

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

## **Análise de tenacidade à fratura em ABS por impressão 3D**

Autor: André Leandro da Rosa Magalhães  
Orientador: Prof. Dr. Sergio Henrique da Silva Carneiro  
Coorientador: Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos  
Júnior

Brasília, DF  
2019





André Leandro da Rosa Magalhães

# **Análise de tenacidade à fratura em ABS por impressão 3D**

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 Júnior

Brasília, DF

2019

---

André Leandro da Rosa Magalhães

Análise de tenacidade à fratura em ABS por impressão 3D/ André Leandro da Rosa Magalhães. – Brasília, DF, 2019-

65 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Henrique da Silva Carneiro

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

1. Impressão 3D. 2. Mecânica da Fratura. I. Prof. Dr. Sergio Henrique da Silva Carneiro. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Análise de tenacidade à fratura em ABS por impressão 3D

CDU 02:141:005.6

---

André Leandro da Rosa Magalhães

## **Análise de tenacidade à fratura em ABS por impressão 3D**

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, 02 de dezembro de 2019:

---

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

---

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

---

**Prof. Dr. Artem Andrianov**  
Convidado 1

---

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

Brasília, DF  
2019



*Este trabalho é dedicado aos meus pais, às minhas irmãs e à minha namorada, por sempre acreditarem em mim.*





# Agradecimentos

À Deus pela saúde.

Aos meus orientadores, os Professores Doutores Manuel Barcelos e Sergio Henrique, pela paciência, ajuda, por todo conhecimento transmitido e por me guiar durante o desenvolvimento deste trabalho.

À minha Família por todo suporte e amor.

À minha namorada por me apoiar e motivar em todos os momentos.

Aos meus amigos por toda ajuda e solidariedade.



*“ It ain’t about how hard you hit,  
It’s about how hard you can get hit and keep moving forward,  
How much you can take and keep moving forward,  
That’s how winning is done!”  
(Rocky Balboa, 2006)*



# Resumo

A prototipagem rápida ganhou popularidade com o barateamento do processo de impressão 3D no mercado, no qual proporciona maior acessibilidade da matéria prima e fácil fabricação de peças com geometria complexa, quando comparado a processos de usinagem em outros materiais. Assim, como todo novo método de fabricação, procura-se conhecer mais sobre a influência desse processo nas propriedades mecânicas do material, como o polímero ABS. Dessa forma, este trabalho busca analisar o comportamento do ABS por FDM no ensaio de tração e principalmente no ensaio de tenacidade à fratura. Com intuito de enriquecer essa análise, a variação de parâmetros no processo de impressão, como temperatura e orientação de impressão, será realizada para verificar se há mudança nas propriedades mecânicas do material, definindo o parâmetro como influenciador ou não.

**Palavras-chaves:** FDM. ABS. Tenacidade à Fratura. Ensaio de tração.



# Abstract

Rapid prototyping has got popularity with the cheapening of 3D printing process on the market, which provides greater raw material accessibility and easier fabrication of complex geometry parts when compared to machining processes in other materials. Thus, as any new method of fabrication, we seek to know more about the influence of this process on the mechanical properties of the material, such as ABS polymer. By this way, this work seeks to analyze the behavior of ABS by FDM in the tensile test and especially in the fracture toughness test. In order to enrich this analysis, the variation of parameters in the printing process, such as temperature and printing orientation, will be performed to verify if there is a change in the mechanical properties of the material, defining the parameter as influencer or not.

**Keywords:** FDM. ABS. Fracture Toughness. Tensile Test.





# Lista de ilustrações

Figura 1 – Cabeçote extrusor de filetes. Fonte: Adaptado de (AHRENS C. H. ; SALMORIA, 2004) . . . . .	28
Figura 2 – Níveis de análise para protótipos FDM. Fonte: (BELLEHUMEUR, 2004) com adaptações . . . . .	29
Figura 3 – Forma de constituição na adesão de dois filamentos. Fonte: (SILVA, 2017)	29
Figura 4 – Exemplos de Estruturas de Enchimento com Diferentes Densidades. Fonte: (FERNANDES, 2016) . . . . .	31
Figura 5 – Monômeros do ABS. Fonte:(JÚNIOR, 2014) . . . . .	32
Figura 6 – Modos básicos de deslocamento de trincas. Fonte: adaptada de (DOWLING, 2013) com adaptações . . . . .	35
Figura 7 – Tensão normal no plano da trinca pela distância à ponta da trinca no Modo I de carregamento. Fonte: adaptado de (ANDERSON, 2005) com adaptações . . . . .	36
Figura 8 – Variação da tenacidade à fratura pela espessura da amostra para uma liga não especificada. Fonte: adaptado de (ANDERSON, 2005) com adaptações . . . . .	37
Figura 9 – Zona plástica, estado de tensão, e fratura amostral para (a) plano de tensão e (b) plano de deformação. Fonte:(DOWLING, 2013) com adaptações . . . . .	38
Figura 10 – Zona plástica em comparação com as dimensões planares (a) em situações em que o MFLE é inválido devido às zonas plástica serem muito grandes em comparação com (b) o comprimento da trinca, (c) região sem trinca e (d) altura do membro. Fonte: (DOWLING, 2013) . . . . .	39
Figura 11 – Paramêntros do corpo de prova de tração. Fonte: (ASTM D638, 2014) .	40
Figura 12 – Curva tensão-deformação típica de alguns polímeros. Fonte: (DOWLING, 2013) . . . . .	42
Figura 13 – Instron 8801. Fonte: instron.com . . . . .	42
Figura 14 – Paramêntros do corpo de prova CT. Fonte:(ASTM E399, 2012) . . . . .	43
Figura 15 – Impressoras 3D. Fonte: (TEK3D, ; TEVO, ; FLASHFORGE, ) . . . . .	46
Figura 16 – Orientação de posicionamento de impressão. Fonte: (HORST, 2017) . .	48
Figura 17 – Corpos de prova de tração. Fonte: Autoral . . . . .	49
Figura 18 – Corpo de prova (a) T1 (b) T2 após ensaio. Fonte: Autoral . . . . .	51
Figura 19 – Curva de carregamento de T1 e T2. Fonte: Autoral . . . . .	52
Figura 20 – Corpo de prova após o ensaio de tração.Fonte: Autoral . . . . .	53
Figura 21 – Curvas médias de tensão-deformação com diferentes temperaturas de impressão. Fonte: Autoral . . . . .	54

Figura 22 – Curvas médias de tensão-deformação com diferentes impressoras. Fonte: Autoral . . . . .	55
Figura 23 – Corpo de prova no ensaio de tenacidade à fratura. Fonte: Autoral . . . . .	57
Figura 24 – Curvas médias de carregamento-deformação no ensaio de tenacidade à fratura. Fonte: Autoral . . . . .	58
Figura 25 – Curvas médias de carregamento-deformação no ensaio de tenacidade à fratura com escala reduzida. Fonte: Autoral . . . . .	58
Figura 26 – Amostras de (a) 11 mm e (b) 12 mm de espessura ao término do ensaio. Fonte: Autoral . . . . .	59
Figura 27 – Curva média de carregamento-deformação no ensaio de tenacidade à fratura com orientação 0°/90°. Fonte: Autoral . . . . .	60
Figura 28 – Amostra de 9 mm de espessura e orientação interna de 0°/90° ao término do ensaio. Fonte: Autoral . . . . .	61

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Dimensões de cada componente apresentado na figura 11. . . . .	41
Tabela 2 – Propriedades da materia prima em grãos. . . . .	45
Tabela 3 – Propriedades do material impresso, segundo a norma ASTM D638. . . . .	45
Tabela 4 – Dados estipulados e recomendados para uso dos filamentos. . . . .	45
Tabela 5 – Temperatura de impressão para corpos de prova de tração. . . . .	47
Tabela 6 – Quantidade de corpos de prova com e sem êxito de impressão e de ensaio. . . . .	50
Tabela 7 – Valores escolhidos para os corpos de prova de acordo com a figura 14 . . . . .	51
Tabela 8 – Resultados do ensaio de tração para o ABS Natural e Reciclado. . . . .	54
Tabela 9 – Resultados do ensaio de tração para o ABS Natural por diferentes impres- soras 3D. . . . .	56
Tabela 10 – Resultados do ensaio de tenacidade à fratura com diferentes espessuras. . . . .	59
Tabela 11 – Resultados do ensaio de tenacidade à fratura com orientação 0°/90°. . . . .	61



# Lista de abreviaturas e siglas

AM	<i>Additive Manufacturing</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ABS	Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CT	<i>Compact Tension</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
GP3D	Green Print 3D
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
SENB	<i>Single Edge Notch Bending</i>
RP	<i>Rapid Prototyping</i>



# Lista de símbolos

$E$	Módulo de Elasticidade
$G$	Taxa de liberação de energia
$P$	Carga Axial
$K$	Fator de intensidade de tensão
$W$	Parâmetro geométrico
$B$	Espessura do corpo de prova
$R$	Razão de carregamento
$K_{Ic}$	Tenacidade à fratura
$\epsilon$	Deformação
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\sigma$	Tensão Normal
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$\theta$	Coordenada Angular
$r$	Coordenada Radial
$\gamma_s$	Energia de Coesão
$\gamma_p$	Energia de deformação plástica
$dU$	Taxa de variação decrescente da energia potencial
$a$	Comprimento da Trinca
$t$	Espessura





# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>25</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b>	<b>25</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>26</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos e Metodologia</b>	<b>26</b>
1.3.1	Objetivo Geral	26
1.3.2	Objetivo Específicos	26
<b>1.4</b>	<b>Organização do Trabalho</b>	<b>27</b>
<b>2</b>	<b>MÉTODO DE MODELAGEM E MATERIAL</b>	<b>28</b>
<b>2.1</b>	<b>Impressão 3D</b>	<b>28</b>
<b>2.2</b>	<b>Qualidade de Impressão</b>	<b>29</b>
<b>2.3</b>	<b>Processo de Impressão</b>	<b>30</b>
<b>2.4</b>	<b>Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS)</b>	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>CONCEITOS DA MECÂNICA DA FRATURA</b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE)</b>	<b>33</b>
3.1.1	Modos de Carregamento	34
3.1.2	Fator de Intensidade de Tensão, $K$	35
3.1.3	Tenacidade à Fratura	37
3.1.4	Zona Plástica	38
3.1.5	Limitações para MFLE	39
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>40</b>
<b>4.1</b>	<b>Ensaio de Tração</b>	<b>40</b>
<b>4.2</b>	<b>Ensaio de Tenacidade à Fratura</b>	<b>43</b>
<b>4.3</b>	<b>Material, Instrumentação e Método de Impressão</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>49</b>
<b>5.1</b>	<b>Impressão para o Ensaio de Tração</b>	<b>49</b>
5.1.1	Corpos de prova com diferentes temperaturas de impressão	49
5.1.2	Corpos de Prova com Impressoras Diferentes	50
5.1.3	Impressão para o Ensaio de Tenacidade à Fratura	51
<b>5.2</b>	<b>Resultados do Ensaio de Tração</b>	<b>53</b>
5.2.1	Para diferentes temperaturas de impressão	53
5.2.2	Para diferentes impressoras	55
<b>5.3</b>	<b>Resultados do Ensaio de Tenacidade</b>	<b>57</b>

<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>62</b>
<b>6.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b> . . . . .	<b>63</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>64</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

A análise de componentes estruturais sofreu um grande avanço desde a criação e desenvolvimento de diversas áreas de estudo, como campos de fadiga, mecânica da fratura, confiabilidade estrutural e análise por métodos numéricos. Esses estudos surgiram com o objetivo de prolongar e prevenir possíveis falhas estruturais. (ROSA, 2002)

O entendimento de falhas materiais e a habilidade de prever as mesmas aumentou consideravelmente desde a Segunda Guerra Mundial, e quando não são aplicados os conhecimentos já existentes, pode gerar catástrofes que impactam tanto em perda de vidas como na economia em geral. (ANDERSON, 2005)

A mecânica da fratura surgiu como uma metodologia específica para cuidar dos casos de fratura ou falhas advindas de trincas, selecionando e usando materiais e componentes de forma a minimizar a possibilidade de acidentes. (DOWLING, 2013) Ao longo de todo esse avanço, os polímeros ganharam grande importância no mercado pela ampla gama de aplicações em diversas áreas, como em estruturas aeronáuticas, principalmente pelo baixo custo e por serem leves. (PEREIRA, 2018; ANDERSON, 2005)

Existem diversos métodos de fabricação já usuais na indústria para diferentes tipos de materiais. A Protatipagem Rápida (do inglês *Rapid Prototyping*, RP), popularmente conhecida como impressão 3D, surge como um novo método de produção de peças com geometria complexa. Dentre as tecnologias de RP, a Modelagem por Deposição Fundida (do inglês *Fused Deposition Modeling*, FDM) é destinada apenas para a fabricação com compositos poliméricos. (WANG, 2017)

A impressão por FDM é um “Processo de junção de material até formar objetos 3D, progressivamente de camada em camada”, essa foi a primeira definição feita em 1986 por Charles Hull. (WANG, 2017) Em outras palavras, é um processo de fabricação por extrusão de um filamento fundido por um bico aquecido de forma controlada. Assim que o material é depositado na plataforma, esfria e solidifica, esse processo se repete de camada em camada. (SUN, 2008)

O termoplástico acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) é um dos materiais mais usados nas impressões por FDM, graças à sua baixa temperatura de fusão e excelentes propriedades de processamento. É também um polímero amorfo, no qual não há estrutura cristalina. E mesmo apresentando uma alta taxa de retração por resfriamento, comparado a outros termoplásticos como o poliácido láctico (PLA), se mostra um excelente material para impressão 3D. (AUMNATE, 2018)

A impressão 3D com polímeros vem sendo usada na indústria aeroespacial, por ser capaz de criar estruturas leves e complexas. Na arquitetura, por exemplo, é utilizada para maquetes e na área médica para impressão de tecidos ou até mesmo órgãos com o intuito de ajudar médicos no pré operatório. (WANG, 2017; ZELJKA, 2018) Além da praticidade e acessibilidade, a impressão por FDM tem ganhado atenção significativa também na indústria e na pesquisa acadêmica. (AUMNATE, 2018)

Portanto, este trabalho busca identificar o comportamento das propriedades mecânicas no ensaio de tração com mudanças gradativas em algum parâmetro de impressão como, por exemplo, a temperatura de impressão. Ademais, busca principalmente analisar propriedades de mecânica da fratura do polímero ABS por FDM, por meio de testes de tenacidade à fratura.

## 1.2 Justificativa

O barateamento e vasta concorrência de materiais e maquinário no mercado é responsável pelo grande crescimento de utilização popular de impressão 3D, fato que trás consigo a necessidade de um maior conhecimento científico do método de impressão. Este trabalho em questão, busca preencher lacunas de conhecimento sobre propriedades do material advindo por deposição fundida, com o intuito de possibilitar maiores aplicações para o mesmo.

## 1.3 Objetivos e Metodologia

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é analisar o comportamento mecânico do ABS por manufatura aditiva no ensaio de tenacidade à fratura, seguindo como base de padronização as normas da ASTM.

### 1.3.2 Objetivo Específicos

Os objetivos são descritos na seguinte ordem:

- Definir metodologia para obtenção de propriedades mecânicas.
  - No qual se propõe a comparar resultados para diferentes temperaturas do bico extrusor e para produção de corpos de prova em diferentes impressoras.
- Produzir corpos de prova por FDM.
  - Neste processo serão utilizadas impressoras e lotes de materiais diferentes.

- Caracterizar os corpos de prova impressos, pelo ensaio de tração;
  - A fim de concluir se os parâmetros pré-selecionados na metodologia influenciam ou não de forma significativa o comportamento mecânico do material.
- Definir as dimensões do corpo de prova para os ensaios do objetivo geral.
  - A partir de testes no ensaio de tenacidade à fratura com corpos de prova com diferentes dimensões, será selecionada a dimensão daquele que melhor apresentar uma curva característica do ensaio.
- Analisar a influência da orientação de impressão no ensaio de tenacidade à fratura.

## 1.4 Organização do Trabalho

- Introdução
  - Apresentação e contextualização da impressão 3D, justificativa e os objetivos que o trabalho busca atingir.
- Capítulos Bibliográficos
  - Nestes são introduzidos os conteúdos teóricos utilizados para os estudos e análises feitas no trabalho, além de uma melhor explicação do funcionamento e características da impressão 3D.
- Metodologia
  - São relatados todos os procedimentos e escolhas feitas para a realização das impressões e dos ensaios.
- Resultados e Discussão
  - São apresentados todos os resultados obtidos e suas respectivas conclusões.

## 2 Método de Modelagem e Material

### 2.1 Impressão 3D

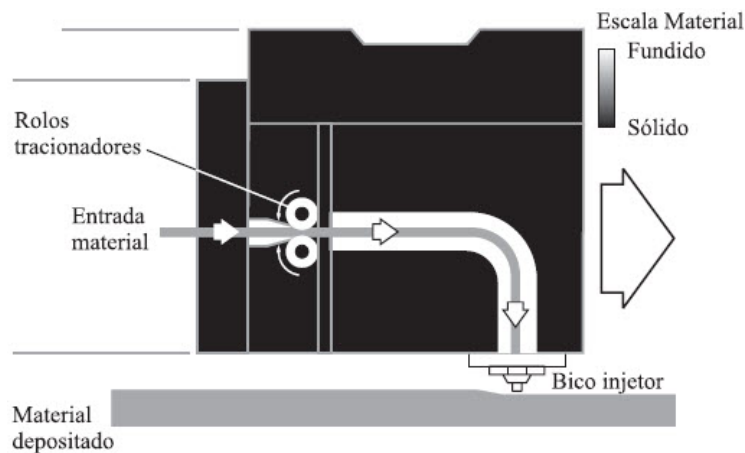


Figura 1 – Cabeçote extrusor de filetes. Fonte: Adaptado de (AHRENS C. H. ; SALMORIA, 2004)

A Protatipagem Rápida (do inglês *Rapid Prototyping*, RP), popularmente conhecida como impressão 3D, é um método de fabricação de um corpo tridimensional a partir de um modelo assistido por computador (do inglês *Computer Aided Design*, CAD. Dentre as tecnologias de RP, a Modelagem por Deposição Fundida (do inglês Fused Deposition Molding, FDM) é destinada apenas para a fabricação com compostos poliméricos. (WANG, 2017)

O método consiste em um processo no qual o filamento do material de modelagem é puxado para uma câmara de aquecimento controlado até que o material quase atinja um estado líquido, como mostra a figura 5. O material então é depositado em uma plataforma aquecida e se funde ao material previamente ejetado, construindo um modelo físico, camada por camada, como é mostrado abaixo.(SUN, 2008)

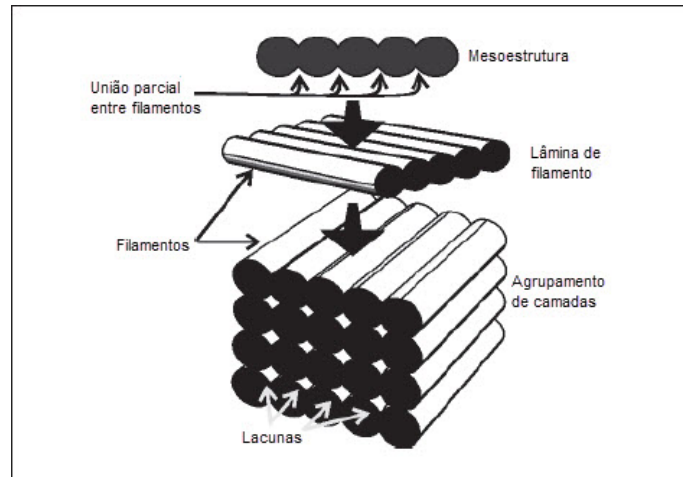


Figura 2 – Níveis de análise para protótipos FDM. Fonte: (BELLEHUMEUR, 2004) com adaptações

É importante observar que o processo por FDM pode provocar uma interferência no comportamento do polímero comparado com o mesmo feito por injeção, dando ao corpo fabricado propriedades ou características de um material anisotrópico, fator que pode ser causado principalmente pelas orientações de camadas utilizadas na impressão 3D. (AL., 2002) Os protótipos por FDM podem ser vistos também como estruturas de compósitos formados por filamentos parcialmente ligados, combinando a matriz e o reforço em um único sistema. (SUN, 2008; WANG, 2017)

## 2.2 Qualidade de Impressão

A qualidade de impressão é decorrente da efetividade da adesão entre os filamentos, caracterizando uma condição relevante quanto à integridade e as propriedades mecânicas do material projetado. (BELLEHUMEUR, 2004) A qualidade da união é aferida analisando o “pescoço” formado entre os filamentos, com junção lateral, e a propagação em escala molecular. A figura a seguir enfatiza: (a) O contato superficial; (b) Crescimento do pescoço; (c) Propagação em escala molecular. (SILVA, 2017)

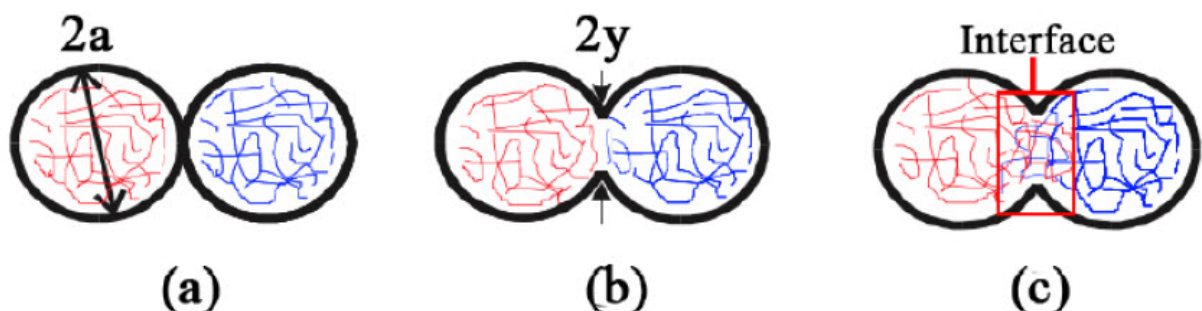


Figura 3 – Forma de constituição na adesão de dois filamentos. Fonte: (SILVA, 2017)

A resolução da impressão é muito influenciada pela qualidade de precisão entre camadas que uma impressora pode entregar. Em geral, as impressoras FDM comuns são capazes de realizar modelagem com camadas distanciadas entre 200 a 300 microns. Entretanto, há impressoras com capacidade de impressão de até 20 microns, todavia são mais dispendiosas.([FERNANDES, 2016](#))

Para os filamentos de polímeros utilizados há duas opções no mercado, o de 1.75 mm ou de 3 mm de diâmetro, onde o de 3 mm proporciona uma maior vazão de material no bico do extrusor, que pode variar em um diâmetro de 0.2 mm até 1.0 mm. O bico é um componente que influencia na resolução de impressão, pois bicos menores possibilitam menores espessuras de camadas com maior facilidade. ([GRIESER, 2015](#))

Boas resoluções também implicam em maior tempo de impressão. Ou seja, quanto menor for a espessura entre as camadas, maior será o número de camadas e por consequência maior o tempo para realizar tal feito, sendo necessário encontrar um meio termo entre qualidade necessária e tempo de impressão aceitável.([FERNANDES, 2016](#))

## 2.3 Processo de Impressão

De acordo com o pesquisador João Fernandes ([FERNANDES, 2016](#)), a impressão 3D é ordenada nas seguintes etapas: Modelagem; Fatiamento; Impressão; Acabamento. A modelagem é o desenvolvimento de uma peça 3D em qualquer software de CAD, como por exemplo *SolidWorks* e *CATIA*. Feito o projeto, segue para o fatiamento da peça por algum software de fatiamento (do inglês *slicing software*), no qual oferece diversas configurações no modo de impressão. Em geral, as principais configurações disponíveis nesses softwares são os seguintes parâmetros:

- Distanciamento das camadas;
- Velocidade de impressão;
- Intensidade de resfriamento;
- Temperatura do extrusor e da mesa;
- Multiplicador de extrusão;
- Preenchimento interno;
- Quantidade de linhas de contorno;
- Orientação de impressão;



Todos esses parâmetros podem ser configurados e pré-estabelecidos em um software de fatiamento, como por exemplo: Simplify3D<sup>®</sup> ; CURA<sup>®</sup> ; Repetier<sup>®</sup> ; Slic3r<sup>®</sup> ; entre outros. Após finalizada sua configuração de impressão é gerado um arquivo tipo código G (do inglês *gcode*) para possível processamento de leitura pelas impressoras.([FERNANDES, 2016](#))

Dentre todos esses tópicos configuráveis, há dois que são interessantes ressaltar. O primeiro é o preenchimento interno, podendo variar de 0% até 100%, denotando uma peça totalmente oca ou preenchida, respectivamente. O segundo é a orientação de impressão, no qual há opções predefinidas ou personalizadas, que podem mudar completamente o comportamento mecânico.([TYMRAK, 2014](#)) O software *SIMPLIFY 3D*, por exemplo, apresenta as seguintes opções de orientação:

- Grade ou Rede (*Grid*);
- Retilíneo (*Rectilinear*);
- Honeycomb pequeno ou grande (*Fast/Full Honeycomb*);
- Triangular (*Triangular*);
- "Zig Zag"(*Wiggle*);

Na Figura 4 apresentam-se, para uma mesma secção transversal de um objeto, casos com estruturas de densidades de preenchimento diferentes e com orientação em Grade.

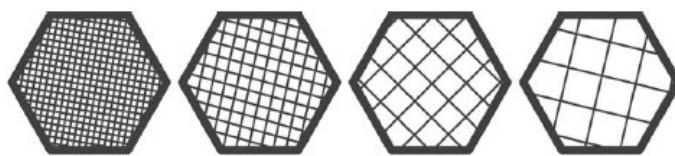


Figura 4 – Exemplos de Estruturas de Enchimento com Diferentes Densidades. Fonte: ([FERNANDES, 2016](#))

## 2.4 Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS)

O uso de componentes poliméricos como ABS despertou o interesse da indústria em diversas áreas, e está sendo um dos materiais mais utilizados na impressão 3D, devido à sua temperatura de fusão e peso específico baixo, combinado com boa rigidez e resistência. (SILVA, 2017) O ABS também é vantajoso na questão ambiental, pois se trata de um termoplástico 100% reciclável, podendo retornar ao processo como matéria prima direta, possibilitando um retorno econômico pela venda do mesmo. (JÚNIOR, 2014)

O copolímero Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS) é formado por três tipos diferentes de monômeros com proporções diferentes. O componente elastomérico, o butadieno, é responsável pela flexibilidade e resistência ao impacto, caracterizando sua fase de borracha. Já o estireno proporciona fluidez, brilho e dureza, dispersa em uma matriz de SAN (Copolímero de Acrilonitrila Estireno). A acrilonitrila é responsável pela resistência térmica, química e rigidez. (PESSAN, 1997)

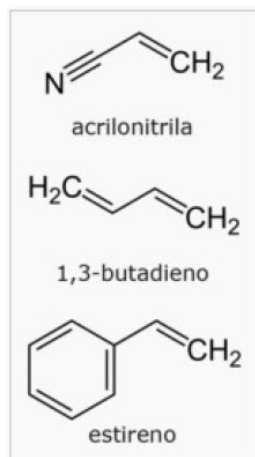


Figura 5 – Monômeros do ABS. Fonte: (JÚNIOR, 2014)

Ademais, o ABS é um polímero amorfo de excelente resistência à baixas temperaturas, excelente estabilidade dimensional, baixa contração de moldagem, baixa absorção de umidade e boas propriedades dielétricas. Em termos de processamento, o ABS pode ser injetado, soprado e extrudado. (JÚNIOR, 2014; AUMNATE, 2018) Entretanto, tem como desvantagem a baixa resistência a solventes, liberação de gases tóxicos durante o processo de extrusão e alta contração por variação térmica comparado a outros termoplásticos, como o poliácido láctico (PLA), sendo necessário o manuseio em impressoras fechadas para maior controle de temperatura. (BESKO, 2017)

O ABS é derivado do petróleo e mesmo não sendo um material biodegradável, ainda sim é extremamente utilizado na indústria e no comércio pelo seu baixo custo. (BESKO, 2017) Entretanto, quando há intuítos ecológicos para utilização do material reciclado, é observada perda de propriedades mecânicas e mudanças de propriedades óticas. (KLEIN, 2009)

## 3 Conceitos da Mecânica da Fratura

A fratura rápida é a separação de um corpo em dois ou mais pedaços, ocasionado por uma tensão estática. Existem dois tipos por natureza de fratura, a fratura frágil e a dúctil. A primeira é acompanhada de pouca deformação plástica, sendo característicos em vidros e em outros materiais que tenham resistência à deformação plástica.(DOWLING, 2013)

Já a fratura dúctil é acompanhada de uma deformação plástica significativa, e em alguns casos há presença de um processo gradual de rasgamento. Ambos os tipos de fratura são igualmente importantes para o desenvolvimento de estruturas, onde qualquer uma pode ocorrer devido à combinação de deformação e efeitos químicos, sendo denominadas trincas naturais.(DOWLING, 2013)

Quando há presença de uma trinca natural, sua propagação pode vir a ser muito rápida em materiais frágeis, mantendo conseqüentemente uma tensão constante até ruptura do material. Na fratura dúctil é mais fácil prever a iminente ocorrência de uma fratura, mas a deformação plástica faz necessária a aplicação de uma maior energia de deformação.(DOWLING, 2013)

### 3.1 Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE)

A partir do momento em que o material apresentar fraturas frágeis, normalmente assemelhadas a uma propagação de trinca rápida e sem resistência, ou seja, com pouca deformação plástica, será então possível analisar seu comportamento por uma abordagem chamada de Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE), no qual assume-se um comportamento linear elástico do material.(DOWLING, 2013)

Na década de 1920, A. A. Griffith foi o primeiro engenheiro a propor um critério de energia para fratura, no qual se remete à propagação de trinca elíptica, conseguindo demonstrar que a tensão crítica ( $\sigma_c$ ) para a propagação de trinca em um material completamente frágil é descrita pela equação 3.1.(ANDERSON, 2005)

$$\sigma_c = \left( \frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

Onde,

$\gamma_s$  = Energia de Coesão;

E = Módulo de elasticidade;

a = Tamanho de trinca;

Posteriormente, Irwin e Orowan propuseram uma modificação onde essa equação válida apenas para materiais frágeis passaria a ser utilizada também para materiais dúctios. Dessa maneira, o termo  $\gamma_s$  seria substituído por  $\gamma_s + \gamma_p$ , onde  $\gamma_p$  é a energia de deformação plástica presente na extremidade da trinca. (ANDERSON, 2005)

$$\sigma_c = \left( \frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

Ainda assim, Griffith definiu a taxa de liberação de energia de tensão  $G$  (do inglês *strain energy release rate*, equação 3.3), na qual mensura a quantidade de energia por unidade de área necessária para prolongamento da trinca. Esse parâmetro é utilizado como quantia física fundamental de controle de comportamento da trinca. Entretanto, esse parâmetro até então só era utilizado para materiais frágeis, mas Irwin determinou que mesmo com as circunstâncias de utilização majoritária de energia em deformação plástica em materiais dúcteis, esse parâmetro ainda pode ser aplicado desde que sua zona plástica seja pequena. (DOWLING, 2013)

$$G = \frac{-1}{t} \frac{dU}{da} \quad (3.3)$$

Onde,

$dU$  = Taxa de variação decrescente da energia potencial;

$da$  = Taxa de crescimento da trinca;

$t$  = Espessura do corpo de prova;

### 3.1.1 Modos de Carregamento

Um corpo trincado pode ser excitado por um carregamento para um ou qualquer um dos modos de deslocamento, como mostra na figura 6. O Modo I é chamado de modo de abertura e consiste na separação das faces da trinca. O Modo II é o modo deslizante, onde cada pedaço da trinca se desloca no sentido contrário da outra, de forma normal à face transversal. Por fim, o Modo III é denominado de modo de rasgamento, deslizando novamente de forma contrária ao outro pedaço da trinca, mas dessa vez de forma paralela à secção transversal. O primeiro caso é provocado por carregamento de tensão normal à trinca, já os outros dois são ocasionados por carregamento cisalhante, mas em direções diferentes. (DOWLING, 2013)

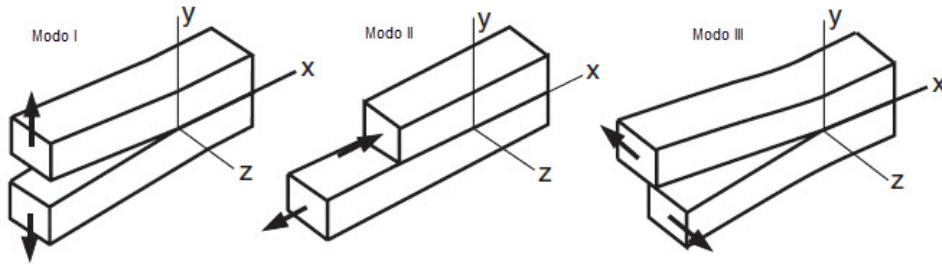


Figura 6 – Modos básicos de deslocamento de trincas. Fonte: adaptada de (DOWLING, 2013) com adaptações

### 3.1.2 Fator de Intensidade de Tensão, $K$

O conceito do fator de intensidade  $K$  é a caracterização de magnitude ou intensidade de tensão capaz de ser aplicada numa trinca de um material linear elástico e isotrópico. O sistema de coordenadas polares  $r$  e  $\theta$  no plano  $x$ - $y$  descreve as tensões na trinca, de forma normal ao plano da mesma, enquanto na direção  $z$  é paralelo ao plano transversal da trinca. Para qualquer caso de carregamento no Modo I, as tensões próximo à ponta da trinca são descritas conforme é mostrado abaixo, onde  $\sigma_z$  pode variar no estado plano de tensão (3.4d) ou no plano de deformação (3.4e). (DOWLING, 2013)

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \dots \quad (3.4a)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \dots \quad (3.4b)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \dots \quad (3.4c)$$

$$\sigma_z = 0 \quad (3.4d)$$

$$\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y) \quad (3.4e)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (3.4f)$$

Onde,

$\tau$  = Tensão de cisalhamento no plano;

$\nu$  = Coeficiente de Poisson;

$\sigma$  = Tensão normal em cada eixo;

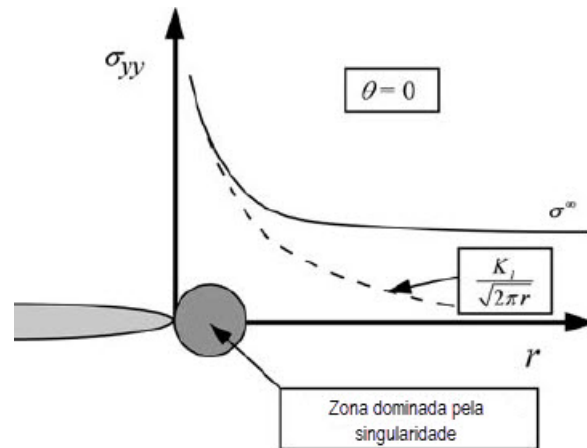


Figura 7 – Tensão normal no plano da trinca pela distância à ponta da trinca no Modo I de carregamento. Fonte: adaptado de (ANDERSON, 2005) com adaptações

Essas equações são derivadas com base na teoria linear elástica, onde os componentes não nulos são válidos apenas perto da ponta da trinca, onde a singularidade  $1/\sqrt{r}$  domina o campo de tensões. Já as tensões longe da trinca são controladas indiretamente pelas condições de contorno. O fator de intensidade  $K_I$  define a amplitude da singularidade perto da trinca, ou seja, as tensões são diretamente proporcionais a  $K_I$ , o que pode ser definido pela expressão matemática 3.5. (ANDERSON, 2005)

$$K_I = \lim_{r, \theta \rightarrow 0} (\sigma_y \sqrt{2\pi r}) \quad (3.5)$$

Em geral, essa equação é expressa da seguinte forma:

$$K_I = FS\sqrt{\pi a} \quad (3.6)$$

Onde F é o fator geométrico do corpo de prova, sendo diferente para cada geometria em função da razão  $a/b$ ; a é o comprimento de trinca; b é o comprimento do corpo de prova; S é a tensão nominal sobre a trinca. (DOWLING, 2013)

### 3.1.3 Tenacidade à Fratura

Nos ensaios de tenacidade à fratura com base nos princípios da MFLE é encontrado um valor do fator de intensidade aleatório, que pode ser denominado como  $K_Q$ . E com o aumento da espessura  $t$  do corpo de prova é observado um padrão de decaimento do valor de  $K_Q$ , como é mostrado na figura 8 abaixo. (DOWLING, 2013)

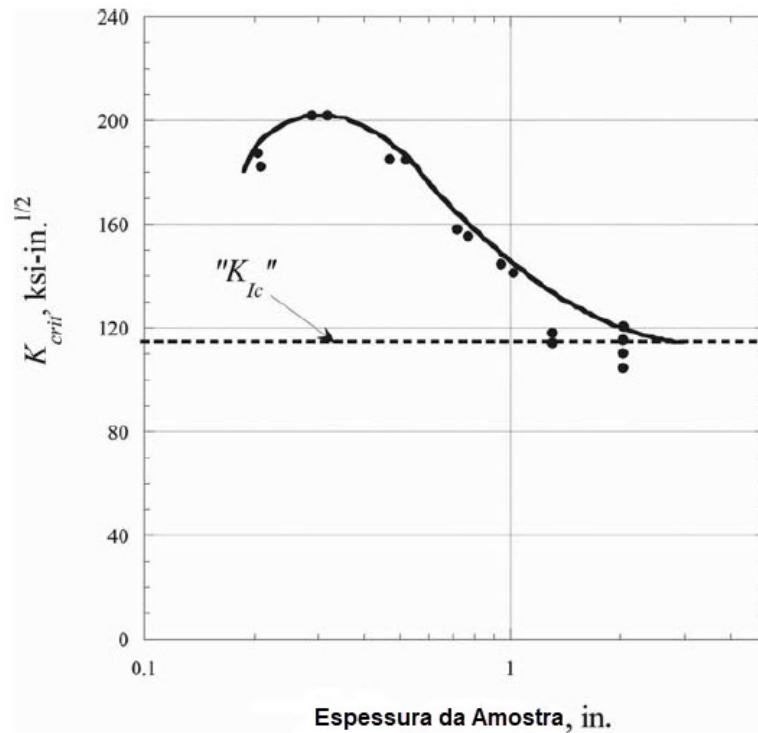


Figura 8 – Variação da tenacidade à fratura pela espessura da amostra para uma liga não especificada. Fonte: adaptado de (ANDERSON, 2005) com adaptações

Esse comportamento se repete e é afetado pela zona plástica na ponta da trinca de maneira dependente da espessura. Quando o valor de  $K_Q$  e  $t$  satisfaz a relação 3.7, envolvendo a tensão nominal crítica  $\sigma_0$ , nenhuma redução significativa de tenacidade é esperada e em seguida,  $K_Q$  passa a ser denominado como tenacidade à fratura do material,  $K_{Ic}$ . (ANDERSON, 2005; DOWLING, 2013)

$$t \geq 2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_0} \right)^2 \quad (3.7)$$

Uma vez que  $K_{Ic}$  é a capacidade de um determinado material em resistir à fratura na presença de uma trinca, os polímeros apresentam um valor que pode variar normalmente entre 1 à 5 MPa $\sqrt{m}$ . De resto, é incontestável o reconhecimento de conservadorismo nessa ideologia de procura por  $K_{Ic}$ , já que aproximações são evidentemente necessárias. (DOWLING, 2013)

### 3.1.4 Zona Plástica

A zona plástica é localizada à frente da ponta da trinca que possui comportamento plástico, sendo considerada muito pequena quando as condições da MFLE são aplicadas, e esse tamanho pode ser encontrado a partir do campo de tensões (3.4). Para o estado plano de tensão, ou seja, quando  $\sigma_z = 0$  e  $\theta = 0$ , gera a igualdade  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_0$  e a zona passa a ter o comprimento do valor  $2r_{0\sigma}$  como mostra a equação 3.8. (DOWLING, 2013)

$$2r_{0\sigma} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K}{\sigma_0} \right)^2 \quad (3.8)$$

$$2r_{0\varepsilon} = \frac{1}{3\pi} \left( \frac{K}{\sigma_0} \right)^2 \quad (3.9)$$

Para o estado plano de deformação, a deformação no eixo z é nula ( $\varepsilon_z = 0$ ) e conseqüentemente pela lei de Hooke,  $\sigma_x = \sigma_y$ . Irwin sugeriu a partir de uma série de observações que  $\sigma_y = \sqrt{3}\sigma_0$ , obtendo assim, outra expressão para calcular o comprimento da zona plástica, mostrada na equação 3.9, obtendo um valor 3 vezes menor comparado ao plano de tensão como ilustra na figura 9. (DOWLING, 2013)

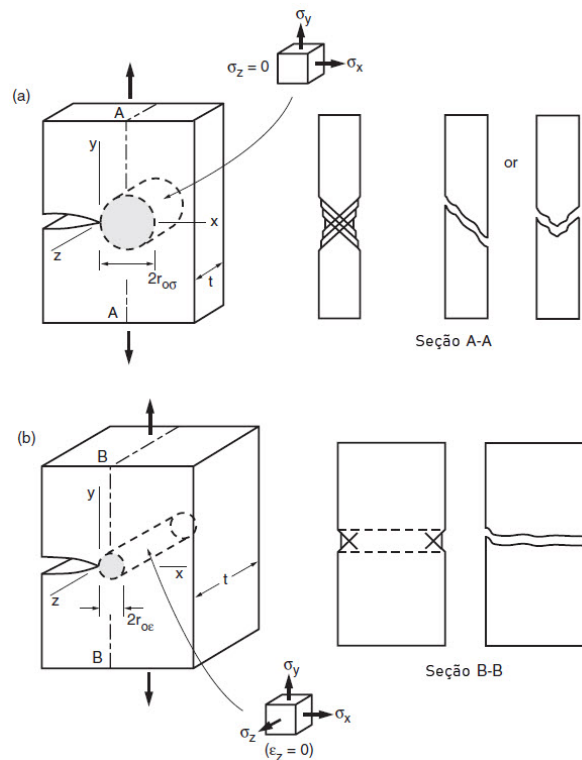


Figura 9 – Zona plástica, estado de tensão, e fratura amostral para (a) plano de tensão e (b) plano de deformação. Fonte: (DOWLING, 2013) com adaptações



### 3.1.5 Limitações para MFLE

Enquanto a zona plástica na ponta da trinca permanecer pequena o suficiente para que o campo das equações elásticas seja válido, será possível aplicar a teoria MFLE. Uma forma de assegurar essa usabilidade da teoria é garantir que o dimensionamento geométrico satisfaça as condições da inequação 3.10. Essa relação requisita que o tamanho da zona plástica no plano de tensão ( $2r_{0\sigma}$ ) seja 4 vezes menor que as condições de contorno do corpo de prova. (DOWLING, 2013)

$$a, (b - a), h \geq \frac{4}{\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_0} \right)^2 \quad (3.10)$$

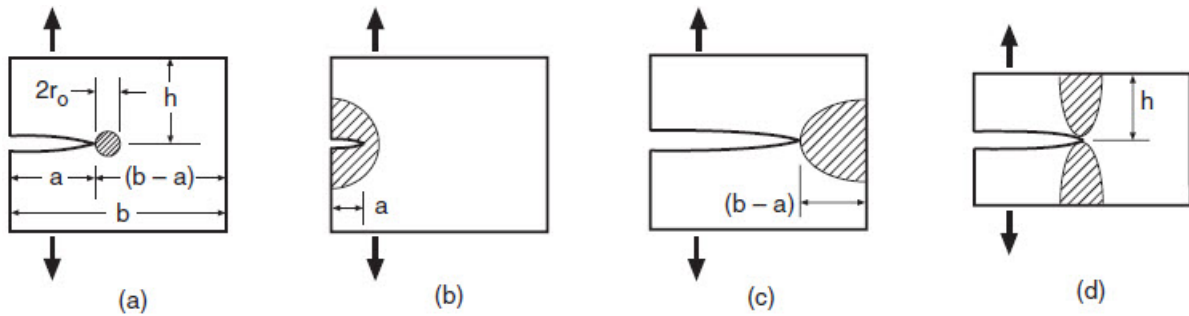


Figura 10 – Zona plástica em comparação com as dimensões planares (a) em situações em que o MFLE é inválido devido às zonas plástica serem muito grandes em comparação com (b) o comprimento da trinca, (c) região sem trinca e (d) altura do membro. Fonte: (DOWLING, 2013)

Por outro lado, para estipular um valor de tenacidade à fratura, deve ser satisfeito de qualquer forma a relação 3.7. Portanto, partindo do princípio que o plano de deformação deve ser um requisito inicial, é formulada a nova expressão 3.11, na qual também satisfaz as condições da MFLE automaticamente, e estima uma zona plástica ( $2r_{0\epsilon}$ ) até 24 vezes menor do que pelo plano de tensão. (DOWLING, 2013)

$$t, a, (b - a), h \geq 2,5 \left( \frac{K_I}{\sigma_0} \right)^2 \quad (3.11)$$

## 4 Metodologia

A metodologia deste trabalho tem como objetivo comparar, para diferentes casos, os resultados do comportamento mecânico do ABS por FDM. Para este fim foram escolhidas as seguintes variáveis de comparação para serem utilizadas no ensaio de tração:

- Diferentes temperaturas de impressão;
- Diferentes impressoras 3D;

Após caracterizar o material por esse ensaio, e analisar se as variáveis utilizadas interferem ou não no comportamento do material, é planejado seguir a análise na área da mecânica da fratura, com o ensaio de tenacidade à fratura.

### 4.1 Ensaio de Tração

Para esse ensaio foi utilizado como base de orientação a norma D638-14 da ASTM (do inglês *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*). Esse teste cobre a determinação de propriedades de tensão para força unidirecional em materiais poliméricos, além do coeficiente de Poisson (4.1), que é representado como deformação específica lateral pela deformação específica axial. (ASTM D638, 2014).

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_x} \quad (4.1)$$

A norma permite a escolha de até 5 tipos de geometria para realização do ensaio, onde cada tipo possui seus requisitos a serem cumpridos para assim serem selecionados. Neste trabalho foi então selecionado o tipo 1 como mostra na figura 11, e na tabela 1 é simplificado suas dimensões recomendadas.

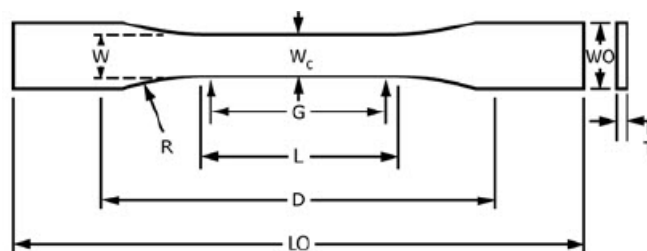


Figura 11 – Paramêtros do corpo de prova de tração. Fonte: (ASTM D638, 2014)

Tabela 1 – Dimensões de cada componente apresentado na figura 11.

Dimensões	Tipo 1	Tolerâncias
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 pinças	115	$\pm 5$
R - Raio do contorno	76	$\pm 1$
T - Espessura	3.2	$\pm 0.4$

Fonte: Dados extraídos de (ASTM D638, 2014)

De acordo com a norma, é necessário realizar pelo menos 5 testes com materiais isotrópicos e para materiais não isotrópicos, se possível, pelo menos 5 teste para análise paralela e normal ao eixo principal de tensão. Como não se sabe de forma concreta se o ABS por FDM é ou não isotrópico, serão realizadas ambas as análises. É recomendado também o descarte de resultados dos ensaios nos quais tiveram fratura próxima ou além da região de teste transversal (região de dimensão “L” da figura 11).

Já a respeito da velocidade de teste, a norma recomenda determinar a velocidade de acordo com o material e o tipo de geometria utilizada. Neste, será utilizada a menor velocidade permitida, de 5 mm/min com  $\varepsilon = 0.1$ , onde  $\varepsilon$  é a taxa de deformação por minuto (exemplificada na equação 4.2).

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (4.2)$$

$$E = \frac{\sigma_0}{\varepsilon} \quad (4.3)$$

Os dados gerados pelo maquinário são basicamente os dados pontuais de tensão e deformação do corpo de prova. A partir desses dois dados é possível determinar à qual tipo de fratura o material apresenta, se é dúctil ou frágil. Ademais, é determinado pelos ensaios o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e o módulo de elasticidade (E, 4.3), sendo possível a plotagem do gráfico de tensão por deformação advindo da média dos resultados obtidos em cada ensaio, como mostra a figura 12.

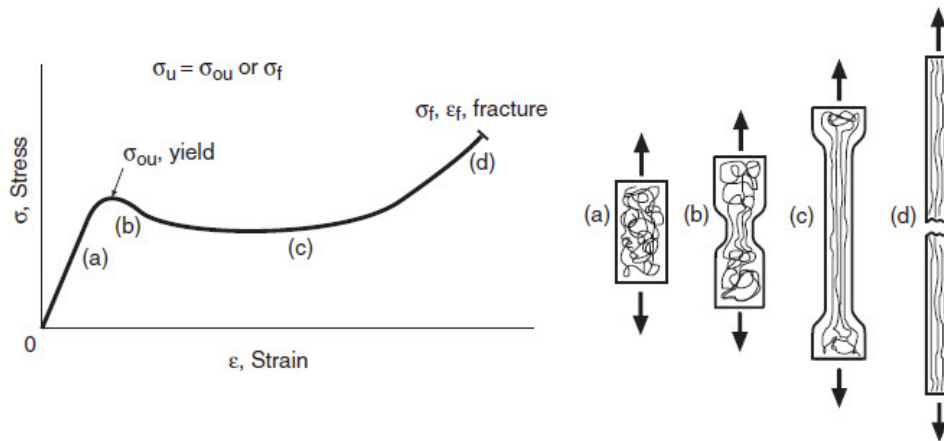


Figura 12 – Curva tensão-deformação típica de alguns polímeros. Fonte: (DOWLING, 2013)

É importante ressaltar que a análise deste trabalho nos ensaios de tração tem como objetivo apenas a região elástica da curva de tensão-deformação (região “a” da figura 12), o que possibilita a identificação das propriedades mencionadas anteriormente.



Figura 13 – Instron 8801. Fonte: instron.com

Para o ensaio é utilizado o equipamento Instron 8801. Este é um instrumento com funcionamento hidráulico, indicado para ensaios mecânicos, estáticos e dinâmicos. Sua célula de carga é de 100kN.

## 4.2 Ensaio de Tenacidade à Fratura

Para o ensaio de tenacidade à fratura, é usado como orientação a norma D5045-14 ASTM. Essa norma é indicada para determinar  $K_{Ic}$  em polímeros, utilizando como base diversos aspectos já estabelecidos na norma E399 ASTM, o mesmo ensaio mas para metais. (ASTM E399, 2012; ASTM D5045, 2014).

A norma visa duas geometrias principais para o ensaio, denominada dobra de entalhe de ponta única (do inglês *single-edge-notch bending*, SENB) e a outra indicada para uma configuração de tensão compacta (do inglês *compact tension*, CT) como é visto na figura 14, na qual será usada (o requisito de rugosidade não será levado em conta).

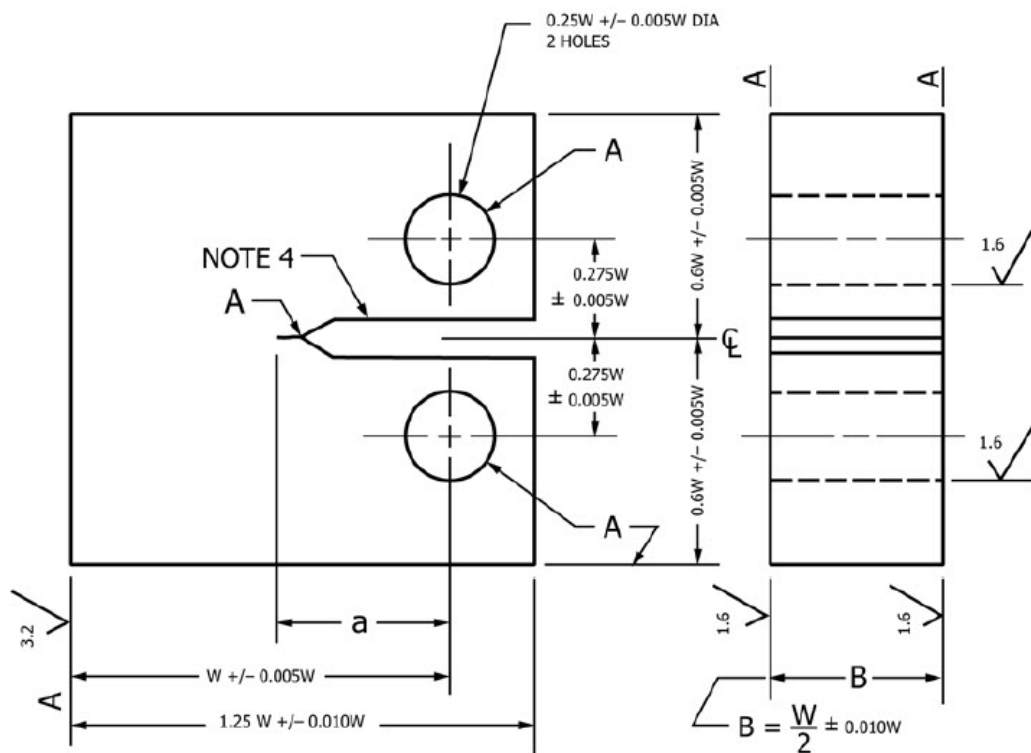


Figura 14 – Parâmetros do corpo de prova CT. Fonte:(ASTM E399, 2012)

É recomendado para o teste a repetição do ensaio em pelo menos 3 corpos de prova, nos quais devem respeitar as equações 4.4 e 4.5 para que o ensaio possa ter um comportamento no plano de deformação, de acordo com a equação 3.11.

$$0.45 < \frac{a}{W} < 0.55 \quad (4.4)$$

$$2 < \frac{W}{B} < 4 \quad (4.5)$$

A norma também explica de forma técnica que para determinar um valor aproximado de  $K_{Ic}$ , é necessário utilizar o método de tentativa e erro, até que seja identificada uma fratura de comportamento frágil e convergência nos resultados de tenacidade, simbolizando o encontro do resultado final procurado.

A fim de definir um dado aproximado para o material em análise, é utilizado como estratégia testes de diferentes geometrias e espessuras permitidas pela norma, com o intuito de estabelecer um guia para qual delas será utilizada a fundo nos ensaios. Após consolidar a geometria de uso, a mesma será utilizada em definitivo para o ensaio em questão.

Por fim, é instruído antes da realização do ensaio, a propagação de uma pré-trinca por fadiga. Para tal, deve-se passar levemente uma lâmina de corte no concentrador de tensão, com o intuito de excitar a formação de trinca no local. Se isso não for possível por questões materiais ou instrumentais, pode-se passar a mesma lâmina de forma mais profunda até que gere uma trinca com o tamanho equivalente a 2 vezes maior que a espessura da lâmina ou do raio do concentrador de tensão.

Finalmente, ao iniciar o ensaio de tenacidade à fratura em materiais poliméricos, é sugerido uma velocidade de teste de 10 mm/min à uma temperatura ambiente de aproximadamente 23°C. Mas como se trata de um material com comportamento desconhecido, será utilizada uma velocidade de 5 mm/min por questão conservadora.

Para o cálculo de tenacidade  $K_{Ic}$ , a norma disponibiliza as seguintes equações:

$$K_Q = \left(\frac{P_Q}{BW^{\frac{1}{2}}}\right)f(x) \quad (4.6)$$

$$f(x) = \frac{(2+x)(0.886 + 4.64x - 13.32x^2 + 14.72x^3 - 5.6x^4)}{(1-x)^{\frac{3}{2}}} \quad (4.7)$$

Onde,

$$x = \frac{a}{W};$$

A equação 4.7 é válida apenas para  $0.2 < x < 0.8$ , e se for satisfeita essa condição, a equação 4.6 pode ser utilizada para o cálculo de  $K_Q$  até que o mesmo satisfaça a relação já apresentada (3.7) para que  $K_Q$  possa ser considerado  $K_{Ic}$ , o valor de tenacidade do material.

É importante saber que o valor de  $P_Q$  é definido através de uma análise do diagrama do ensaio, que é detalhadamente explicada na norma D5040-14 ASTM. Tendo definido o valor de  $P_Q$ , e se  $P_{max}/P_Q < 1.1$ , pode seguir com o cálculo de  $K_Q$ . Caso ao contrário, se  $P_{max}/P_Q > 1.1$ , o teste é inválido.

### 4.3 Material, Instrumentação e Método de Impressão

Para este trabalho é utilizado filamento de 1,75mm de diâmetro, de ABS natural da empresa 3DLAB<sup>®</sup> (tipo de ABS não especificado pelo fabricante) e ABS reciclado da empresa GREEN PRINT 3D<sup>®</sup> (GP3D), derivado de componentes do setor automotivo e eletrônico, de acordo com as informações do fabricante. Ambas as empresas foram contatadas e disponibilizaram os seguintes dados apresentados nas tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2 – Propriedades da matéria prima em grãos.

Propriedades	ABS Natural 3DLAB	ABS Reciclado GP3D
Densidade ( $g/cm^3$ )	1,04	-
Tensão de Escoamento (Mpa)	38	-
Resistência à Flexão (MPa)	130	62
Resistência à Tração (MPa)	-	58
Módulo de Elasticidade por Tração (GPa)	2,2	26*
Módulo de Elasticidade por Flexão (GPa)	2,1	-
Temperatura de Fusão ( $^{\circ}C$ )	220	-

\*Provável erro de fornecimento do dado. Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados fornecidos pelas empresas

Tabela 3 – Propriedades do material impresso, segundo a norma ASTM D638.

Propriedades	ABS Natural 3DLAB*	ABS Reciclado GP3D
Tensão de Escoamento (Mpa)	14,7	-
Tensão de Ruptura (MPa)	29	-
Módulo de Elasticidade por Tração (GPa)	1,33	-

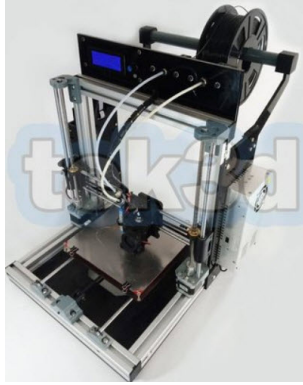
\*Corpos de prova impresso à 235 $^{\circ}C$ . Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados fornecidos pelas empresas

Tabela 4 – Dados estipulados e recomendados para uso dos filamentos.

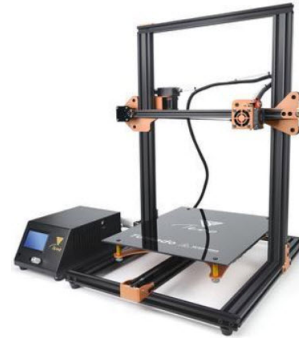
Propriedades	ABS Natural 3DLAB	ABS Reciclado GP3D
Temperatura do extrusor para impressão ( $^{\circ}C$ )	220 -240	200-230
Temperatura da mesa para impressão ( $^{\circ}C$ )	110	100-105

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados fornecidos pelas empresas

Para fabricação dos corpos de prova para o ensaio de tração, serão utilizadas as impressoras Alumínio I3 da Tek3d (15a), Tevo Tornado Gold Edition (15b) e Flashforge Guider II (15c). Cada uma capacitada de um volume de impressão de 20x20x20 cm, 30x30x40 cm, 28x25x30 cm e uma resolução de camada de até 0,1 mm, 0,05 mm e 0,05 mm, respectivamente.



(a) Alumínio I3 da Tek3d



(b) Tevo Tornado Gold Edition



(c) Flashforge Guider II

Figura 15 – Impressoras 3D. Fonte: (TEK3D, ; TEVO, ; FLASHFORGE, )

A utilização de 3 impressoras diferentes para fabricação de corpos de prova cumpre o propósito de comparar os resultados do ensaio de tração e verificar se há ou não variação significativa no componente mecânico do material. Já os corpos de prova CT, do ensaio de tenacidade à fratura, serão impressos apenas na Tevo Tornado Gold Edition (15b).

É importante que todas as impressoras passem por um processo de calibração prévio das impressões dos corpos de prova. Para isso, é utilizada a plataforma *Thingiverse*, que disponibiliza arquivos genéricos para calibração de extrusão, vibração e de precisão dos objetos impressos, com o objetivo de manter maior confiabilidade nos resultados.

Na impressão por FDM, a execução e fixação da primeira camada com perfeição é essencial para obter uma peça impressa com sucesso, sem que haja complicações como o efeito de *Warp* (descolamento total ou parcial da peça da mesa). Dessa forma deve-se realizar as seguintes precauções:



- Utilização de fixador na mesa;
- Aquecimento adequado da mesa;
- Isolamento térmico do ambiente de impressão;
- Calibração da mesa em conformidade;

Assim, será utilizado em todas as impressões o fixador de cabelo Karina extra-seco, e para os corpos de prova CT será usado um fixador líquido à base de PVP (polivinil-pirrolidona). Todas as impressoras serão devidamente isoladas por um recipiente, para manter um controle térmico interno aceitável. Na tabela 5 é detalhado os parâmetros de temperatura para a fabricação de todos os corpos de prova nas seguintes temperaturas de extrusão escolhidas: 225°C; 230°C; 235°C.

Tabela 5 – Temperatura de impressão para corpos de prova de tração.

Propriedades	ABS Natural e Reciclado à 225°C	ABS Natural e Reciclado à 230°C e 235°C
Temperatura do extrusor para primeira camada (°C)	232°C	240°C
Temperatura da mesa para primeira camada (°C)	112°C	112°C
Temperatura da mesa para o resto da impressão (°C)	110°C	110°C

Fonte: Autoral

Essas temperaturas de impressão escolhidas se justificam por estarem dentro ou próximas da margem recomendada pelos fabricantes, além de serem temperaturas comuns para o uso do ABS. A variação de 5°C entre elas não é maior porque pode interferir na qualidade e na dificuldade de impressão. Além desse parâmetro, todos os outros descritos abaixo permanecem iguais independentemente da impressão, nos quais são:

- Preenchimento interno de 100%;
- Orientação de preenchimento interno e externo de camadas sequenciais em  $-45^{\circ}/45^{\circ}$ ;
- Espessura de camadas de 0.2 mm;
- Velocidade de impressão de 55 mm/s;
- Refrigeração desligada;

A respeito da orientação de preenchimento interno, a orientação sequencial em  $-45^{\circ}/45^{\circ}$  foi escolhida por ser uma orientação comum em *slicing software* (Simplify3D<sup>®</sup> em questão).

Por fim, sabendo que as coordenadas das impressoras têm o bico de extrusão como eixo X, a mesa como eixo Y e o eixo Z como deslocamento de altura, todos os corpos de prova serão impressos com a face paralela ao plano XY como mostra a figura 16. Essa escolha de orientação possibilita uma melhor fixação na mesa por proporcionar uma maior área de contato, e por não necessitar de suporte de impressão.

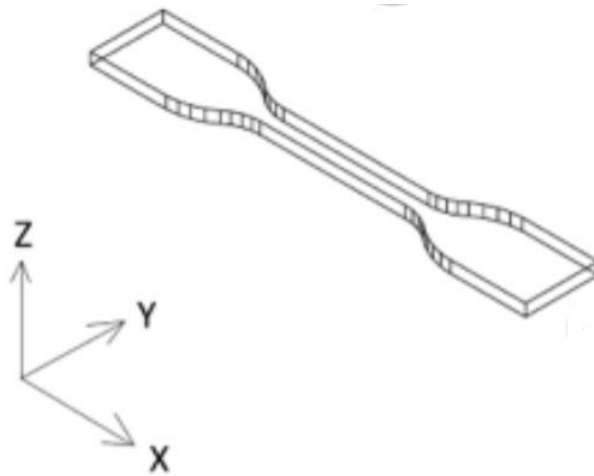


Figura 16 – Orientação de posicionamento de impressão. Fonte: (HORST, 2017)

Para os corpos de prova do ensaio de tenacidade à fratura, todos os parâmetros de impressão serão mantidos iguais aos corpos de prova de tração, exceto o de temperatura do bico extrusor, que será mantido fixo em  $230^{\circ}\text{C}$ .

## 5 Resultados e Discussão

Neste capítulo será apresentado os procedimentos, resultados e discussões a respeito dos ensaios de tração e de tenacidade à fratura, além de nomear os corpos de prova utilizados para maior organização e melhor comparação dos resultados obtidos. No ensaio de tração é analisado o comportamento do ABS para diferentes temperaturas do extrusor durante a impressão, e para diferentes impressoras com um mesmo lote de material. O segundo ensaio busca apenas uma tentativa de estimar o valor de tenacidade à fratura do material por impressão 3D, sem nenhuma variação nos parâmetros de impressão.

### 5.1 Impressão para o Ensaio de Tração

#### 5.1.1 Corpos de prova com diferentes temperaturas de impressão

A fabricação dos corpos de prova com variação de temperatura de impressão foi realizada na Alumínio I3 da Tek3d. Para maior facilidade de citação, organização e comparação entre os materiais e temperaturas trabalhadas, os corpos de prova foram organizados nas seguintes nomenclaturas:

- ANI/225 - Corpo de prova de ABS Natural impresso à 225°C;
- ANI/230 - Corpo de prova de ABS Natural impresso à 230°C;
- ANI/235 - Corpo de prova de ABS Natural impresso à 235°C;
- ARI/225 - Corpo de prova de ABS Reciclado impresso à 225°C;
- ARI/230 - Corpo de prova de ABS Reciclado impresso à 230°C;
- ARI/235 - Corpo de prova de ABS Reciclado impresso à 235°C;



Figura 17 – Corpos de prova de tração. Fonte: Autoral

Em geral, a produção de todos os corpos de prova, independentemente da temperatura de impressão, teve o mesmo problema em comum: apresentaram uma leve contração nas extremidades (local de fixação das pinças). Como isso não afeta a região de ensaio do corpo de prova, só foram descartadas unidades danificadas na região central. Para evitar uma maior ocorrência desse problema, foi utilizado em todas as impressões a ferramenta *Brim* (uma borda em contorno do corpo de prova) para ajudar na fixação permanente na mesa até o final da impressão.

Tabela 6 – Quantidade de corpos de prova com e sem êxito de impressão e de ensaio.

Corpo de prova	Quantidade impressa	Quantidade descartada*	Quantidade com êxito no ensaio
ANI/225	10	-	10
ANI/230	25	11	14
ANI/235	10	-	10
ARI/225	7	7	-
ARI/230	10	-	10
ARI/235	10	1	9

\*Os problemas podem ser tanto de impressão quanto de ensaio. Fonte: Autoral

De acordo com a tabela 6, é visto que não foi realizado nenhum ensaio satisfatório no ARI/225. Isso se deu porque a temperatura utilizada sempre ocasionava em entupimento do bico extrusor ou descolamento da mesa de impressão, impossibilitando a impressão de uma quantidade válida necessária. Por isso, a mesma foi então descartada da análise.

### 5.1.2 Corpos de Prova com Impressoras Diferentes

Para os corpos de prova impressos em diferentes impressoras seguem as seguintes nomenclaturas para efeito de comparação:

- ANT - impressões realizadas na *Tevo Tornado Gold Edition*;
- ANF - impressões realizadas na *Flashforge Guider II*;
- ANI - impressões realizadas na *Alumínio I3 da Tek3d*.

Novamente todos os corpos de prova tiveram a ferramenta *Brim* em uso. Todos foram impressos com temperatura igual à 235°C. Por fim, o aproveitamento das impressões nas duas novas impressoras foi de 100%, visto que todos os 10 corpos de prova feitos em cada tiveram êxito no ensaio de tração.

### 5.1.3 Impressão para o Ensaio de Tenacidade à Fratura

Como dito anteriormente, sabe-se que a geometria é um fator de grande influência no comportamento da fratura durante o ensaio de tenacidade. E embora essa análise seja amplamente conhecida pela engenharia, o processo de fabricação por FDM pode acarretar em comportamentos totalmente novos e desconhecidos até então.

Assim, como descrito na metodologia, é visada a utilização de geometrias adversas para estabelecer então um maior conhecimento inicial sobre o material, com o intuito de determinar um norte de provável geometria e espessura ideal para obtenção do valor de tenacidade. Seguindo esse pensamento, foram feitos dois corpos de prova de geometria aleatória (T1 e T2) com ABS Natural. Cada um tem os seguintes parâmetros apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Valores escolhidos para os corpos de prova de acordo com a figura 14

Corpo de Prova	Valor de W (mm)	Valor de Espessura (mm)
T1	40	10
T2	36	12

Fonte: Autoral

Igualmente aos corpos de prova para o ensaio de tração, foi utilizada a ferramenta de impressão *Brim*, sendo de importante uso para impressões mais espessas e com 100% de preenchimento, nas quais apresentam maior contração e descolamento da mesa.

Após realizar o ensaio de tenacidade, foi observada uma falha de ensaio com o corpo de prova T1, visto que não ocorreu uma fratura, mas sim um possível descolamento na interface das linhas de impressão. Já para o corpo de prova T2, antes de ocorrer a fratura houve propagação de trinca apresentando um comportamento característico do ensaio de tenacidade no gráfico. Abaixo é mostrado o comportamento dos testes no ensaio e na figura 18 o estado posterior da trinca.

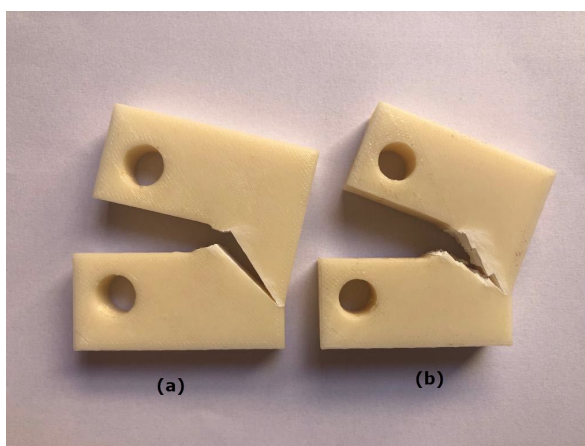


Figura 18 – Corpo de prova (a) T1 (b) T2 após ensaio. Fonte: Autoral

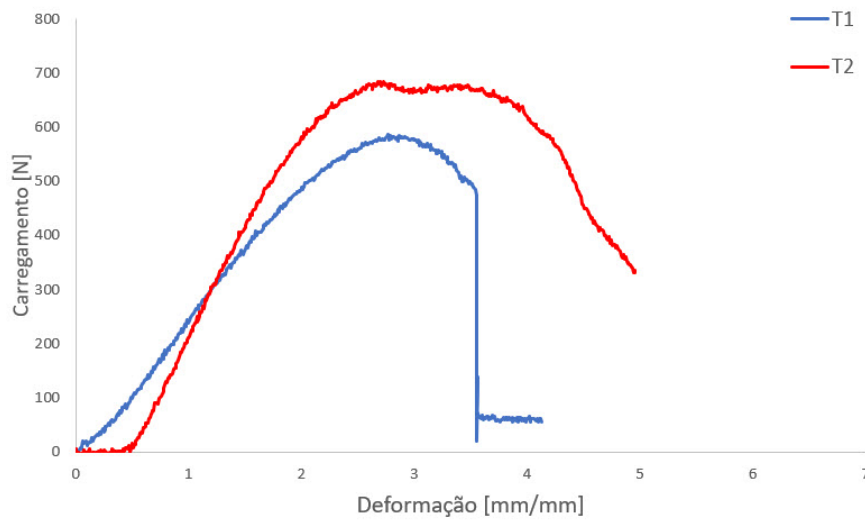


Figura 19 – Curva de carregamento de T1 e T2. Fonte: Autoral

Por mais que o ensaio com T1 tenha sido inconclusivo, o corpo de prova T2 apresentou resultados satisfatórios o suficiente para que sua geometria seguisse como definitiva para os próximos ensaios. Assim, os corpos de prova terão nomenclaturas definidas como TAN seguido do número correspondente à sua espessura, como por exemplo, TAN9 (Corpo de prova com 9 mm de espessura para o ensaio de tenacidade à fratura).

## 5.2 Resultados do Ensaio de Tração



Figura 20 – Corpo de prova após o ensaio de tração. Fonte: Autoral

Dentro de todos os corpos de prova utilizados no ensaio de tração, apenas 5 unidades foram aproveitadas para o cálculo da média da curva longitudinal e outros 5 corpos para o cálculo da média transversal. O segundo só assegura a importância de obter o valor aproximado do coeficiente de Poisson. Em todos os ensaios foi utilizado um sensor *Stringway*, como mostra acima na figura 20, garantindo maior precisão dos resultados.

### 5.2.1 Para diferentes temperaturas de impressão

Para uma melhor visualização comparativa do comportamento de cada caso analisado, é apresentada uma curva de tensão-deformação média para diferentes temperaturas do ABS Natural da 3DLAB<sup>®</sup> e do ABS Reciclado da GREEN PRINT 3D<sup>®</sup>, seguido da tabela construída pelos resultados obtidos de cada material.

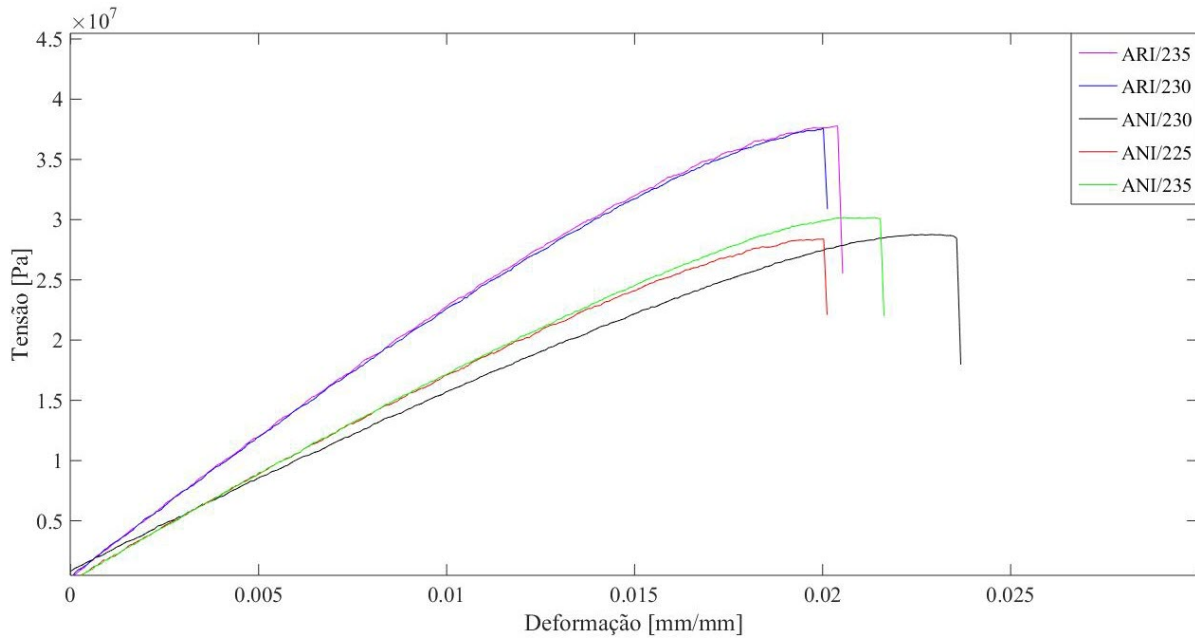


Figura 21 – Curvas médias de tensão-deformação com diferentes temperaturas de impressão. Fonte: Autoral

Tabela 8 – Resultados do ensaio de tração para o ABS Natural e Reciclado.

Propriedades	ANI/235	ANI/230*	ANI/225	ARI/235	ARI/230
Módulo de Elasticidade (GPa)	1,7786	1,7653	1,7726	2,4584	2,4574
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,3847	0,3018	0,3692	0,3599	0,3345
Tensão de Ruptura (MPa)	29,1462	27,677	28,4174	37,47	37,7878
Resistência à Tração (MPa)	30,1762	28,764	28,4177	37,778	37,8

\*Valores com erro de 15%. Fonte: Autoral

Apenas analisando os gráficos pode-se afirmar que o ABS por FDM, seja o Natural ou o Reciclado, é um polímero frágil, pois em todos os casos os pontos de ruptura são localizados no início do escoamento, não apresentando então deformações plásticas consideráveis. Os resultados numéricos da tabela 8 comprovam essa análise gráfica por apresentar tensões de ruptura e resistência à tração muito próximas.

Vale ressaltar ainda que a respeito dos resultados, o ANI/230 apresentou um erro alto de 15% no módulo de elasticidade em relação aos outros, que possuem erros de até 0,7%. Isso se justifica pela presença de um ou mais ensaios que tiveram resultados impróprios, e que não foram totalmente identificados em uma tentativa de eliminá-los do cálculo da média final. Por essa razão, o resultado final do caso ANI/230 se torna inválido para efeito de comparação e não será levado em conta nas conclusões.



Dito isso e feita a comparação com todos os casos que foram possíveis de se produzir, é notório que não há mudança significativa nas propriedades do material como o Módulo de Elasticidade ( $E$ ) e no coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Entretanto, as tensões de ruptura decaem de forma sutil no ABS Natural para uma variação de  $10^{\circ}\text{C}$  na temperatura de impressão. Já no reciclado, para  $5^{\circ}\text{C}$  de diferença, não é identificado nenhuma mudança de comportamento mecânico.

### 5.2.2 Para diferentes impressoras

A seguir todos os ensaios e comparações feitas serão apenas com o uso do ABS Natural da 3DLAB<sup>®</sup>, visto que o ABS Reciclado da GREEN PRINT 3D<sup>®</sup> se mostrou um material de difícil uso em impressões 3D pela sua alta tendência de contração, descolamento da mesa e por provocar de forma recorrente entupimento do bico de extrusão.

Assim sendo, o ensaio de tração ainda é utilizado para evidenciar se há ou não um comportamento mecânico inalterável ou aproximado do mesmo material feito por diferentes impressoras 3D. Na figura 22 e na tabela 9 são apresentados dados comparativos sobre o assunto.

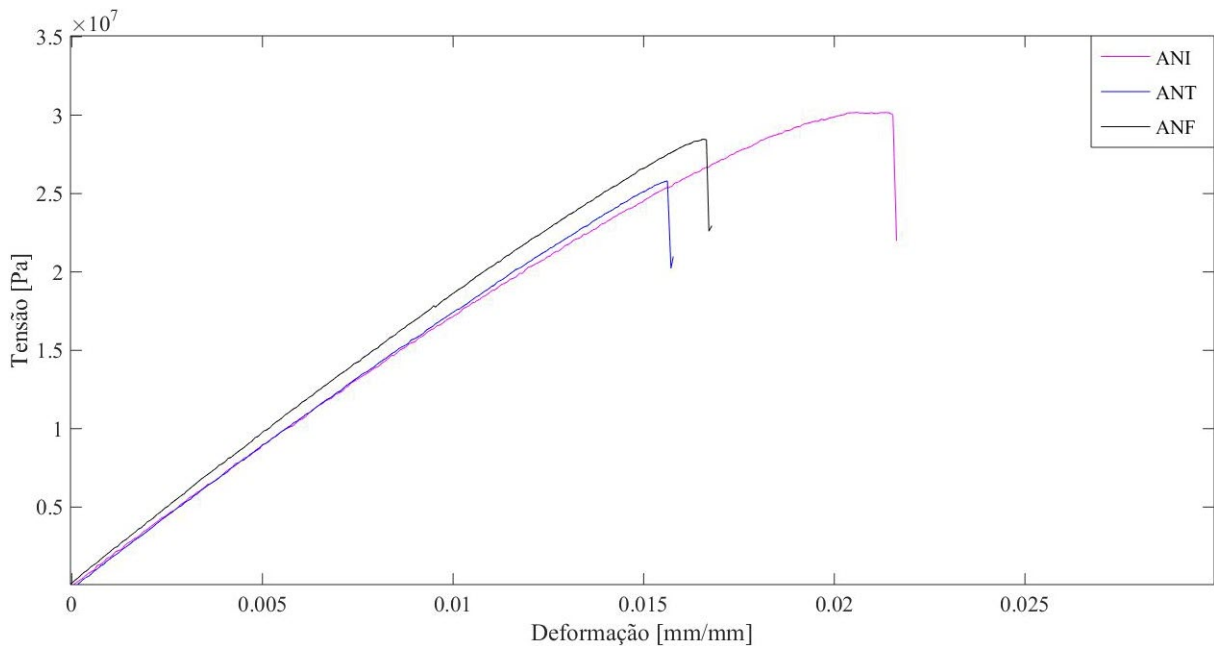


Figura 22 – Curvas médias de tensão-deformação com diferentes impressoras. Fonte: Autoral

Tabela 9 – Resultados do ensaio de tração para o ABS Natural por diferentes impressoras 3D.

Propriedades	ANI	ANT	ANF
Módulo de Elasticidade (GPa)	1,7786	1,7547	1,989
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,3847	0,1862	0,3815
Tensão de Ruptura (MPa)	29,1462	25,8059	28,4722
Resistência à Tração (MPa)	30,1762	26,4755	28,5519

Fonte: Autoral

Antes de avaliar e comparar os resultados obtidos, é importante relatar que a principal diferença entre os corpos de prova gerados por impressoras diferentes, é basicamente o acabamento interno e externo do objeto. Por mais que todas as impressoras apresentem configurações técnicas similares, a resolução e acabamento refinado se destacou para os corpos de prova ANT, seguido por ANF e ANI como impressões medianas e parecidas.

Os resultados de módulo de elasticidade, na tabela 9, confirmam o que era esperado pela teoria por não sofrer grandes variações, pois se trata de uma propriedade do material e não do método de produção. Já o coeficiente de Poisson e a resistência à tração do ANT variam bastante em relação aos outros, apresentando por consequência uma menor capacidade de deformação.

### 5.3 Resultados do Ensaio de Tenacidade

Para o ensaio de tenacidade foram utilizadas garras clevis de aço AISI 4340, adaptadas para uso na INSTRON 8801. E como pinos para prender os corpos de prova na garra, foi utilizada a superfície lisa de um parafuso francês de aço Inox 304 de diâmetro de 6,9 mm, figura 23. A interferência da deformação do aço pode ser desconsiderada, já que possui um módulo de elasticidade muito maior quando comparado a um polímero.

Visto que a norma requisita uma propagação de trinca inicial por carregamento cíclico, e isso não foi possível por questões de disponibilidade instrumental, foi então feita manualmente com uma lâmina até atingir aproximadamente 1 mm de profundidade, simulando assim uma trinca inicial exigida pela norma. Por fim, foi adicionado também ao corpo de prova uma fita métrica para estimar, com maior precisão, o tamanho da trinca no momento da fratura.



Figura 23 – Corpo de prova no ensaio de tenacidade à fratura. Fonte: Autoral

Feitos todos os ensaios, e identificado o tamanho das trincas na hora da fratura, é realizado uma média dos 3 testes sucedidos para cada espessura. Após confirmar que todas as condições para cálculo de  $K_Q$  são válidas, são obtidos todos os resultados apresentados na tabela 10 e comparados nos gráficos abaixo.

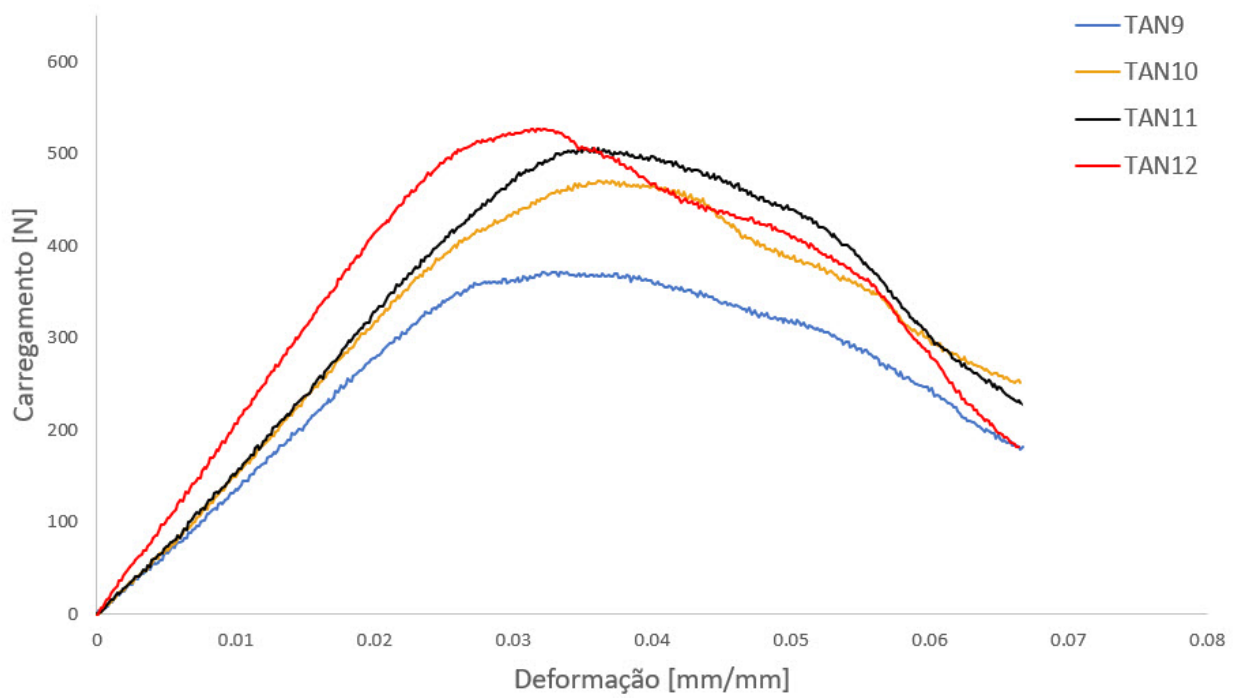


Figura 24 – Curvas médias de carregamento-deformação no ensaio de tenacidade à fratura. Fonte: Autoral

Abaixo é apresentado o mesmo gráfico da figura 24 mas com escala reduzida, para ressaltar de forma mais evidente o comportamento característico da fratura ao atingir carga máxima.

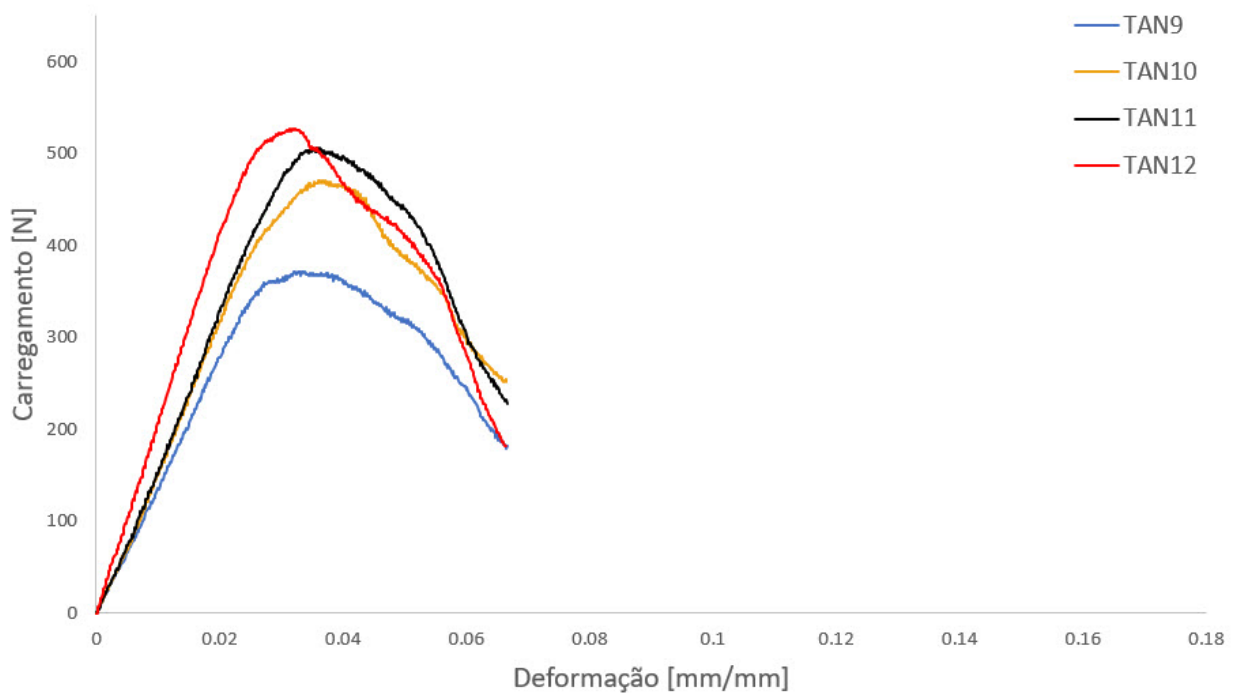


Figura 25 – Curvas médias de carregamento-deformação no ensaio de tenacidade à fratura com escala reduzida. Fonte: Autoral

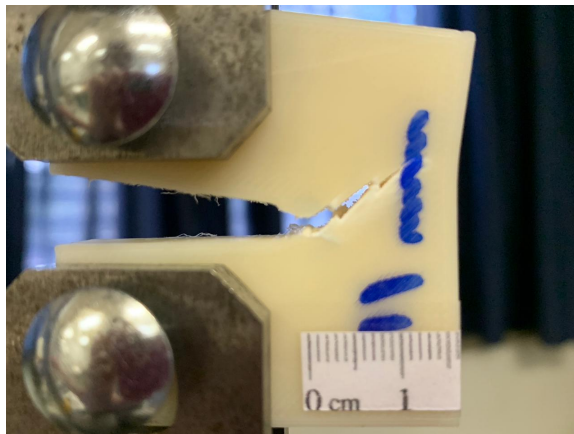
Tabela 10 – Resultados do ensaio de tenacidade à fratura com diferentes espessuras.

Propriedades	TAN9	TAN10	TAN11	TAN12
$P_Q$ (N)	357	431	498	495
$P_{max}/P_Q$	1.04	1.09	1.01	1.06
$a/W$	0.6	0.6	0.583	0.58
$f(a/W)$	13.65	13.65	12.79	12.65
$K_Q$ (MPa $\sqrt{m}$ )	2.85	3.10	3.05	2.75

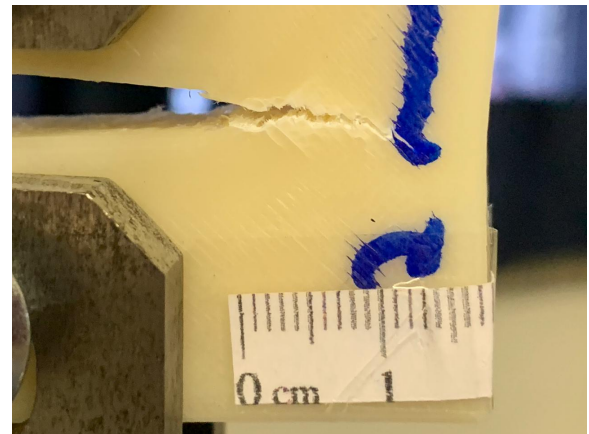
Fonte: Autoral

Ao observar os valores de  $K_Q$  atingidos, é satisfatório não apenas por serem válidos como também por se aproximarem do valor de tenacidade à fratura do ABS Natural laminado, que é 3 MPa $\sqrt{m}$ . Mesmo assim, isso não significa que alguns dos valores de  $K_Q$  são iguais a  $K_{Ic}$ , pois utilizando a condição apresentada (3.7) e os valores obtidos, conclui-se que nenhum deles podem ser considerados como valor de tenacidade à fratura do ABS Natural por FDM. (DOWLING, 2013)

De tal forma, por mais que a amostra mais espessa apresente um menor valor de fator de intensidade ( $K_Q$ ) comparado aos menos espessos, o que confirma o esperado pela teoria, não se pode concluir com certeza se os valores de  $K_Q$  vão continuar a cair de forma significativa para a geometria escolhida, o que pode impossibilitar que atinja um resultado que possa ser considerado como  $K_{Ic}$ .



(a) TAN11



(b) TAN12

Figura 26 – Amostras de (a) 11 mm e (b) 12 mm de espessura ao término do ensaio.

Fonte: Autoral

Outro ponto a ser comentado sobre os ensaios é o comportamento de propagação da trinca, como mostra na figura 26. Ao longo de todos os testes com amostras de 9 mm até 11 mm de espessura, a trinca se propagou sempre em  $45^\circ$  ou  $-45^\circ$ , mesmos ângulos de orientação utilizados no preenchimento interno dos corpos de prova. Já para as amostras de 12 mm de espessura, a trinca percorreu de forma muito mais sutil, mas ainda tendendo uma orientação de mesma inclinação.

Ao verificar o tamanho das trincas para cálculo dos resultados anteriores, foi reparado que essa divergência de propagação sempre ocorre logo após à fratura, como se antes de atingir o carregamento máximo, a trinca variasse de orientação de forma alternada entre os dois sentidos de impressão interna, até que ao romper escolhe uma definitiva para propagar. Entretanto, para as amostras de 12 mm de espessura (26b), o caso é ainda mais peculiar por apresentar decaimentos de carregamento progressivos ao invés de um único e direto como todos os outros casos.

Com o intuito de investigar esse comportamento normalmente característicos de materiais compostos, foram impressos corpos de prova de 9 mm de espessura com orientação interna de  $0^\circ/90^\circ$ . Abaixo são apresentados os dados obtidos do ensaio médio (TANL9).

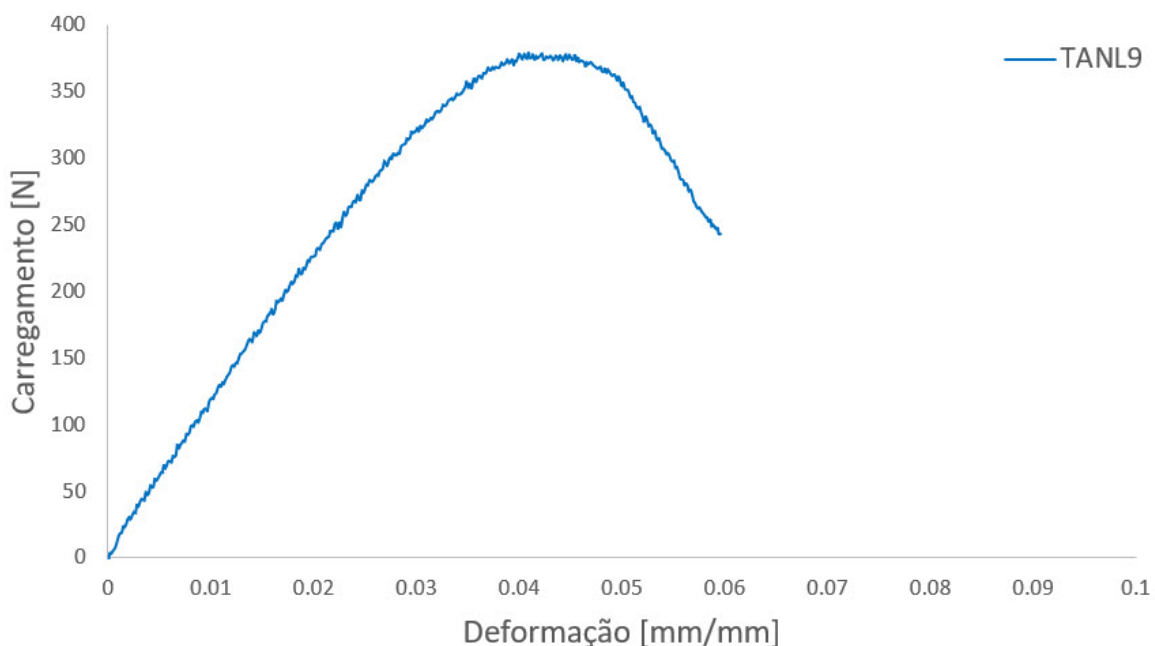


Figura 27 – Curva média de carregamento-deformação no ensaio de tenacidade à fratura com orientação  $0^\circ/90^\circ$ . Fonte: Autoral

Tabela 11 – Resultados do ensaio de tenacidade à fratura com orientação  $0^\circ/90^\circ$ .

Propriedades	TANL9
$P_Q$ (N)	357
$P_{max}/P_Q$	1.06
$a/W$	0.6
$f(a/W)$	13.65
$K_Q$ (MPa $\sqrt{m}$ )	2.85

Fonte: Autoral

Ao olhar o gráfico e os resultados numéricos obtidos, o TANL9 se comportou de forma similar ao TAN9, mudando apenas detalhes no carregamento máximo. Entretanto, a figura 28 mostra um dos corpos de prova com orientação interna diferente ao término do ensaio. E totalmente diferente das amostras com orientação de  $45^\circ/-45^\circ$ , essa apresenta um percurso de propagação de trinca linear, sem variação significativa de sua inclinação.

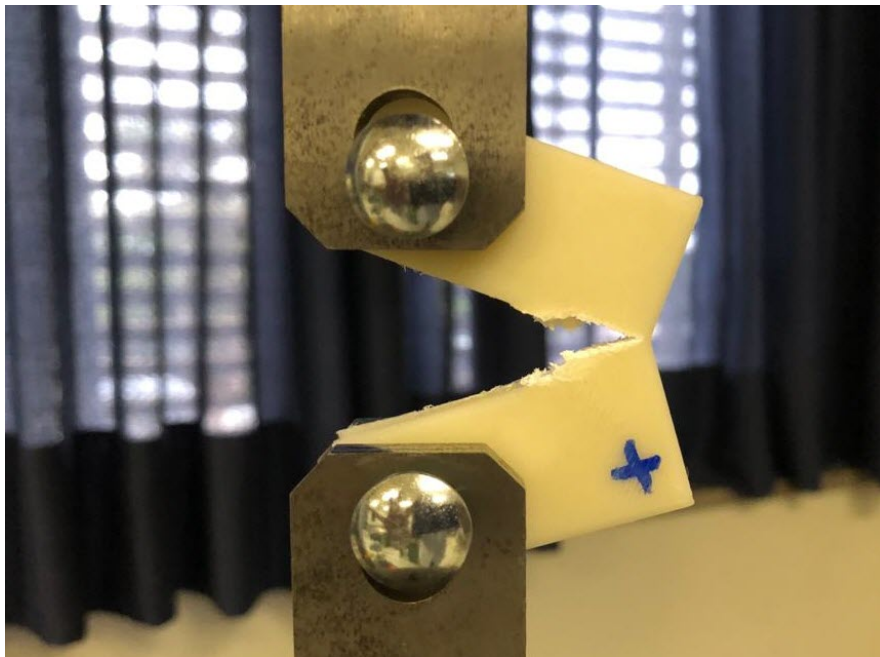


Figura 28 – Amostra de 9 mm de espessura e orientação interna de  $0^\circ/90^\circ$  ao término do ensaio. Fonte: Autoral

Visto que independente da orientação de impressão interna todos os corpos de prova possuem 100% de preenchimento, o que postula as amostras como objetos sólidos e isotrópicos. Entretanto, o ABS Natural por FDM na verdade se comportou como um material anisotrópico ao apresentar comportamento irregular. Conclui-se, portanto, que essa análise experimental com tais orientações de impressão para o ensaio de tenacidade à fratura, torna os resultados inválidos pela teoria, na qual exige que o material seja isotrópico.

## 6 Conclusão

Após realizar todos os ensaios, foi possível utilizar os resultados de tração para uma análise comparativa, cumprindo os objetivos de verificar a influência nas propriedades mecânicas do material, ao alterar um parâmetro de impressão ou impressora. Já o objetivo de definir o valor de tenacidade à fratura não foi atingido, por outro lado, foi levantado dados instigantes sobre seu comportamento no ensaio.

Dos resultados obtidos nos ensaios de tração, pode se esperar ou não variações nas propriedades mecânicas do material quando se altera algum parâmetro de impressão. Para o ensaio com variações de 5°C à 10°C na temperatura de impressão com ABS, tanto natural como reciclado, é um dos casos sem variações significativas.

Pois sabendo que 10°C já é uma variação grande na impressão 3D, fator no qual pode dificultar e afetar na qualidade da impressão, é conclusivo dizer que a preocupação na mudança de temperatura de impressão pode ser menosprezada para o ABS. Independente da temperatura usada, a solicitude de usabilidade das mesmas propriedades mecânicas será mantida, podendo apenas sofrer diferentes resistências à tração.

Agora, a respeito da mudança de instrumento de fabricação e mantendo o mesmo lote de material, é esperado que objetos feitos com ABS e possivelmente com outros polímeros em diferentes impressoras, mantenha as propriedades características do material como o módulo de elasticidade. Por outro lado, a resolução e acabamento pode interferir de forma mais adversa na capacidade de deformação e resistência à tração do mesmo material por FDM.

Na sequência foram atingidas diversas conclusões para o comportamento do ABS por FDM quando é analisado pela teoria da mecânica da fratura. Primeiramente, o ABS passou a se comportar como um material mais dúctil no ensaio de tenacidade comparado ao seu comportamento frágil nos ensaios de tração. Ao realizar os testes de tenacidade à fratura, ficou evidente que o material é influenciado diretamente pela sua orientação de impressão interna, aspecto que anteriormente foi postulado como irrelevante para o ensaio e que agora demanda maior atenção.

Por outro lado, mesmo que a inclinação sofra grande influência pelo método de fabricação, característica na qual só era observada em materiais compostos, os resultados de fator de intensidade permaneceram fiéis à geometria e espessura utilizada ao variar sua orientação interna. Mesmo assim, esses dados só satisfazem numericamente as condições requisitadas, enquanto teoricamente inválida o uso da teoria da mecânica da fratura ao se comportar como um material anisotrópico.



Uma tentativa de contornar esse problema, seria utilizar a facilidade de manipulação na impressão 3D a seu favor. Ao imprimir amostras, variasse as orientações de impressão de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  de forma ordenada e consecutiva ( $0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ$ , por exemplo), afim de tentar tornar o polímero por FDM em um material quasi-isotrópico, o que poderia validar o uso da teoria e dar continuidade na busca pelo valor de tenacidade à fratura.

## 6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com o intuito de prosseguir com os achados desse trabalho, sugere-se:

- Repetir os ensaios de tração com orientação de impressão interna de  $0^\circ/90^\circ$ ;
- Propor nova dimensão na geometria do corpo de prova CT;
- Refazer o ensaio de tenacidade à fratura com corpos de prova que podem se comportar como quasi-isotrópico;
- Realizar uma plastografia na região da fratura para diferentes orientações internas;

# Referências

AHRENS C. H. ; SALMORIA, G. V. . P. A. T. N. F. J. A. . Moldes de abs construídos pelo processo de modelagem por fusão e deposição para injeção de pp e pebd. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 14, n. 5, p. 349–353, dec 2004. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 28.

AL., S.-H. A. et. Anisotropic material properties of fused deposition modeling abs. *Rapid Prototyping*, v. 8, n. 4, p. 248–257, 2002. Citado na página 29.

ANDERSON, T. *Fracture Mechanics*. third. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742: Taylor & Francis Group, 2005. Citado 6 vezes nas páginas 15, 25, 33, 34, 36 e 37.

ASTM D5045. *Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials*. [S.l.], 2014. Citado na página 43.

ASTM D638. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics D638*. [S.l.], 2014. Citado 3 vezes nas páginas 15, 40 e 41.

ASTM E399. *Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness  $K_{IC}$  of Metallic Materials*. [S.l.], 2012. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 43.

AUMNATE, C. e. a. Fabrication of abs/graphene oxide composite filament for fused filament fabrication (fff) 3d printing. *Advances in Materials Science and Engineering*, n. 2830437, p. 242–246, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2830437>. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 32.

BELLEHUMEUR, C. T. e. a. Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 6, n. 2, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 29.

BESKO, M. e. a. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3d. *Gestão, Tecnologia e Inovação.*, v. 1, n. 3, p. 9–18, dec 2017. Citado na página 32.

DOWLING, N. E. *Mechanical Behavior of Materials*. fourth. Saffron House, 6–10 Kirby Street, London EC1N 8TS: Pearson Education Limited, 2013. Citado 11 vezes nas páginas 15, 25, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 42 e 59.

FERNANDES, J. F. M. *Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA*. Dissertação (Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica) — Universidade de Lisboa, oct 2016. Citado 3 vezes nas páginas 15, 30 e 31.

FLASHFORGE, S. *FLASHFORGE GUIDER II* (Acedido em 08/11/2019). Disponível em: <<https://flashforge.com.br/impressoras-3d/impressora-3d-flashforge-guider-ii>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 46.

GRIESER, F. *What Resolution Can 3D Printers Print?* (Acedido em 26/05/2019). 2015. Disponível em: <<https://all3dp.com/3d-printer-resolution/>>. Citado na página 30.

- HORST, D. J. Avaliação da utilização de resinas vegetais para impressão tridimensional através da técnica modelagem por deposição fundida. *Espacios*, v. 38, n. 12, p. 21, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 48.
- JÚNIOR, J. S. e. a. Aspectos ambientais da substituição de componentes em fibra de vidro por componentes em abs (acrilonitrila butadieno estireno) em uma indústria de produção de carrocerias de ônibus. *Science & Engineering Journal*, dec 2014. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 32.
- KLEIN, F. R. *Estudo da degradação térmomecânica e fotooxidativa de poli (Acrilonitrila-Butadienoestireno) para fins de reciclagem primária*. Dissertação (Mestrado) — Universidade federal de Santa Catarina, 2009. Citado na página 32.
- PEREIRA, S. A. G. *Mecânica da fratura em modo misto: Modelação numérica e validação experimental*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2018. Citado na página 25.
- PESSAN, L. A. J. E. H. F. L. A. S. Comportamento mecânico e termo-mecânico de blendas poliméricas pbt/abs. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, mar 1997. Citado na página 32.
- ROSA, E. D. *Análise de resistência mecânica de peças e componentes estruturais*. [S.l.]: Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Mecânica - Grupo de Análise e Projeto Mecânico, 2002. Citado na página 25.
- SILVA, C. M. D. Elaboração de uma linha de extrusão para reciclagem de polímeros (abs e pla). *17o Congresso Nacional de Iniciação Científica - CONIC/SEMESP*, 2017. Citado na página 32.
- SILVA, M. V. B. da. *Caracterização Mecânica de Materiais Utilizados em Prototipagem Rápida por Deposição de Material Fundido para Aplicação Aeroespacial*. [S.l.], 2017. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 29.
- SUN, Q. e. a. Effect of processing conditions on the bonding quality of fdm. *Rapid Prototyping Journal*, v. 14, n. 2830437, p. 72–80, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 25, 28 e 29.
- TEK3D, S. *TEVO Tornado 3D Printer (Acedido em 12/06/2019)*. Disponível em: <<https://www.tek3d.com.br/impresora-3d-aluminio-i3-tek3d-full>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 46.
- TEVO, S. *TEVO Tornado 3D Printer*. Disponível em: <[encurtador.com.br/jlOW2](http://encurtador.com.br/jlOW2)>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 46.
- TYMRAK, B. e. a. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-d printers under realistic environmental conditions. *Materials and Design*, v. 58, p. 242–246, 2014. Citado na página 31.
- WANG, X. e. a. 3d printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B*, v. 110, p. 442–458, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 25, 26, 28 e 29.
- ZELJKA, P. e. a. An introduction to 3d bioprinting: Possibilities, challenges and future aspects. *Rapid Prototyping Journal*, 2018. Citado na página 26.