento, bem como problemas na adesão das camadas.

Ressalta-se que as estimativas das curvas S-N levantadas requerem um maior número de testes em diferentes níveis de tensão, preferencialmente com cargas menores, para que seja realizada a confirmação da curva de tendência e redução das incertezas.

### 4.2.3 Análise e comparação das curvas S-N dos testes

Durante os ensaios realizados para composição do comportamento da curva S-N dos materiais (tanto para R=0,1 e R=0,3), não foi possível executar testes longos acima de  $10^5$  ciclos. O tempo de disponibilidade do equipamento foi um fator limitante, tendo em vista que para um teste em 5 Hz, este realiza 5 ciclos por segundo.

Aumentar o valor do teste para acima de 5 Hz (valor recomendável pela norma ASTM D7791) traria maior incerteza aos dados obtidos pelo experimento, em virtude dos efeitos de histerese que resultam da viscoelasticidade. Conforme ressaltado na bibliografia,

em frequências mais altas a energia histerética da carga cíclica é dissipada principalmente como calor (maior parte é absorvida pelo material, que aquece e perde rigidez). Esse aumento de temperatura leva à degradação do material e a diminuição da vida em fadiga.

Desta forma, para cada ensaio de um espécime com vida útil estimada em  $10^6$  ciclos seriam necessários em média  $2^5$  segundos ou 55 horas. Para um espécime com vida útil estimada em  $10^7$  ciclos, seriam necessários em média  $2^6$  segundos ou 23 dias para cada ensaio.

Portanto, a estratégia de testes deste trabalho concentrou-se em realizar ensaios com menor duração para levantar o comportamento ou tendência da curva S-N dos materiais, propiciando um estudo exploratório e inicial dos mesmos.

Ocorreram problemas de rompimento das amostras fora da seção de interesse durante a realização dos ensaios. Desta forma, os espécimes atingidos foram separados das demais amostras. No apêndice são apresentadas as fichas que foram utilizadas como orientação e registro dos ensaios.

Para os materiais CPES, CPI3DL e CPIECO foram preparado gráficos comparativos entre as linhas de tendência para os valores de  $R=0,1$  e  $R=0,3$ . As Fig. apresentam os resultados.

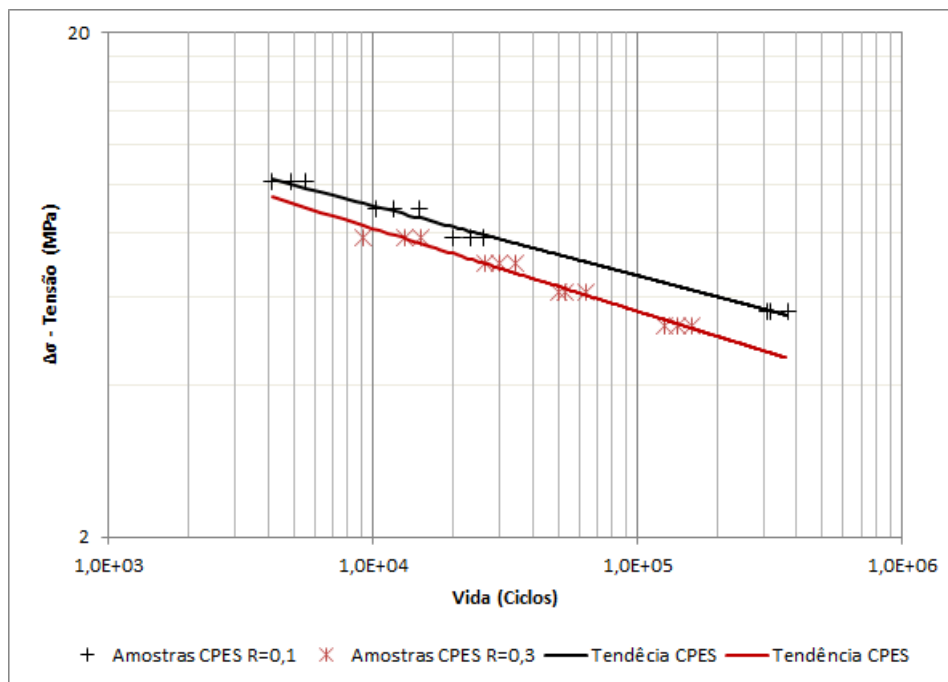


Figura 52 – Curvas S-N comparativas para CPES em  $R=0,1$  e  $R=0,3$

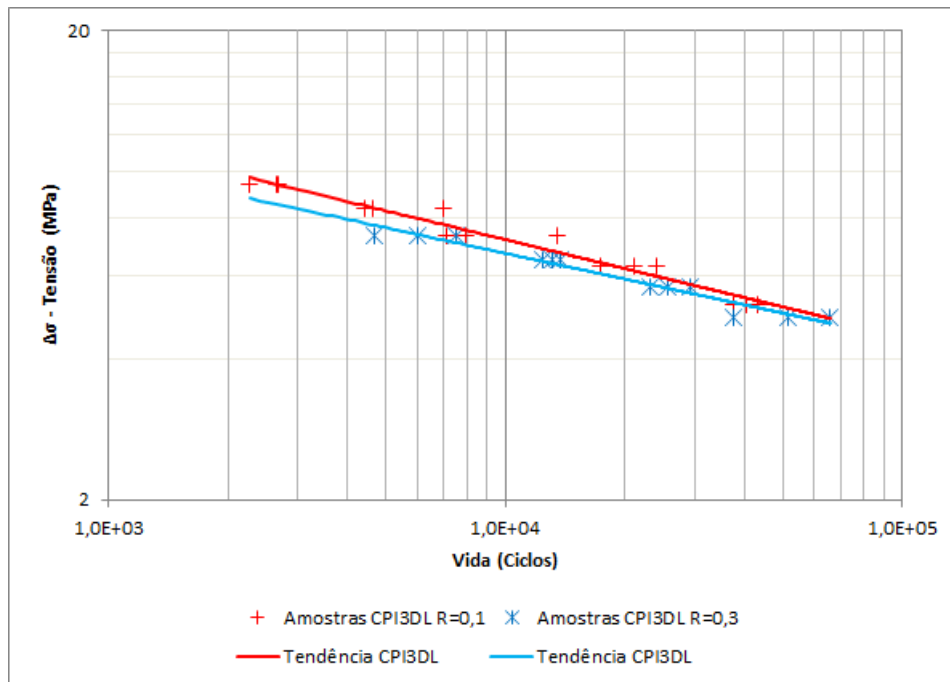


Figura 53 – Curvas S-N comparativas para CPI3DL em R=0,1 e R=0,3

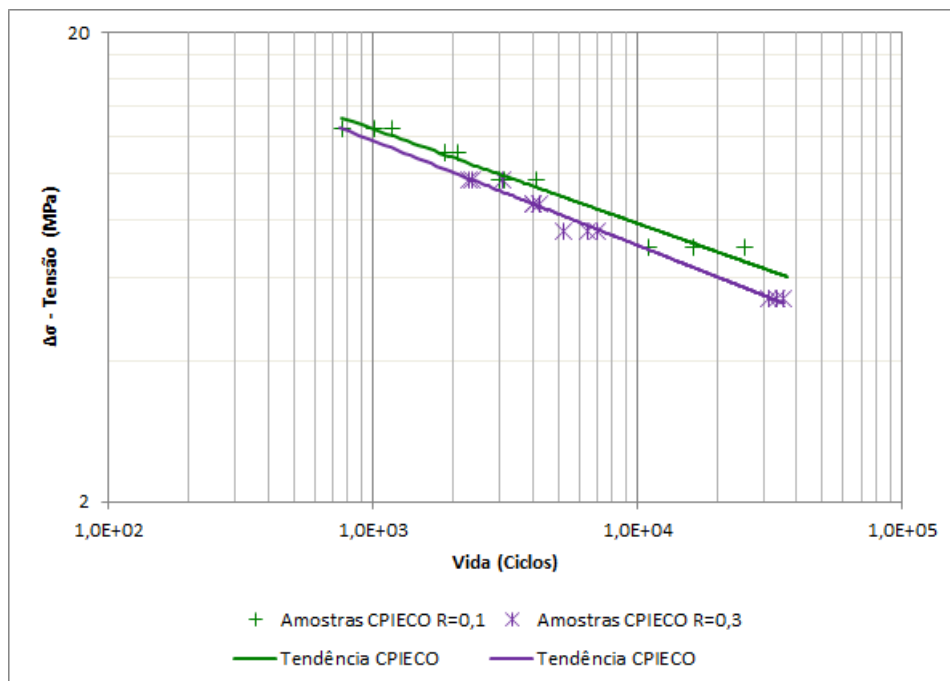


Figura 54 – Curvas S-N comparativas para C PIECO em R=0,1 e R=0,3

Constata-se que para ambos materiais o comportamento e tendência da curva são semelhantes. Para uma razão R de valor numérico maior (R=0,3), verifica-se um afastamento da linha de tendência para logo abaixo da curva R de valor inferior (R=0,1).

O comportamento citado pode ser explicado em virtude do incremento da tensão média do carregamento das amostras, em detrimento da diminuição da amplitude de

tensão. Desta forma, a vida em ciclos é afetada não somente pela tensão alternada e também pela tensão média.

Assim, para o caso de carregamentos com amplitude de mesma intensidade e R diferentes, a vida em ciclos da amostra será menor para  $R=0,3$  em relação a  $R=0,1$ .

### 4.3 Importação das curvas S-N experimentais no *Software Ansys*

Inicialmente, para realizar a verificação do modelo, foi escolhido três carregamentos cíclicos para cada um dos materiais CPES, CPI3DL e C PIECO. Os valores desses carregamentos são exatamente aos executados nos ensaios experimentais. Adicionalmente, as curvas S-N levantadas para esses materiais nas seções anteriores foram adicionada à biblioteca de materiais, bem como suas respectivas propriedades físicas e mecânicas.

Desta forma a Tab. 29 representa os dados dos respectivos carregamentos e os números de ciclos em que os materiais resistiram pela simulação numérica e ensaio experimental. Sendo R a razão entre as cargas mínima e máximas,  $F_m$  a força média aplicada pelo carregamento e  $F_a$  a amplitude da carga.

Tabela 29 – Comparativo entre dados de simulação e experimento para cada material

Material	R	$F_m$ (N)	$F_a$ (N)	Vida (N° Ciclos)	
				Experimental	Simulação Ansys
CPES	0,1	417,18	341,33	23131	20622
CPI3DL	0,1	327,76	268,17	20868	16798
CPIECO	0,1	371,86	304,25	17661	14314

Os valores inferiores da simulação em relação ao experimental podem ser explicados em virtude do conservadorismo no ambiente de elementos finitos para os cálculos de fadiga. Adicionalmente, a curva S-N exportada para o programa é baseada em uma linha de tendência aproximada para o intervalo de pontos, ou seja, indica um valor médio esperado.

As Figs.55, 56 e 57 apresentam as simulações para os 3 tipos de materiais. A independência da malha nos resultados foi verificada executando uma análise de sensibilidade de malha e convergência. Para a seção de interesse e estudo na simulação, a convergência dos resultados foi assegurada.

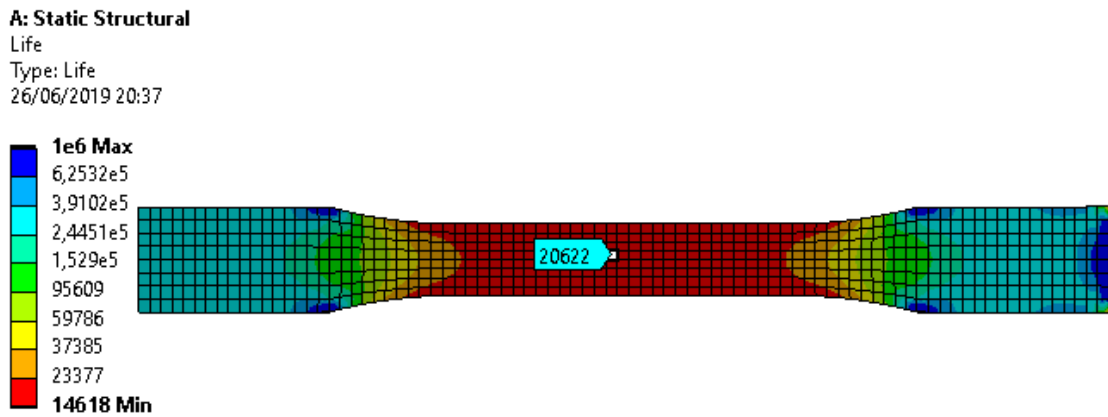


Figura 55 – Simulação no *Ansys* para CPES com  $R=0,1$  e  $F_{max}$  de 417,18 N

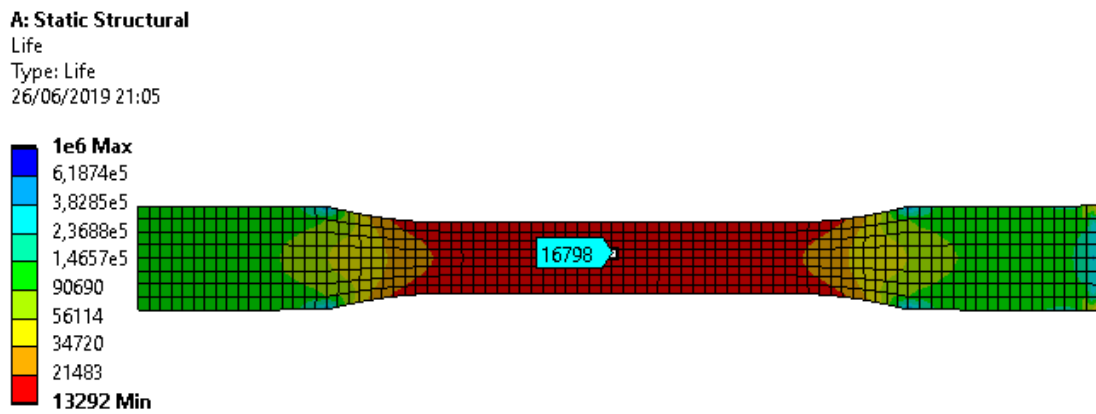


Figura 56 – Simulação no *Ansys* para CPI3DL com  $R=0,1$  e  $F_{max}$  de 268,17 N

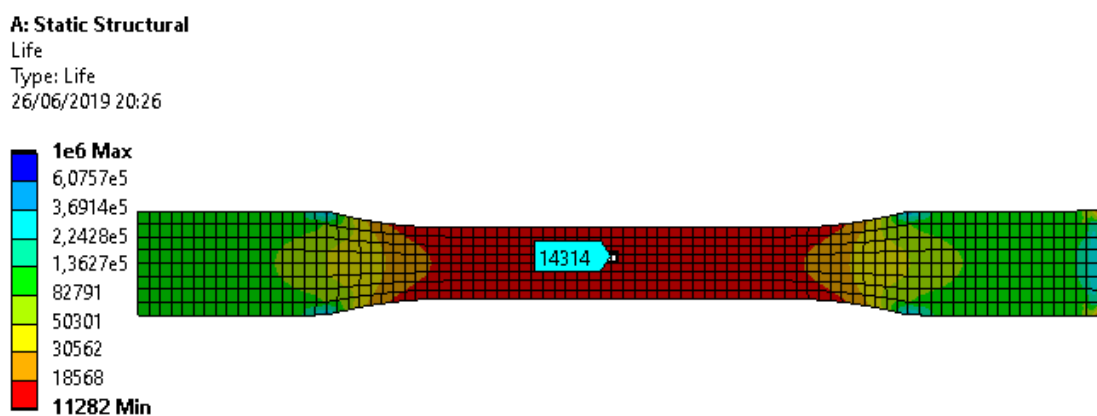


Figura 57 – Simulação no *Ansys* para C PIECO com  $R=0,1$  e  $F_{max}$  de 304,25 N

## 5 Conclusão

O desenvolvimento e popularização dos processos de produção por manufatura aditiva estão contribuindo para modernização e evolução dos modelos produtivos. Sua utilização favorece a criação de novas soluções, de componentes mais leves e resistentes, acelerando o tempo de produção e podendo diminuir consideravelmente os custos.

Desta forma, há a possibilidade de adoção de novos materiais em soluções de engenharia, bem como a combinação destes para trazer características únicas para variados projetos. Assim, é necessário o estudo do comportamento dos materiais utilizados pelos processos de manufatura aditiva, em especial os polímeros.

Ressalta-se que os estudos relacionadas à fadiga dos polímeros são relativamente recentes e ainda existem muitas linhas de pesquisas disponíveis. É fundamental aprofundar estudo neste grupo de materiais, que podem oferecer inúmeras vantagens frente aos materiais tradicionais.

Para a engenharia, o estudo do comportamento dos materiais sujeitos à fadiga se faz necessário após inúmeros acidentes e incidentes do passado contribuídos pela falta de compreensão do fenômeno, causando perdas de vidas e enormes prejuízos financeiros.

Para este trabalho, o objetivo proposto foi iniciar a investigação do comportamento em fadiga mecânica para o plástico ABS e sobretudo a influência do processo de manufatura aditiva nas propriedades mecânicas dos materiais.

Com relação aos ensaios mecânicos realizados, as amostras confeccionadas por processos de manufatura diferentes apresentaram comportamento similares, permitindo uma boa recomendação do uso das impressoras 3D para as condições e parâmetros de impressão utilizados. Ressalta-se ainda que de acordo com o referencial bibliográfico, os valores ficaram próximos e/ou dentro do limite inferior esperado para o material ABS.

No ensaio de tração axial foi constatado uma região elástica bem definida para ambos tipos de materiais, caracterizando uma ruptura rápida quando tensionados, de modo frágil e de baixa tenacidade. O material impresso a partir do filamento produzido por ABS reciclado apresentou propriedades mecânicas nos ensaios de tração numericamente maiores que os demais materiais, porém constatou-se que este era menos tenaz e mais frágil em relação aos demais.

Quanto aos ensaios de fadiga axial, verificou-se que há inúmeras possibilidades de exploração. Assim, o estudo foi iniciado com testes de carregamentos cíclicos para  $R=0,1$  e  $R=0,3$ . Com estes dados foi possível construir as curva S-N iniciais e as tendências para cada material, possibilitando estimar um limite de resistência à fadiga sob estas condições.

É válido destacar que a confecção das curvas S-N demandam testes demorados. A frequência de aplicação do carregamento precisa ser limitada em virtude dos efeitos de histerese resultantes da viscoelasticidade em que os polímeros estão sujeitos quando submetidos a ciclos com frequências mais altas. Para melhor compreensão do comportamento dos materiais, ainda existe a necessidade de execução de um maior número de testes para obter pontos e faixas da curva S-N diferentes.

A partir dos dados obtidos nos ensaios de fadiga, permite-se observar tendências com relação ao comportamento dos materiais testados, com um grau de incerteza associado, necessitando um maior número de espécimes ensaiados para aumentar a confiabilidade dos resultados. Verificou-se ainda o efeito da mudança do valor de R e da tensão média no comportamento das curvas S-N. Portanto, com o aumento numérico da razão R, a vida em fadiga é prejudicada assim como da tensão média.

Por fim, destaca-se que a execução deste trabalho possibilitou a prática dos conhecimentos teóricos adquiridos e aprofundamento nas áreas de caracterização das propriedades mecânicas de materiais e análise do comportamento em fadiga.

## 5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Para continuidade dos estudos iniciados neste trabalho, pode-se sugerir as seguintes atividades:

- Caracterização do comportamento em fadiga axial dos materiais para outros valores de razão R;
- Caracterização das propriedades mecânicas dos materiais quando submetidos à flexão;
- Caracterização do comportamento das amostras submetidas à fadiga flexional;
- Busca de amostras de ABS confeccionadas por outros métodos, como por exemplo: moldagem por injeção;
- Adoção de novos polímeros para testes. Por exemplo o PLA.



# Referências

ALIHEIDARI, N. Fracture resistance measurement of fused deposition modeling 3d printed polymers. In: . Polymer Testing: [s.n.], 2017. v. 60, p. 94–101. Citado na página 22.

AMUCHASTEGUI, J. G. Fadiga – a principal causa raiz das falhas mecânicas – o que é? como identificar e prevenir? ENSUS Advanced engineering, 2011. Disponível em: <<http://ensus.com.br/fadiga/>>. Citado 4 vezes nas páginas 8, 34, 35 e 36.

ARAUJO, E. Ensaio de fadiga: Como prevenir e eliminar problemas de fadiga em campo. 2017. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/ensaio-de-fadiga-como-prevenir-e-eliminar-problemas-de-fadiga-em-campo/>>. Citado na página 20.

ARAUJO, E. P. B. Void3d: Impressora 3d de baixo custo. 2018. Disponível em: <[https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/26477/1/VOID3DImpressora3D\\_AraC3BAjo\\_2018.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/26477/1/VOID3DImpressora3D_AraC3BAjo_2018.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

ASM. Fatigue. 2008. Disponível em: <[https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05224G\\_Chapter14.pdf](https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05224G_Chapter14.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 41.

ASTM. Standard test method for tensile properties of plastics. EUA, 2014. Citado 6 vezes nas páginas 8, 12, 46, 47, 52 e 53.

ASTM. Standard test method for uniaxial fatigue properties of plastics. EUA, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.

ASTROSCIENCE3D. Void3d: Impressora 3d de baixo custo. 2018. Disponível em: <<https://www.astrosceince3d.com/single-post/2017/05/07/SLA-vs-SLS-vs-FDM>>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

BARROS, A. M. P. C. Síntese e caracterização de um polímero biodegradável. Mestrado em Química da Universidade do Minho, 2011. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/18454/c382ngela20Maria20Puga20Caridade20de20Barros.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 27.

BESKO, M. e. a. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3d. In: . Opet - Gest. Tecnol. Inov. - Revista Eletrônica dos Cursos de Engenharia: [s.n.], 2017. v. 1, n. 3, p. 9–18. Disponível em: <<http://www.opet.com.br/faculdade/revista-engenharias/pdf/n3/Artigo2-n3-Bilyk.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 31.

BETAEQ. Processos: Injeção x extrusão. Empresa Brasileira de Comunicação e Ensino sobre Engenharia Química, 2016. Disponível em: <<https://betaeq.com.br/index.php/2016/04/20/processos-injecao-x-extrusao-de-polimeros/>>. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

CAMBRIDGE. Materials data book. Cambridge University Engineering Department, 2003. Disponível em: <<http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/cueddatabooks/materials.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 28.

CANEVAROLO, S. V. Polímeros como materiais de engenharia. In: . São Paulo: Artliber, 2006. (2). Citado 2 vezes nas páginas 26 e 28.

CARNEIRO, S. H. S. Minicurso de fadiga de estruturas aeronáuticas. 2015. Citado na página 35.

CHANDRAN, K. S. R. Mechanical fatigue of polymers: A new approach to characterize the s-n behavior on the basis of macroscopic crack growth mechanism. In: *Polymer*. [s.n.], 2016. v. 91, n. 17, p. 222–238. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003238611630204X>>. Citado 4 vezes nas páginas 8, 41, 42 e 43.

CIMM. A curva tensão deformação. Centro de Informação Metal Mecânica, 2017. Disponível em: <[https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6537-a-curva-tensao-deformacao#.W\\_2BoeJG3IV](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6537-a-curva-tensao-deformacao#.W_2BoeJG3IV)>. Citado na página 54.

CRAWFORD, R. J.; BENHAM, P. P. Some fatigue characteristics of thermoplastics. In: *Polymer*. [s.n.], 1975. v. 16, n. 10, p. 908–914. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0032386175902128>>. Citado na página 41.

DAO, K. C.; DICKEN, D. J. Fatigue failure mechanisms in polymers. 1987. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/pen.760270406>>. Citado na página 41.

DOWLING, N. E. Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. In: . Harlow: Pearson, 2013. (4), p. 975. ISBN 978-0-13-139506-0. Citado 8 vezes nas páginas 8, 20, 33, 34, 36, 37, 39 e 40.

FERNANDES, J. F. M. Dissertação de mestrado: Estudo da influência de parâmetros de impressão 3d nas propriedades mecânicas do pla. Programa Mestrado Engenharia Mecânica da Universidade de Lisboa, 2016. Disponível em: <[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/281870113703681/Dissertacao\\_73521.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/281870113703681/Dissertacao_73521.pdf)>. Citado na página 31.

FERREIRA, L. A. S.; PESSAN, L. A.; JUNIOR, E. H. Comportamento mecânico e termo-mecânico de blendas poliméricas pbt/abs. In: . Polímeros: [s.n.], 1997. v. 7, n. 1, p. 67–97. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-14281997000100011](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14281997000100011)>. Citado na página 27.

GAMA, D. P. N. Dissertação de mestrado: Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíche. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, 2017. Disponível em: <<http://www.mec.uff.br/pdfeses/DanielPereiraNunesGama2017.pdf>>. Citado na página 54.

GUERRA, M. V. R. Desenvolvimento e análise de um projeto de feixe de molas. 2016. Disponível em: <[https://fga.unb.br/articles/0001/4898/TCC1\\_Marcus\\_Vin\\_cius\\_Rocha\\_Guerra.pdf](https://fga.unb.br/articles/0001/4898/TCC1_Marcus_Vin_cius_Rocha_Guerra.pdf)>. Citado na página 39.

HERTZBER, R. W. Deformation and fracture mechanics of engineering materials. Wiley: 5 ed., 2012. Citado na página 41.

- INDUSTRIAL, M. Como funciona a moldagem por injeção. Mecânica Industrial, 2018. Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/39-como-funciona-a-moldagem-por-injecao/>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 30.
- KLEIN, F. R. Estudo da degradação termomecânica e fotooxidativa de poli(acrilonitril-butadieno-estireno) para fins de reciclagem primária. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/93385/271862.pdf?sequence=1>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 28.
- KNAUSS, W. G. Time dependent fracture of polymers. Graduate Aeronautical Laboratories, California Institute of Technology, 1989. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/41b2/0770ade70ceccfe09e4f1f9e5ebd2470a437.pdf>>. Citado na página 22.
- MANO, E. B. Polímeros como materiais de engenharia. In: . São Paulo: Edgard Blucher, 2000. (2). Citado 5 vezes nas páginas 8, 21, 26, 27 e 28.
- NARESSI J. B.; HERNANDES, F. Aeronavegabilidade relacionados à fadiga estrutural em aeronaves. In: . Revista Conexão Sipaer: [s.n.], 2017. v. 8, n. 1, p. 92–100. Disponível em: <<http://conexaosipaer.cenipa.gov.br/index.php/sipaer/article/viewFile/297/357>>. Citado na página 21.
- NIELSEN L.; LANDEL, R. F. Mechanical properties of polymers and composites. New York: 2.ed. M. Dekker, p. 557, 1994. Citado na página 42.
- NORTON, R. L. Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada. In: . São Paulo: Bookman, 2013. (4), p. 1030. ISBN 9780136123705. Citado 3 vezes nas páginas 8, 21 e 34.
- OLIVIER, N. C. Tese de doutorado: Análise de falha da camada polimérica externa de cabos umbilicais. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, 2007. Disponível em: <[http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-14012008-111221/publico/Tese\\_Nelson\\_Cardenas\\_Olivier.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-14012008-111221/publico/Tese_Nelson_Cardenas_Olivier.pdf)>. Citado na página 42.
- PALLAROLAS, E. A. F. Revisão técnica de processos manufatura aditiva e estudo de configurações para estruturas de impressoras tridimensionais. Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos para obtenção do título de Engenheiro Mecânico, 2013. Citado na página 22.
- PEREIRA, F. S. G. Comportamento à fadiga de componentes estruturais sob a ação de solicitações de amplitude variável. Dissertação de Mestrado apresentada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11308/2/Texto20integral.pdf>>. Citado na página 20.
- PERES, R. v. Caracterização e processamento do poli(ácido láctico) 70/30 para impressão 3d. Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Doutorado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, 2016. Disponível em:

- <[http://www.ime.eb.mil.br/arquivos/teses/se4/cm/Tese\\_Rafael\\_Vidal.pdf](http://www.ime.eb.mil.br/arquivos/teses/se4/cm/Tese_Rafael_Vidal.pdf)>. Citado na página 32.
- RIBEIRO, A. S. Moldagem por injeção. Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia - Departamento de Construção e Estruturas, 2018. Disponível em: <<http://www.ferramentalrapido.ufba.br/moldagemporinjeca.htm>>. Citado na página 29.
- ROSA, E. da. Análise de resistência mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Mecânica - Grupo de Análise e Projeto Mecânico, 2002. Disponível em: <<http://www.grante.ufsc.br/download/Fadiga/FADIGA-Livro-Edison-da-Rosa.pdf>>. Citado 6 vezes nas páginas 8, 20, 33, 37, 38 e 39.
- SANTANA, L. Caracterização e processamento do poli(ácido láctico) 70/30 para impressão 3d. Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/160786/336485.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Citado 3 vezes nas páginas 8, 32 e 33.
- SCHULTZ, J. M. Fatigue behavior of engineering polymers. In: *Treatise on Materials Science Technology*. [s.n.], 1977. v. 10, n. B, p. 599–636. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0161916013700966>>. Citado na página 40.
- SHAH, V. Handbook of materials selection. Brea, California: John Wiley Sons, Inc., New York, p. 547–590, 2002. Disponível em: <[http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/16468/1/2014\\_JorgeRibeiroCunhaSilva.pdf](http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/16468/1/2014_JorgeRibeiroCunhaSilva.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 43.
- SHIGLEY, J. E. Projeto de engenharia mecânica. In: . São Paulo: Bookman, 2005. (7). Citado 2 vezes nas páginas 33 e 38.
- SILVA, C. M. D. Elaboração de uma linha de extrusão para reciclagem de polímeros (abs e pla). Projeto apresentado no 17º Congresso Nacional de Iniciação Científica - CONIC/SEMESP, 2017. Disponível em: <<http://conic-semesp.org.br/anais/files/2017/trabalho-1000024063.pdf>>. Citado na página 28.
- SILVA, J. R. C. Dissertação de mestrado: Método de concepção de articulações flexíveis em impressoras 3d. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica - Universidade de Brasília Faculdade Gama, 2014. Disponível em: <[http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/16468/1/2014\\_JorgeRibeiroCunhaSilva.pdf](http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/16468/1/2014_JorgeRibeiroCunhaSilva.pdf)>. Citado na página 38.
- SIQUEIRA, M. I. N. Injeção e extrusão. Departamento de Engenharia Química – UNIVILLE, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 29.
- SOUZA, E. D. Análise do efeito da tensão média sobre a resistência à fadiga do aço astm a743 ca6nm. 2016. Disponível em: <[http://www.bdm.unb.br/bitstream/10483/2829/1/Erich\\_0581267\\_PG2.pdf](http://www.bdm.unb.br/bitstream/10483/2829/1/Erich_0581267_PG2.pdf)>. Citado 5 vezes nas páginas 8, 38, 59, 100 e 106.
- SOUZA, G. P. S. Estudo da influência da temperatura e da frequência do carregamento no comportamento da fadiga em flexão de um polipropileno. Dissertação apresentada ao

Programa de Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação da Universidade Federal de São João del-Rei, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 26.

SURESH, S. Fatigue of materials. 2018. Citado na página 38.

USP. Comportamento mecânico dos materiais - parte 1. Disciplina de Introdução à Ciência dos Materiais para Engenharia - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2017. Disponível em: <[http://sites.poli.usp.br/d/pmt2100/Aula07\\_2005.pdf](http://sites.poli.usp.br/d/pmt2100/Aula07_2005.pdf)>. Citado 3 vezes nas páginas 9, 54 e 55.

ZIEMIAN C.; SHARMA, M. Z. S. Anisotropic mechanical properties of abs parts fabricated by fused deposition modelling. In: . Mechanical Engineering, Dr. Murat Gokcek (Ed.): InTech, 2017. p. 159–180. ISBN 978-953-51-0505-3. Disponível em: <[http://cdn.intechopen.com/pdfs/35261/InTech-Anisotropic\\_mechanical\\_properties\\_of\\_abs\\_parts\\_fabricated\\_by\\_fused\\_deposition\\_modelling.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/35261/InTech-Anisotropic_mechanical_properties_of_abs_parts_fabricated_by_fused_deposition_modelling.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 32.

# Apêndices

# APÊNDICE A – Fichas dos Testes de Fadiga Axial

	Ensaio Estático		Setup Ensaio de Fadiga											Resultado			
			$\sigma$ (MPa)					Força (N)								Ciclos	Observações
			Resistência à Tração	$\sigma_u$	$\sigma_m$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_a$	Fm	Fmax	Fmin	Fa					
CP	R	%															
CPES	7	0,1	0,9	24,97	12,36	22,47	2,25	10,11	536,37	975,22	97,52	438,85	4896	Ok			
CPES	8	0,1	0,9	24,97	12,36	22,47	2,25	10,11	536,37	975,22	97,52	438,85	4136	Ok			
CPES	9	0,1	0,9	24,97	12,36	22,47	2,25	10,11	536,37	975,22	97,52	438,85	5554	Ok			
CPES	10	0,1	0,8	24,97	10,99	19,98	2,00	8,99	476,77	866,86	86,69	390,09	10244	Ok			
CPES	12	0,1	0,8	24,97	10,99	19,98	2,00	8,99	476,77	866,86	86,69	390,09	14894	Ok			
CPES	43	0,1	0,8	24,97	10,99	19,98	2,00	8,99	476,77	866,86	86,69	390,09	13857	Ok			
CPES	15	0,1	0,7	24,97	9,61	17,48	1,75	7,87	417,18	758,50	75,85	341,33	23238	Ok			
CPES	16	0,1	0,7	24,97	9,61	17,48	1,75	7,87	417,18	758,50	75,85	341,33	26150	Ok			
CPES	18	0,1	0,7	24,97	9,61	17,48	1,75	7,87	417,18	758,50	75,85	341,33	20154	Ok			
CPES	14	0,1	0,5	24,97	6,87	12,49	1,25	5,62	297,98	541,79	54,18	243,80	308052	Ok			
CPES	41	0,1	0,5	24,97	6,87	12,49	1,25	5,62	297,98	541,79	54,18	243,80	315819	Ok			
CPES	65	0,1	0,5	24,97	6,87	12,49	1,25	5,62	297,98	541,79	54,18	243,80	368134	Ok			

Figura 58 – Ficha do teste de fadiga de R=0,1 para CPES

		Ensaio Estático		Setup Ensaio de Fadiga										Resultado	
		Resistência à Tração		$\sigma$ (MPa)					Força (N)					Observações	
CP	R	%	$\sigma_u$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_a$	Fm	Fmax	Fmin	Fa	Ciclos	Resultado			
CPI3DL	2	0,1	0,9	23,24	11,5	20,92	2,0916	9,41	491,64	893,898	89,39	402,25	2655	Ok	
CPI3DL	19	0,1	0,9	23,24	11,5	20,92	2,0916	9,41	491,64	893,898	89,39	402,25	2669	Ok	
CPI3DL	44	0,1	0,9	23,24	11,5	20,92	2,0916	9,41	491,64	893,898	89,39	402,25	2266	Ok	
CPI3DL	21	0,1	0,8	23,24	10,23	18,59	1,8592	8,37	437,02	794,576	79,458	357,56	4618	Ok	
CPI3DL	22	0,1	0,8	23,24	10,23	18,59	1,8592	8,37	437,02	794,576	79,458	357,56	6994	Ok	
CPI3DL	46	0,1	0,8	23,24	10,23	18,59	1,8592	8,37	437,02	794,576	79,458	357,56	4429	Ok	
CPI3DL	35	0,1	0,7	23,24	8,947	16,27	1,6268	7,32	382,39	695,254	69,525	312,86	7978	Ok	
CPI3DL	36	0,1	0,7	23,24	8,947	16,27	1,6268	7,32	382,39	695,254	69,525	312,86	7101	Ok	
CPI3DL	48	0,1	0,7	23,24	8,947	16,27	1,6268	7,32	382,39	695,254	69,525	312,86	13531	Ok	
CPI3DL	4	0,1	0,6	23,24	7,669	13,94	1,3944	6,27	327,76	595,932	59,593	268,17	21211	Ok	
CPI3DL	6	0,1	0,6	23,24	7,669	13,94	1,3944	6,27	327,76	595,932	59,593	268,17	24043	Ok	
CPI3DL	49	0,1	0,6	23,24	7,669	13,94	1,3944	6,27	327,76	595,932	59,593	268,17	17350	Ok	
CPI3DL	39	0,1	0,5	23,24	6,391	11,62	1,162	5,23	273,14	496,61	49,661	223,47	43272	Ok	
CPI3DL	40	0,1	0,5	23,24	6,391	11,62	1,162	5,23	273,14	496,61	49,661	223,47	37490	Ok	
CPI3DL	50	0,1	0,5	23,24	6,391	11,62	1,162	5,23	273,14	496,61	49,661	223,47	40343	Ok	

Figura 59 – Ficha do teste de fadiga de R=0,1 para CPI3DL



	Ensaio Estático			Setup Ensaio de Fadiga										Resultado	
	CP	R	%	Resistência à Tração			$\sigma$ (MPa)			Força (N)				Ciclos	Observações
				$\sigma_u$	$\sigma_m$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_a$	Fm	Fmax	Fmin	Fa			
CPIECO 25	0,1	0,9		30,9252	15,31	27,83	2,78327	12,5	669,34	1216,98	121,7	547,64	1006	Ok	
CPIECO 26	0,1	0,9		30,9252	15,31	27,83	2,78327	12,5	669,34	1216,98	121,7	547,64	762	Ok	
CPIECO 27	0,1	0,9		30,9252	15,31	27,83	2,78327	12,5	669,34	1216,98	121,7	547,64	1172	Ok	
CPIECO 28	0,1	0,8		30,9252	13,61	24,74	2,47402	11,1	594,97	1081,76	108,18	486,79	2078	Ok	
CPIECO 29	0,1	0,8		30,9252	13,61	24,74	2,47402	11,1	594,97	1081,76	108,18	486,79	1861	Ok	
CPIECO 30	0,1	0,8		30,9252	13,61	24,74	2,47402	11,1	594,97	1081,76	108,18	486,79	1859	Ok	
CPIECO 31	0,1	0,7		30,9252	11,91	21,65	2,16476	9,74	520,6	946,543	94,654	425,94	3002	Ok	
CPIECO 32	0,1	0,7		30,9252	11,91	21,65	2,16476	9,74	520,6	946,543	94,654	425,94	3134	Ok	
CPIECO 33	0,1	0,7		30,9252	11,91	21,65	2,16476	9,74	520,6	946,543	94,654	425,94	4147	Ok	
CPIECO 34	0,1	0,5		30,9252	8,504	15,46	1,54626	6,96	371,86	676,102	67,61	304,25	16341	Ok	
CPIECO 51	0,1	0,5		30,9252	8,504	15,46	1,54626	6,96	371,86	676,102	67,61	304,25	11060	Ok	
CPIECO 53	0,1	0,5		30,9252	8,504	15,46	1,54626	6,96	371,86	676,102	67,61	304,25	25582	Ok	

Figura 60 – Ficha do teste de fadiga de R=0,1 para CPIECO

	Ensaio Estático		Setup Ensaio de Fadiga													Resultado	
			$\sigma$ (MPa)						Força (N)								
			Resistência à Tração	$\sigma_u$	%	R	CP	$\sigma_{max}$	$\sigma_m$	$\sigma_{min}$	$\sigma_a$	Fm	Fmax	Fmin	Fa		
CPES	55	0,3	0,9	24,97	14,61	22,47	6,74	7,87	633,89	975,22	292,56	341,33	13091	Ok			
CPES	56	0,3	0,9	24,97	14,61	22,47	6,74	7,87	633,89	975,22	292,56	341,33	15129	Ok			
CPES	57	0,3	0,9	24,97	14,61	22,47	6,74	7,87	633,89	975,22	292,56	341,33	9174	Ok			
CPES	59	0,3	0,8	24,97	12,98	19,98	5,99	6,99	563,46	866,86	260,06	303,40	34752	Ok			
CPES	60	0,3	0,8	24,97	12,98	19,98	5,99	6,99	563,46	866,86	260,06	303,40	26527	Ok			
CPES	61	0,3	0,8	24,97	12,98	19,98	5,99	6,99	563,46	866,86	260,06	303,40	29824	Ok			
CPES	66	0,3	0,7	24,97	11,36	17,48	5,24	6,12	493,03	758,50	227,55	265,48	50151	Ok			
CPES	70	0,3	0,7	24,97	11,36	17,48	5,24	6,12	493,03	758,50	227,55	265,48	53078	Ok			
CPES	71	0,3	0,7	24,97	11,36	17,48	5,24	6,12	493,03	758,50	227,55	265,48	64090	Ok			
CPES	79	0,3	0,6	24,97	9,74	14,98	4,49	5,24	422,59	650,14	195,04	227,55	161195	Ok			
CPES	92	0,3	0,6	24,97	9,74	14,98	4,49	5,24	422,59	650,14	195,04	227,55	141701	Ok			
CPES	99	0,3	0,6	24,97	9,74	14,98	4,49	5,24	422,59	650,14	195,04	227,55	127290	Ok			

Figura 61 – Ficha do teste de fadiga de R=0,3 para CPES

	Ensaio Estático		Setup Ensaio de Fadiga														Resultado	
			$\sigma$ (MPa)							Força (N)								
			Resistência à Tração	$\sigma_u$	%	R	CP	$\sigma_{max}$	$\sigma_m$	$\sigma_{min}$	$\sigma_a$	Fm	Fmax	Fmin	Fa	Ciclos		
CPI3DL	62	0,3	0,9	23,24	13,6	20,92	6,2748	7,32	581,03	893,898	268,17	312,86	6016	Ok				
CPI3DL	63	0,3	0,9	23,24	13,6	20,92	6,2748	7,32	581,03	893,898	268,17	312,86	4673	Ok				
CPI3DL	64	0,3	0,9	23,24	13,6	20,92	6,2748	7,32	581,03	893,898	268,17	312,86	7546	Ok				
CPI3DL	82	0,3	0,8	23,24	12,08	18,59	5,5776	6,51	516,47	794,576	238,37	278,1	13732	Ok				
CPI3DL	83	0,3	0,8	23,24	12,08	18,59	5,5776	6,51	516,47	794,576	238,37	278,1	12366	Ok				
CPI3DL	84	0,3	0,8	23,24	12,08	18,59	5,5776	6,51	516,47	794,576	238,37	278,1	13100	Ok				
CPI3DL	85	0,3	0,7	23,24	10,57	16,27	4,8804	5,69	451,91	695,254	208,58	243,34	23133	Ok				
CPI3DL	86	0,3	0,7	23,24	10,57	16,27	4,8804	5,69	451,91	695,254	208,58	243,34	25678	Ok				
CPI3DL	87	0,3	0,7	23,24	10,57	16,27	4,8804	5,69	451,91	695,254	208,58	243,34	29353	Ok				
CPI3DL	89	0,3	0,6	23,24	9,064	13,94	4,1832	4,88	387,36	595,932	178,78	208,58	51618	Ok				
CPI3DL	90	0,3	0,6	23,24	9,064	13,94	4,1832	4,88	387,36	595,932	178,78	208,58	65861	Ok				
CPI3DL	91	0,3	0,6	23,24	9,064	13,94	4,1832	4,88	387,36	595,932	178,78	208,58	37505	Ok				

Figura 62 – Ficha do teste de fadiga de R=0,3 para CPI3DL

	Ensaio Estático		Setup Ensaio de Fadiga													Resultado	
			$\sigma$ (MPa)						Força (N)								
			$\sigma_u$	$\sigma_m$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_a$	Fm	Fmax	Fmin	Fa	Ciclos	Observações				
	CP	R	%														
				Resistência à Tração													
CPIECO	67	0,3	0,9	30,9252	18,09	27,83	8,3498	9,74	791,04	1216,98	365,1	425,94	2357	Ok			
CPIECO	68	0,3	0,9	30,9252	18,09	27,83	8,3498	9,74	791,04	1216,98	365,1	425,94	3080	Ok			
CPIECO	72	0,3	0,9	30,9252	18,09	27,83	8,3498	9,74	791,04	1216,98	365,1	425,94	2298	Ok			
CPIECO	74	0,3	0,8	30,9252	16,08	24,74	7,42205	8,66	703,15	1081,76	324,53	378,62	4026	Ok			
CPIECO	76	0,3	0,8	30,9252	16,08	24,74	7,42205	8,66	703,15	1081,76	324,53	378,62	4268	Ok			
CPIECO	77	0,3	0,8	30,9252	16,08	24,74	7,42205	8,66	703,15	1081,76	324,53	378,62	4009	Ok			
CPIECO	93	0,3	0,7	30,9252	14,07	21,65	6,49429	7,58	615,25	946,543	283,96	331,29	6480	Ok			
CPIECO	94	0,3	0,7	30,9252	14,07	21,65	6,49429	7,58	615,25	946,543	283,96	331,29	7029	Ok			
CPIECO	95	0,3	0,7	30,9252	14,07	21,65	6,49429	7,58	615,25	946,543	283,96	331,29	5218	Ok			
CPIECO	78	0,3	0,5	30,9252	10,05	15,46	4,63878	5,41	439,47	676,102	202,83	236,64	35670	Ok			
CPIECO	80	0,3	0,5	30,9252	10,05	15,46	4,63878	5,41	439,47	676,102	202,83	236,64	33738	Ok			
CPIECO	81	0,3	0,5	30,9252	10,05	15,46	4,63878	5,41	439,47	676,102	202,83	236,64	31278	Ok			

Figura 63 – Ficha do teste de fadiga de R=0,3 para CPIECO

# APÊNDICE B – Tutorial para MTS Landmark

Este tutorial tem por objetivo explicar de maneira resumida a operação e configuração de ensaios na máquina MTS Landmark. Lembre-se de utilizar os equipamentos de proteção individual, tais como protetor auricular e óculos de proteção.

É altamente recomendável a execução dos passos desse tutorial sob supervisão e orientação do técnico responsável de laboratório de ensaios ou profissional qualificado.

Escolha e substitua o tipo de mordente ou garra desejado antes de ligar o equipamento.

## B.1 Apresentação do Equipamento

O equipamento possui uma célula de carga de 5 kN. Desta forma, apresenta melhor resolução em fundo de escala para confiança dos ensaios com cargas reduzidas.

O funcionamento da máquina e a programação dos ensaios é realizada por um computador, que é ligado a um sistema de bomba hidráulica que comanda um atuador hidráulico [64](#).

A célula de carga envia para o computador informações sobre a força que está sendo exercida no corpo de prova. Ressalta-se que o atuador hidráulico possui um sensor de deslocamento que envia tais informações ao computador ([SOUZA, 2016](#)).

Existe a possibilidade de se acoplar ao corpo de prova um *strain gauge* ou extensômetro para medir o alongamento do CP durante execução de algum teste e enviar leituras ao computador para o cálculo da deformação do mesmo.

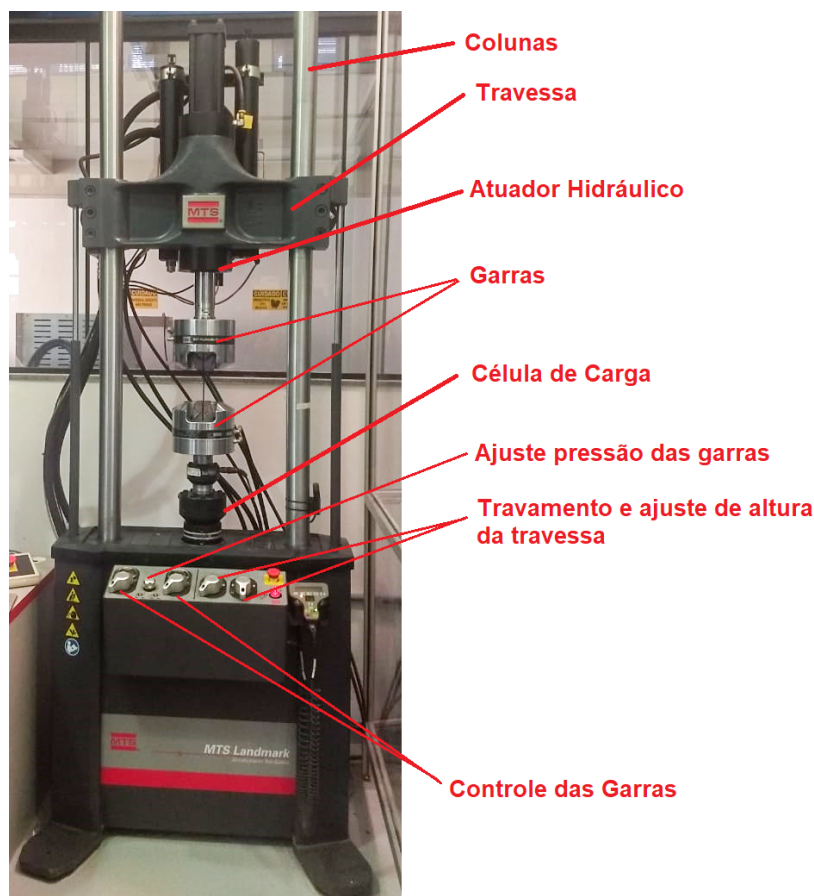
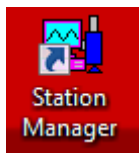


Figura 64 – Equipamento de ensaio MTS Landmark

## B.2 Preparando a estação

Deve-se ligar o computador de controle da MTS e o computador de usuário. Após o carregamento do sistema operacional, realizar login na máquina e abertura do programa chamado *MTS Station Manager*.

Figura 65 – Ícone do programa *MTS Station Manager*

### B.2.1 Definição dos parâmetros da estação

Para o arquivo *UnbStrain.cfg* tem-se a máquina pré-ajustada para uso em conjunto com o extensômetro.

Para o arquivo *Default* tem-se a máquina pré-ajustada para uso sem o extensômetro.

Sempre seleccionar parâmetro para célula de carga de 5 kN, conforme Fig. 66

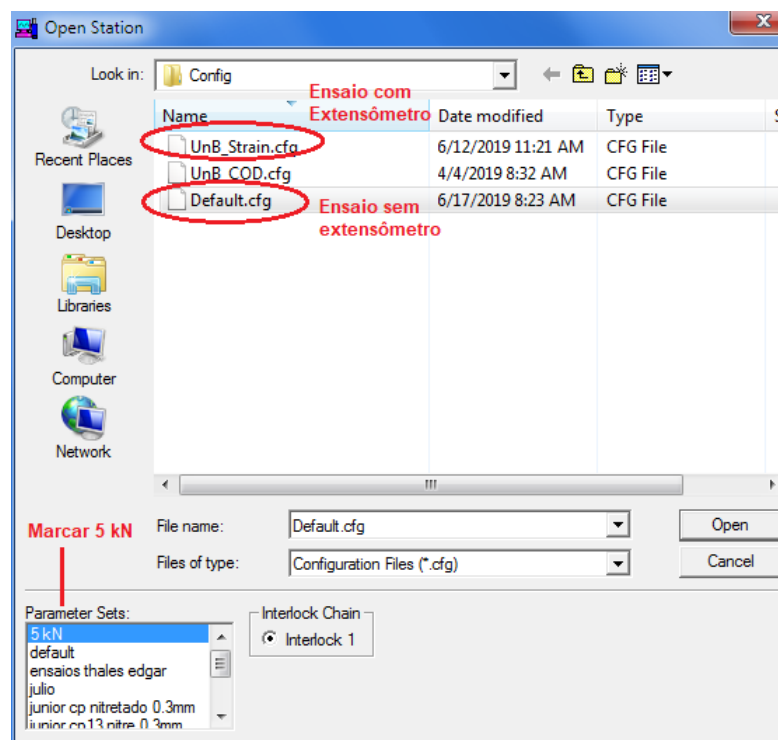


Figura 66 – Escolha dos parâmetro da máquina MTS

Na janela *Station Manager*, navegar pela aba *Applications* e seleccionar a opção *Basic TestWare*, conforme a Fig. 67

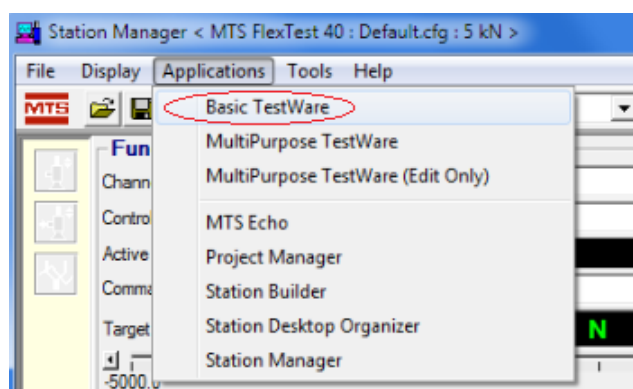


Figura 67 – Ajuste do programa para *Basic TestWare*

## B.2.2 Conhecendo controles da estação

Em seguida, pode-se abrir os controles de estação, conforme a figura 68. Abaixo de *Basic TestWare* existem os botões de iniciar teste (em verde), pausar teste (em amarelo) e parar teste (em vermelho).

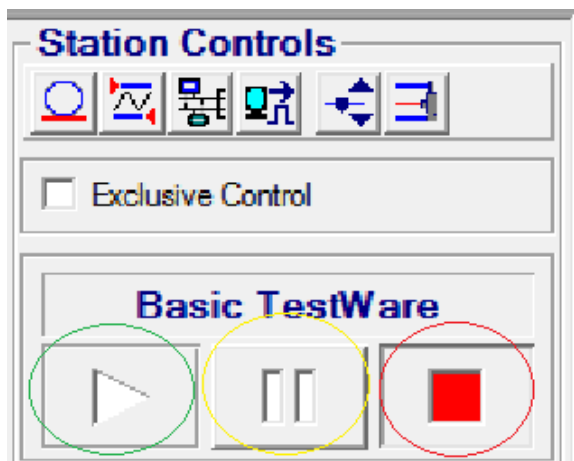


Figura 68 – Controles da Estação

Adiante, selecionando a opção *Signal Auto Offset*, uma nova janela é aberta e pode-se ajustar o zero de escala para o deslocamento e força da máquina (Fig. 69).

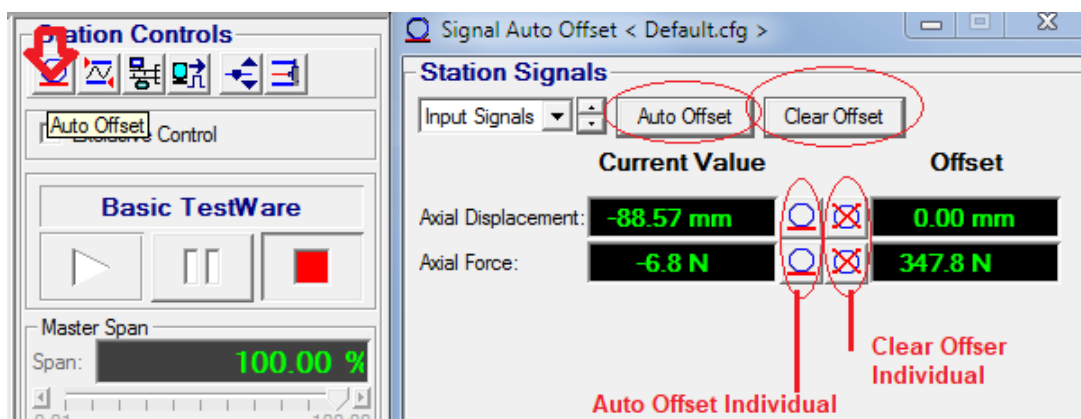


Figura 69 – Ajuste de offset

A próxima opção será dos *Detectors* (Limites). Uma nova janela será aberta. Ajustar os limites superior e inferior para força e deslocamento. Lembrar da capacidade de carga de até 5 kN do equipamento e dos limites extensão do atuador hidráulico da máquina (Fig.70).

Por isso, adotar valores conservadores, como inferior de -70 mm e + 70 mm para deslocamento, e força (superior e inferior) com base no tipo de teste, material e célula de carga da máquina. Se for utilizado a opção de extensômetro, será possível controlar os limites deste (verificar especificação).

A ação recomendada é a *Program Stop Interlock*, pois caso algum desses limites seja atingido, a máquina irá interromper o teste. Existem outras opções que podem ser utilizadas de acordo com o tipo de teste desejado, como pausar o teste e outros.



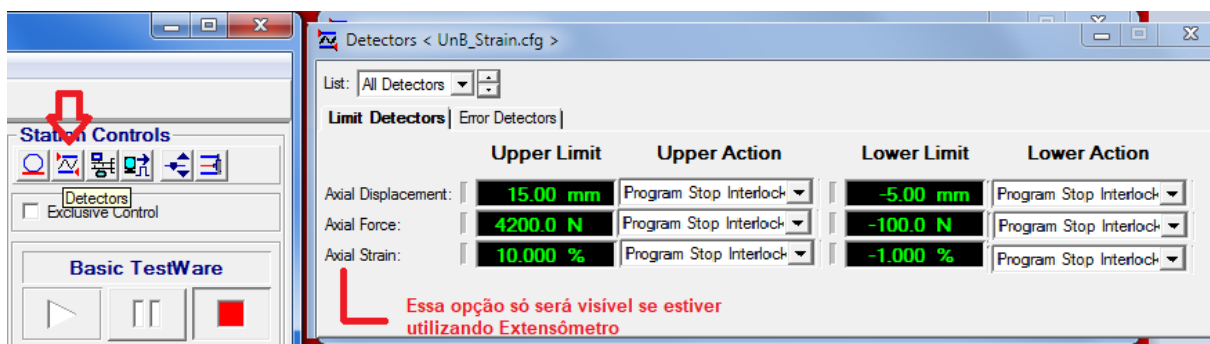


Figura 70 – Ajuste de limites

A próxima opção será do *Manual Command* (Comando Manual). Uma nova janela será aberta. A opção *Control Mode* combinada com a opção *Enable Manual Command* permite movimentar de forma manual o atuador hidráulico para cima e para baixo (alterar valores com cuidado para não comandar e colidir atuador com a cabeça das garras (Fig.70). Além disso é possível tensionar ou comprimir o corpo de prova inserindo uma tensão qualquer.

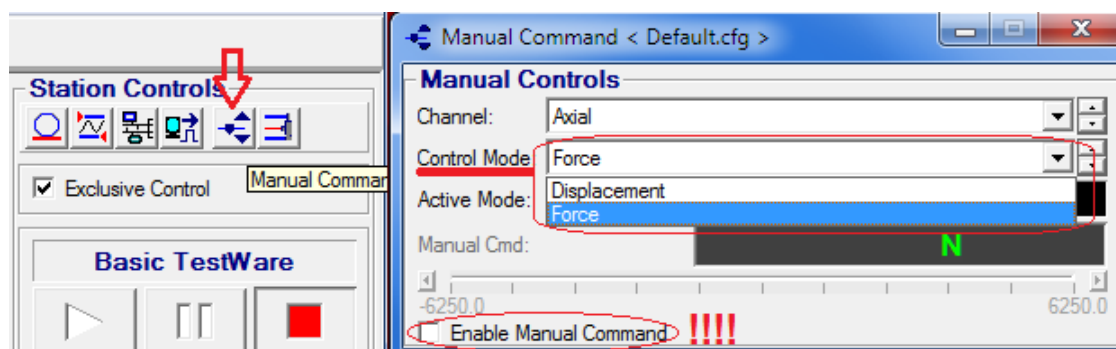


Figura 71 – Comando Manual

Assim, necessita-se habilitar o *Scope* (Gráfico) e *Meters*, conforme demonstrado na Fig. 72

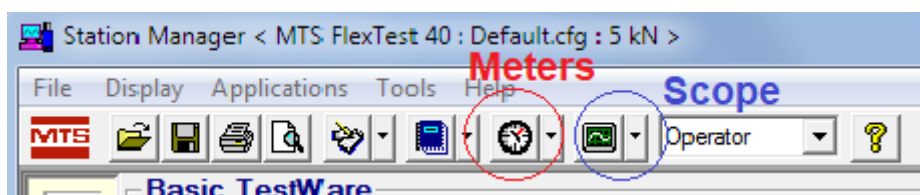


Figura 72 – Botão para abrir *Scope* e *Meters*

Pela Fig. 73 pode-se visualizar opções de *Meters* que podem ser adicionadas. Dentre elas opções para melhor exibição instantânea e visualização pelo usuário. São elas

*Axial Force*, *Axial Force Command*, *Axial Count* e *Axial Strain*. Os botões de organização, adicionar e reiniciar são úteis para melhor ajuste e preferência.

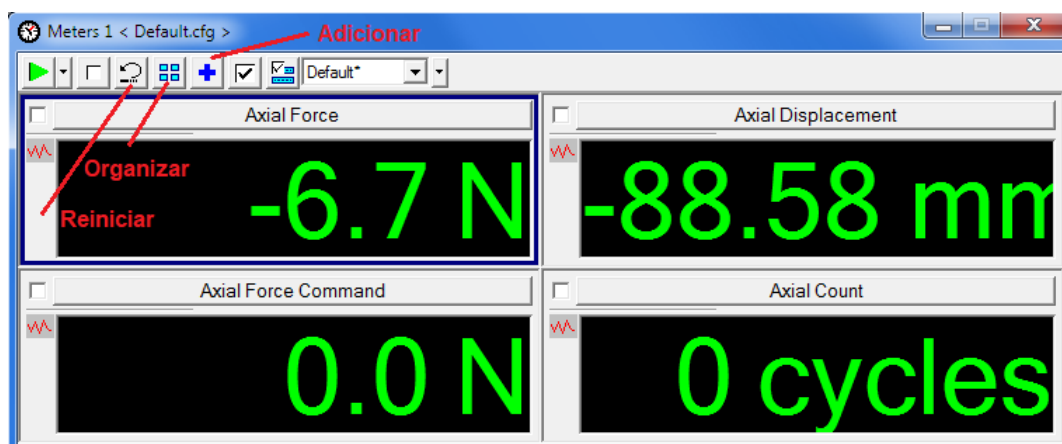


Figura 73 – Janela de exibição de *Meters*

Por último, a opção de gráficos são muito úteis para visualização do andamento do ensaio. Diversas opções são possíveis, como Força por Deslocamento, modos de plotagem e outros. Recomenda-se para ensaios de tração: Força por Deslocamento ou Forção por Deformação. Para os ensaios de Fadiga pode ser realizado utilizando para o eixo Y escala no tempo e nos eixos verticais Força Comandada e Força Instantânea (Fig. 74).

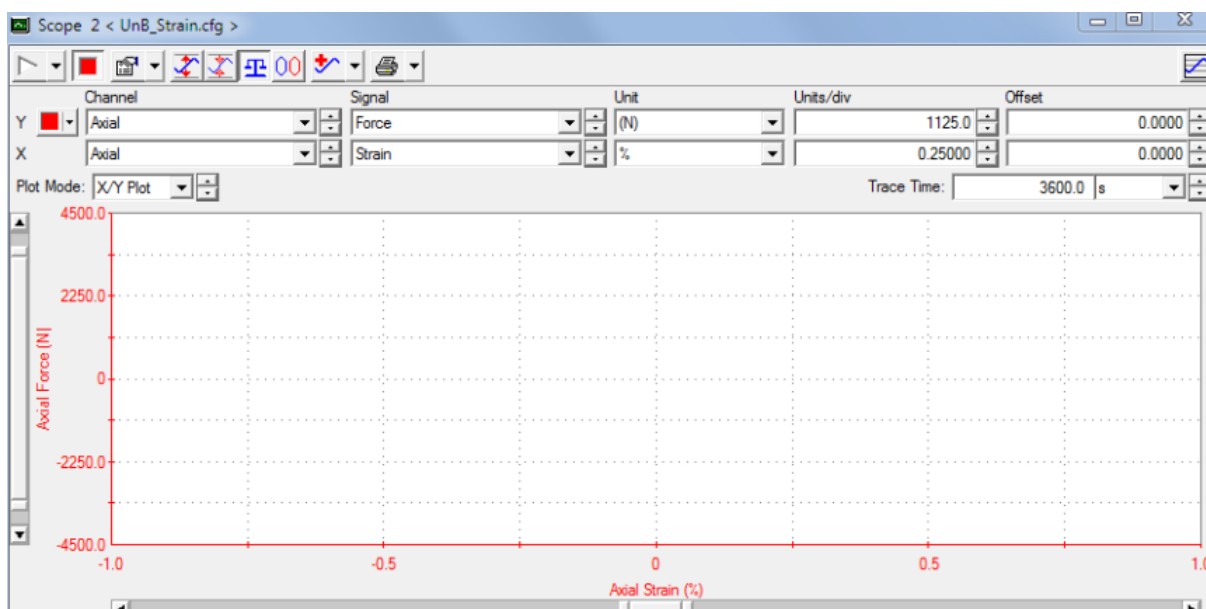


Figura 74 – Janela de exibição de gráficos de ensaio

A máquina possui também comandos que podem ser realizados através manualmente pelo painel físico, sejam eles: elevação da travessa para o encaixe do corpo

de prova, a abertura e o fechamento das garras e a escolha da pressão de agarramento (SOUZA, 2016).



Figura 75 – Painel físico de comandos da máquina MTS

Segundo a Fig. 75, o instrumento marcado com o número 1 representa a indicação da pressão da garra superior, bem como controle de abertura e fechamento do mesmo. O dispositivo marcado com número 2 representa o controle de pressão de agarramento do corpo de prova para as garras superior e inferior. O instrumento de número 3 representa a indicação da pressão da garra inferior, bem como controle de abertura e fechamento do mesmo.

Para os dispositivos 4 e 5, são de controle de desbloqueio e movimentação da travessa. O botão em 6 é utilizado para parada de emergência.

### B.3 Configuração para Ensaio de Tração ou Compressão

Procurar e selecionar a opção *Test Setup* conforme a Fig. 76.

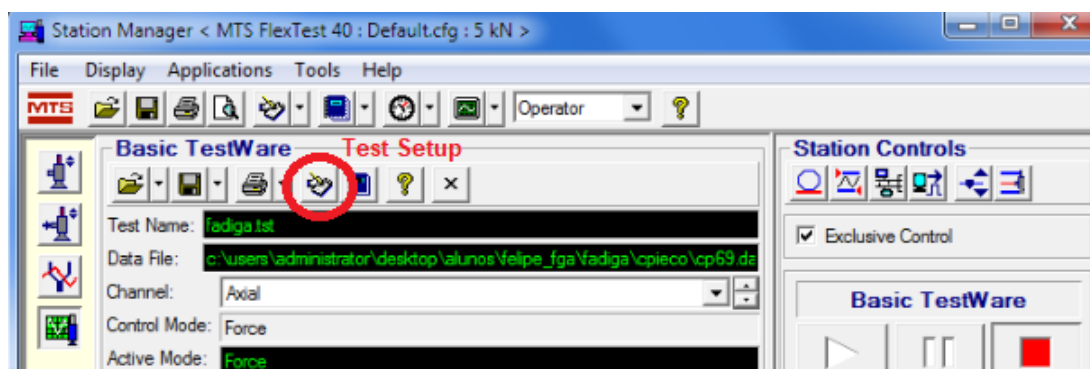


Figura 76 – Abertura da opção *Test Setup*

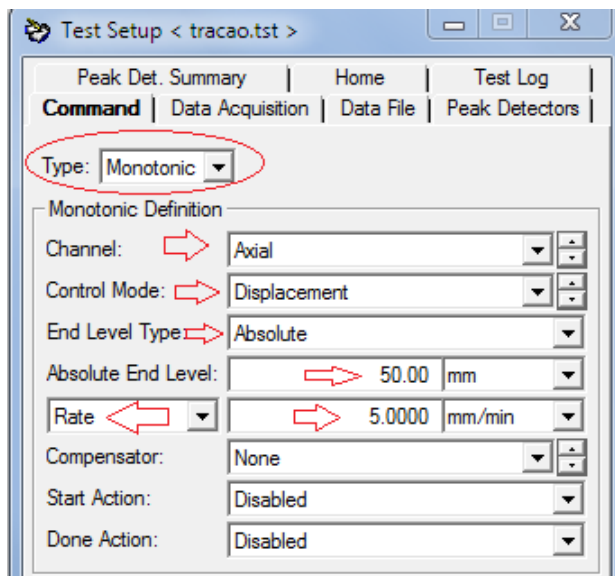


Figura 77 – Configuração da aba *Command* para teste de tração

Conforme a Fig. 77, na aba *Command* selecionar o *Type* (Tipo de teste) para *Monotonic* (Monotônico), *Control Mode* (Modo de controle) por *Displacement* (Deslocamento). Selecionar um limite de segurança para deslocamento, de acordo com teste e tipo de material na opção *Absolute End Level*

Navegando pela aba *Data Acquisition* (Fig. 78, selecionar dentre os tipos de sinais disponíveis, os que serão necessários obter no log de teste. Por padrão *Axial Force*, *Axial Displacement* e *Time*. Se for necessário utilizar Extensômetro, incluir *Axial Strain* também. A opção *Sample Rate* determina a quantidade de dados que serão gravados por segundo. Ajustar conforme necessidade.

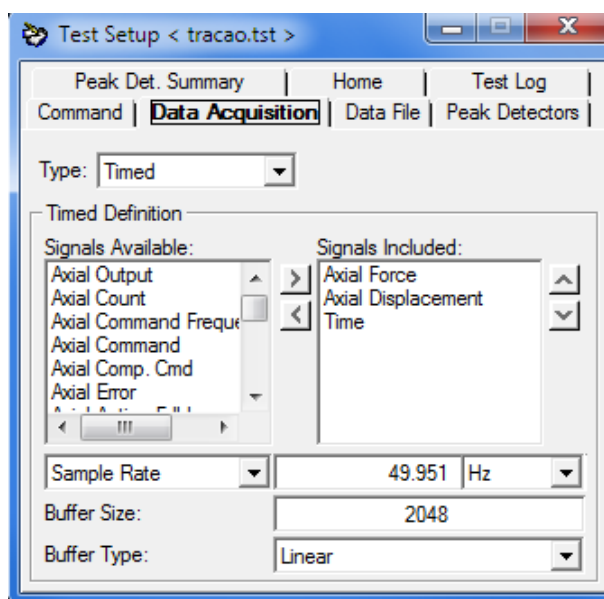


Figura 78 – Configuração da aba *Data Acquisition*

Adiante, selecione a aba *Data file* (Fig. 79) Neste local, deverá ser indicado o diretório, seguido de nome do arquivo para gravação do registro do ensaio. As opções *Data File Mode* e *Data File Format* mudam a forma organização e gravação dos dados. Recomenda-se utilizar *Append* e *Plain* para gerar arquivos de texto simples e de fácil exportação.

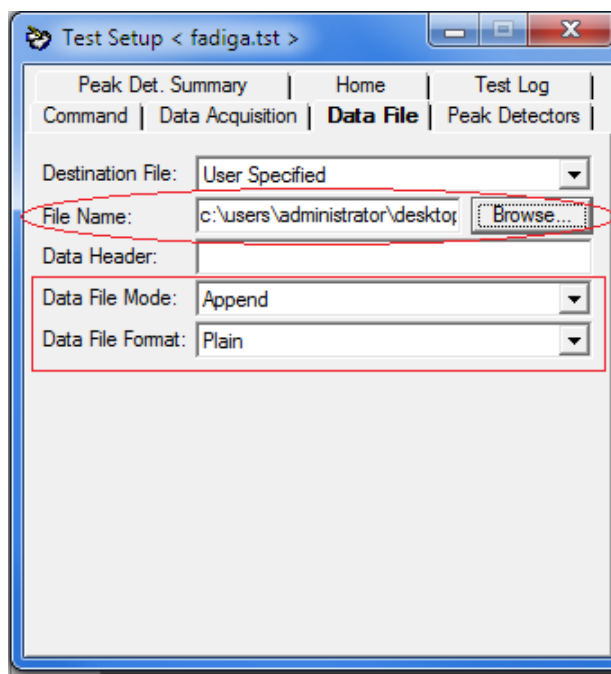


Figura 79 – Configuração da aba *Data File*

Fechar a janela *Test Setup*.

## B.4 Configuração para Ensaio Fadiga Axial

Procurar e selecionar a opção *Test Setup* conforme a Fig. 80.

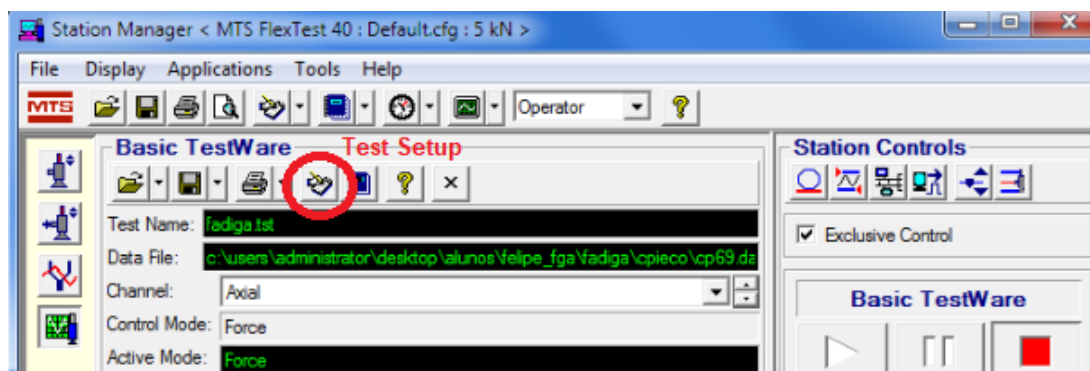


Figura 80 – Abertura da opção *Test Setup*

Conforme a Fig. 81, na aba *Command* selecionar o *Type* (Tipo de teste) para *Cyclic* (Cíclico), *Control Mode* (Modo de controle) por *Force* (Força) ou *Displacement*

(Deslocamento). A opção *Target Setpoint* nada mais é que a tensão média alvo para o teste. Em *Amplitude* isere-se a amplitude da forma de onda desejada, a opção *Wave Shape* seleciona o tipo de onda de interesse. As demais opções por default podem ser deixadas como na imagem ou modificadas se desejado.

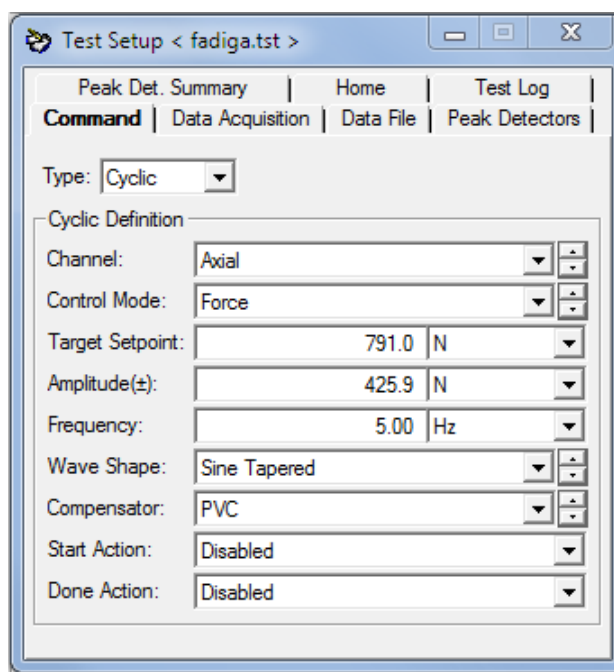


Figura 81 – Configuração da aba *Command* para teste de fadiga

Navegando pela aba *Data Acquisition* (Fig. 82), selecionar dentre os tipos de sinais disponíveis, os que serão necessários obter no log de teste. Por padrão *Axial Force*, *Axial Displacement* e *Time*.

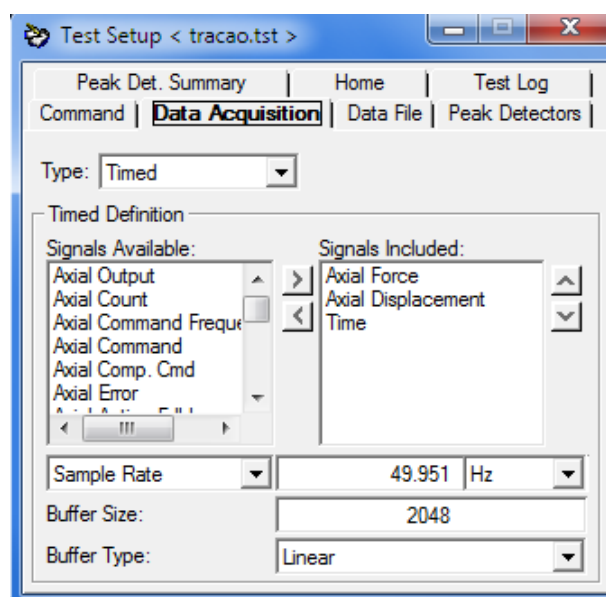


Figura 82 – Configuração da aba *Data Acquisition*

Adiante, selecione a aba *Data file* (Fig. 83 Neste local, deverá ser indicado o diretório, seguido de nome do arquivo para gravação do registro do ensaio. As opções *Data File Mode* e *Data File Format* mudam a forma organização e gravação dos dados. Recomenda-se utilizar *Append / Plain* para gerar arquivos de texto simples e de fácil exportação.

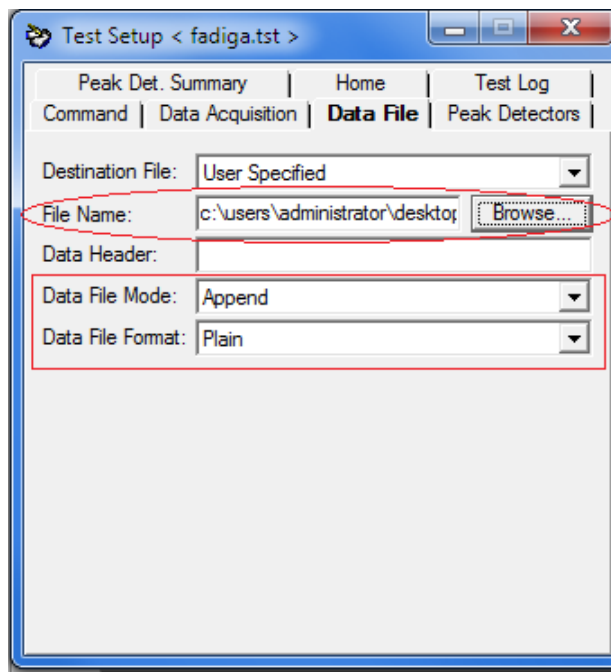


Figura 83 – Configuração da aba *Data File*

Fechar a janela *Test Setup*.

## B.5 Ligando a estação de ensaios

Nesse passo, o tipo de teste já deverá estar configurado. Assim, pode-se iniciar o procedimento de acionamento do sistema hidráulico da máquina.

Marcar a opção *Exclusive Control* (Controle Exclusivo) na janela principal, conforme Fig. 84. Isso habilitará o acionamento fonte hidráulica HPU e controle HSM.

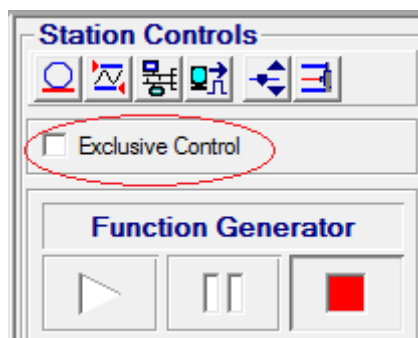


Figura 84 – Habilitar opção *Exclusive Control*

Atenção! Para ligar o conjunto HPU e HSM, deverá ser obedecido procedimento e ordem para acionamento. Primeiro clicar na opção de *Power Low* da HPU, conforme Fig. 85.

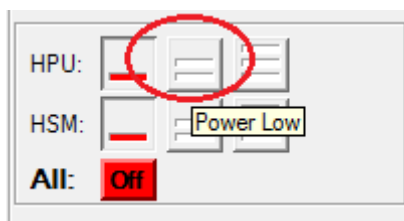


Figura 85 – Acionamento *Power Low* da HPU

Esta piscará alguns segundos até fixar na cor amarela, em seguida poderá ser ativada a opção *Power High*. O botão ficará verde imediatamente após sua ativação (Fig. 86).

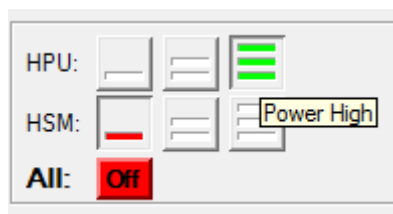


Figura 86 – Acionamento *Power High* da HPU

Em seguida, poderá ser ativado a opção *Power Low* da HSM. Está ficará na cor amarela imediatamente após acionada (Fig. 87).



Figura 87 – Acionamento *Power Low* da HSM

Por fim, o botão *Power High* da HSM pode ser habilitado. O botão ficará verde imediatamente após sua ativação (Fig. 88).



Figura 88 – Acionamento *Power High* da HSM

## B.6 Executando os ensaios

Deve-se utilizar os comandos manuais do atuador hidráulico para posicioná-lo na posição desejada. O uso dos comando do painel físico da MTS para ajuste da travessa também é aconselhável. Verificar a pressão de agarramento adequado para o tipo de corpo de prova antes de posicionar e fechar as garras (evitando esmagamento ou deslizamento do mesmo durante execução dos ensaios).

Após posicionamento do corpo de prova e tipo de teste configurado (conforme passos anteriores), o ensaio pode ser iniciado. Os botões marcado na Fig. 89 são para: iniciar teste (em verde), pausar teste (em amarelo) e parar teste (em vermelho).



Figura 89 – Botões para iniciar, pausar ou parar os ensaios

O usuário deverá ficar atento com o ajuste e posicionamento dos sensores *Signal Auto Offset*, para as medições se iniciarem em valores adequados (Fig 69).

Se o ensaio for de fadiga axial e necessitar que o teste inicie em uma tensão média determinada, pode-se utiliza a janela de *Manual Command* (Fig 71) para carregar o corpo de prova até uma tensão média ou deslocamento desejado (deve ser feita de modo gradual).

Lembrar que o botão de iniciar o teste só funcionará após a opção *Enable Manual Command* ser desativada (Fig. 71).

Em caso de *Limits*, *Interlocks*, *Programs* ativados, verificar o erro indicado e solucionar (se não houve alguma garra ou travessa deixada desbloqueada/aberta). Poderá ser utilizado a opção *Reset/Reset Override* para remover os erros/alertas após ajustar (Fig 90).

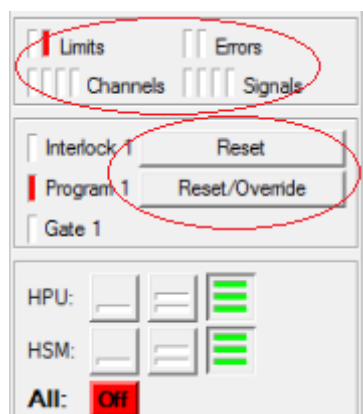


Figura 90 – Reset de erros do console MTS

Se for necessário encerrar o ensaio antes do rompimento do corpo de prova, provavelmente este estará submetido à uma carga compressiva ou de tração. Realizar o descarregamento da máquina para valor zero utilizando a janela *Manual Command* (Fig. 71).

Se o corpo de prova estiver rompido, poderá removê-lo das garras efetuando sua liberação pelo painel físico da máquina MTS.

Antes de executar um novo teste é importante alterar o caminho para um novo arquivo de log, pois se não alterado, o próximo teste poderá sobrescrever o arquivo log do teste anterior. Para realizar a alteração, deve-se ir até a janela *Test Setup* selecionando a aba *Data file* (Fig. 79)

## B.7 Desligando a estação de ensaios

O processo de desligamento deverá ser iniciado após a máquina estar com a travessa em posição de média altura. Portanto, como o atuador hidráulico fica na posição na travessa superior, este por gravidade poderá descer após desligamento da máquina, atingindo a cabeça da garra inferior, realizando força sobre a célula de carga, podendo até danificá-la.

As garras devem estar abertas e travessa bloqueada. Iniciar o desligamento da HPU E HSM na ordem inversa daquela executada no ligamento. Ou seja, começando pela HSM, indo pausadamente da posição de *Power High* para *Power Low*, seguido de *Power Off* (Fig. 91 e 92).



Figura 91 – Desligar *Power High* da HSM



Figura 92 – Desligar *Power Low* da HSM

Em seguida, realizar processo de desligamento da HPU, indo pausadamente da posição de *Power High* para *Power Low*, seguido de *Power Off* (Fig. 93 e 94).



Figura 93 – Desligar *Power High* da HPU



Figura 94 – Desligar *Power Low* da HPU

# Anexos

# ANEXO A – Dados Técnicos informados pelas Fabricantes

## A.1 CPI3DL - ABS Virgem

Propriedades Materia Prima 3D LAB - Grãos			
Propriedades	PLA	ABS Premium	PETG
Densidade	1,24 [g/cm <sup>3</sup> ]	1,04 [g/cm <sup>3</sup> ]	1,27 [g/cm <sup>3</sup> ]
Temp. Fusão	185 [°C]	220 [°C]	240 [°C]
Tg	60 [°C]	100 [°C]	85 [°C]
Tensão de Escoamento	66 [Mpa]	38 [Mpa]	51 [Mpa]
Resistencia a Flexão	130 [Mpa]	66 [Mpa]	72 [Mpa]
Modulo de Elasticidade	4350 [Mpa]	2200 [Mpa]	2120[Mpa]
Resultado ensaio de Tração segundo a Norma ASTM D 638 - Corpo de provas Impresso			
Propriedades	PLA	ABS Premium	PETG
Tensão de Escoamento	24,8 [Mpa]	14,7[Mpa]	18,6 [Mpa]
Modulo de Elasticidade	1896,0 [Mpa]	1335,9 [Mpa]	1067,9 [Mpa]
Tensão de Ruptura	46 [Mpa]	29 [Mpa]	32,6 [Mpa]
Alongamento	3,69 [%]	7,08 [%]	7,74 [%]
Resultado ensaio de Dureza segundo a Norma ASTM D 2240 - Corpo de provas Impresso			
Dureza Shore D	85 [Shore D]	74 [Shore D]	75 [Shore D]
Resultado ensaio HTD segundo a Norma ISO 75 - Corpo de provas Impresso			
Temperatura HDT	55,11°C	86,13°C	67,3 °C

Figura 95 – Dados técnicos fornecidos pela fabricante de filamentos 3DLAB para ABS e outros polímeros. Fonte: 3DLAB.

## A.2 C PIECO - ABS Reciclado



### Ficha Técnica Datasheet

Material: ABS  
Cor : Preto

#### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Propriedade	Resultado
Teor de resíduo(%)	1,11
Temperatura de degradação(°C)	418
Índice de Fluidez (g.10 min -1 )	29,238±0,031
Resistência ao impacto (KJ/m 2 )	7,071±0,209
Resistência à tração (MPa)	58,42±1,461
Deformação (%)	6,726±0,9533
Módulo de Elasticidade por tração (MPa)	26077±81,04
Resistência à flexão (MPa)	62,14±0,8705
Módulo de Elasticidade por flexão(MPa)	2175±52,69

**PrintGreen3D**

Rua dos Franceses, 124 - Morro dos Ingleses

[www.printgreen3d.com.br](http://www.printgreen3d.com.br)

Este documento contém informações de propriedade da empresa Printgreen3d Comercio de Equipamentos LTDA - ME. A divulgação desta publicação é expressamente proibida sem autorização por escrito da Printgreen3d Comercio de Equipamentos LTDA - ME. Reservamos-nos o direito de modificar esse documento sem aviso prévio.  
Copyright © 2017 Printgreen3d Comercio de Equipamentos LTDA - ME.

## A.3 CPES - Material ABS E8000



<b>FICHA TÉCNICA</b> TECHNICAL DATA SHEET	<b>ABS</b> FORNECIDO POR FORMOSA CHEMICALS & FIBRE CORPORATION, TAIWAN SUPPLIED BY FORMOSA CHEMICALS & FIBRE CORPORATION, TAIWAN	<b>AE8000</b>
--	--	---------------

**CARACTERÍSTICAS**  
CHARACTERISTICS

- Altíssimo impacto  
Super high impact
- Alta rigidez  
High rigid

**PROCESSO**  
PROCESS

- Extrusão  
Extrusion moulding

**APLICAÇÕES**  
APPLICATIONS

- Chapas  
Plates
- Produtos termoformados  
Thermoformed products
- Produtos de extrusão  
Extrusion products

PROPRIEDADES PROPERTIES	ISO			ASTM		
REOLÓGICA   RHEOLOGICAL	NORMA METHOD	UNIDADE UNIT	VALOR VALUE	NORMA METHOD	UNIDADE UNIT	VALOR VALUE
Índice de Fluidez (200°C, 5 kg) Melt flow rate (200°C, 5 Kg)	1133	g/10 min	-	D-1238	g/10 min	-
Índice de Fluidez (220°C, 10 kg) Melt flow rate (220°C, 10 Kg)	1133	g/10 min	5	D-1238	g/10 min	5
<b>MECÂNICAS   MECHANICAL</b>						
Resistência à tração na ruptura Tensile stress at break	527	MPa	43	D-638	MPa	43
Resistência à flexão Flexural strength	178	MPa	69	D-790	MPa	69
Módulo elástico por flexão Flexural modulus	178	MPa	2260	D-790	MPa	2260
Dureza Rockwell Rockwell hardness	2039/2	Escala-R	R-100	D-785	Escala-R	R-100
Resistência Impacto IZOD, entalhado (3,2 mm) IZOD impact strength, notched (3.2 mm)	R180	J/m	392	D-256	J/m	392
<b>TÉRMICAS   THERMAL</b>						
Temperatura de Amolecimento Vicat (1 kg, 50°C/h) Vicat softening point (10 N, 50°C/h)	306	°C	102	D-1525	°C	102
Temperatura de deflexão sob carga (1,8 MPa, 120°C/h) Deflection temperature under load (1.8 MPa, 120°C/h)	75/A	°C	86	D-648	°C	86
<b>FÍSICAS   GENERAL</b>						
Gravidade específica Specific gravity	1183	-	1.04	D-792	-	1.04
Resistência à chama - espessura 1,5 mm Flame behavior - thickness 1.5 mm	UL-94	classe	HB	UL-94	classe	HB

Os dados típicos anteriores são fornecidos somente para informações técnicas e podem ser mudados sem aviso prévio.  
The above typical data is supplied only for technical information and may be changed without prior notice.

Se tiver quaisquer perguntas, por favor sinta-se livre para nos contatar.  
If there are any questions, please feel free to contact us.

TEL: +886-2-2717-8405  
FAX: +886-2-2713-1649

## A.4 CPES - Material ABS E112



### Lustran E112LG

Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

TECHNICAL  
DATASHEET

#### DESCRIPTION

Lustran® E112LG resin is a low-gloss, medium-impact extrusion grade of ABS (acrylonitrile butadiene styrene). It has good melt strength for extrusion and thermoforming, and can be easily coextruded. It is easy to color with ABS color concentrates.

#### FEATURES

- Low gloss
- Medium impact
- Ease of coloring
- Good melt strength for xtrusion and thermoforming
- Easily coextruded

#### APPLICATIONS

- Motor vehicle dashboards
- Interior panels and trim
- Recreational vehicles, cars, trucks, construction vehicles, forklifts and farm equipment

Property, Test Condition	Standard	Unit	Values
<b>Mechanical Properties</b>			
Izod Notched Impact Strength, 23 °C (73 °F)	ASTM D 256	ft-lb/in	2
Izod Notched Impact Strength, -18 °C (0 °F)	ASTM D 256	ft-lb/in	1.3
Izod Notched Impact Strength, -40 °C (-40 °F)	ASTM D 256	ft-lb/in	1
Instrumented Dart Impact (total energy)	ASTM D 3763	in-lbs	264
Instrumented Dart Impact (Peak force)	ASTM D 3763	in-lbs	228
Tensile Stress at Break, 23 °C	ASTM D 638	psi	3200
Tensile Stress at Yield, 23 °C	ASTM D 638	psi	2800
Tensile Modulus	ASTM D 638	psi x 10 <sup>3</sup>	220
Flexural Modulus, 23 °C	ASTM D 790	psi x 10 <sup>3</sup>	210
Flexural Stress at 5% Deflection	ASTM D 790	psi	4500
<b>Thermal Properties</b>			
DTUL @ 264 psi - Unannealed	ASTM D 648	°F	187
DTUL @ 66 psi - Unannealed	ASTM D 648	°F	205
Coefficient of Linear Thermal Expansion	ASTM D 696	10 <sup>-4</sup> /°F	0.54
<b>Optical Properties</b>			
Specular Gloss, 60 °	ASTM D 523		< 10



## Lustran E112LG

Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

## TECHNICAL DATASHEET

Property, Test Condition	Standard	Unit	Values
<b>Other Properties</b>			
Density	ASTM D 792	lb/in <sup>3</sup>	1.06
<b>Processing</b>			
Linear Mold Shrinkage	ASTM D 955	in/in	0.004 - 0.006
Drying Temperature	-	°F	175
Drying Time	-	h	2 - 4

Typical values for uncolored products

### SUPPLY FORM

Lustran® ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) resins are available in bulk railcar, bulk truckload and 726kg box quantities.

### REGULATORY COMPLIANCE

Please refer to Styrolution web site or contact Styrolution Technical Service for further information.

### PROCESSING

To obtain an optimum balance of sheet gloss and mechanical properties, the extruder profile should be set to deliver polymers at a melt temperature between 420° and 465°F (215° and 240°C).

### PRODUCT SAFETY

Safety Data Sheets and product labels provide information concerning the health and safety precautions that must be observed when handling the Styrolution products mentioned in this publication. No adverse effects on the health of processing personnel have been observed if the products are correctly processed and the production areas are suitably ventilated. For styrene, acrylonitrile, alpha-methyl styrene, maleic anhydride and 1, 3-butadiene, the maximum allowable workplace concentrations must be observed according to current local and federal regulations. Before working with any of these products, you must read and become familiar with the available information on their hazards, proper use, and handling. This cannot be overemphasized. This information is available in safety data sheets and on product labels. If there are questions or concerns, consult your Styrolution representative or contact the Product Safety and Regulatory Affairs Department at Styrolution.