

Analysis of the influence of defects on the mechanical properties of polymeric materials used in 3D printed parts

Análise da influência de defeitos nas propriedades mecânicas de materiais poliméricos utilizados em peças fabricadas por impressão 3D

Article Info:

Article history: Received 2023-12-28 / Accepted 2023-12-20 / Available online 2024-01-04

doi: 10.18540/jcecv110iss1pp17193



Reinaldo Lube Filho

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0105-2207>

Universidade Federal Fluminense/ Instituto de Pesquisas da Marinha, Brasil

E-mail: reinaldolube@id.uff.br

Antonio Henrique Monteiro Fonseca Thomé da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8310-1701>

Universidade Federal Fluminense/Petrobras, Brasil

E-mail: antoniohmfts@id.uff.br

Vilson Berilli Mendes

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2213-6085>

Instituto de Pesquisas da Marinha, Brasil

E-mail: vilson.mendes@marinha.mil.br

Paulo Arthur Lima de Deus

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2072-7781>

Instituto de Pesquisas da Marinha, Brasil

E-mail: paulo.arthur@marinha.mil.br

Resumo

O trabalho apresenta uma avaliação do desempenho do Políácido Láctico (PLA) e Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS) em corpos de provas produzidos por processo de manufatura aditiva (impressão 3D) com defeitos controlados, visando verificar como diferentes geometrias desses defeitos afetam as propriedades mecânicas. A partir do planejamento de experimentos e análise estatística realizada, confirmou-se a influência da geometria desses defeitos e do material nas propriedades mecânicas avaliadas.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. Impressão 3D. Comportamento Mecânico. Materiais Poliméricos.

Abstract

The work presents an evaluation of the performance of Polylactic Acid (PLA) and Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) in test specimens produced by additive manufacturing (3D printing) with controlled defects, aiming to assess how different geometries of these defects affect mechanical properties. Through experimental design and statistical analysis, the influence of defect geometry and material on the evaluated mechanical properties was confirmed.

Keywords: Additive Manufacturing. 3D Printing. Mechanical Behavior. Polymeric Materials.

1. Introdução

A manufatura aditiva (MA), popularmente conhecida como impressão 3D, é uma tecnologia desenvolvida desde o final da década de 1980 e continua em pleno desenvolvimento com novas impressoras surgindo a cada dia, utilização de materiais com características distintas e que podem ser utilizados em diversos tipos de aplicação, desde o uso mais cotidiano, como para decoração e prototipagem rápida até aplicações que exigem maior responsabilidade técnica, como na fabricação de peças para equipamentos ou que tenham que suportar carregamentos específicos.

O fluxo do processo de impressão 3D ocorre a partir da criação de um modelo tridimensional através de um software CAD (Computer-Aided-Design) (GORNÍ, 2001) e o processo de qualificação de peças impressas se dá a partir de normas específicas, como a API20T.

Este modelo é convertido para um arquivo em formato de estereolitografia (STL), que simplifica o modelo original para um conjunto de elementos triangulares. O formato STL tem a vantagem de ser compatível com a maioria dos sistemas CAD. Por meio de um software específico, este arquivo é então dividido horizontalmente (ou fatiado) em diversas camadas (Figura 1) representando os contornos bidimensionais, que quando depositadas umas sobre as outras através do processo denominado Fused Deposition Modeling (FDM) formam o modelo tridimensional original (AHN *et al.*, 2002), sendo, dentre os vários disponíveis, o método utilizado neste trabalho.

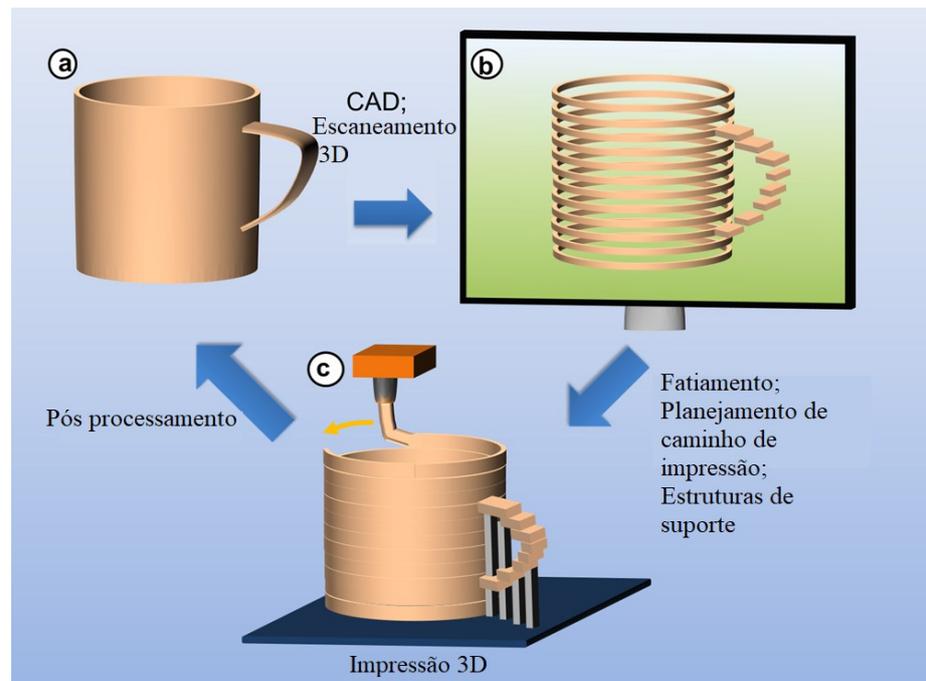


Figura 1 - Conceito básico do processo de MA. Traduzido de (LIGON *et al.* 2017)

Dentre os materiais que podem ser utilizados para impressão, os mais comuns são o PLA e o ABS, uma vez que são facilmente encontrados no mercado, de custo acessível, podendo ser utilizados em diversas aplicações.

A depender da aplicação da peça impressa, é de extrema importância conhecer o comportamento mecânico e térmico do material. É possível prever o comportamento térmico das peças por meio das características especificadas pelo fabricante do material. Conforme tabela 1, referente às características térmicas do PLA e ABS do fabricante 3DLAB (2023), é possível observar que o PLA é um material que exige menores temperaturas de impressão ($T_{\text{impressão}}$) e de mesa (T_{mesa}) em relação ao ABS.

Tabela 1 – Temperaturas de transição vítrea (T_g), de impressão e mesa do PLA e ABS. (3DLAB, 2023)

Material	T_g /°C	$T_{\text{impressão}}$ /°C	T_{mesa} /°C
ABS	99	210 - 250	90 - 120
PLA	55 - 60	195 - 220	55 - 70

Como pode ser observado na tabela 1, a T_{mesa} é uma temperatura próxima da temperatura de transição vítrea (T_g), o que auxilia na aderência da peça durante a impressão. Por outro lado, podemos inferir que uma peça impressa em PLA provavelmente se deformará com certa facilidade quando utilizados em aplicações sujeitas a ambientes com temperaturas elevadas ($T > 60^\circ\text{C}$), o que torna o ABS mais recomendável para estes tipos de aplicação.

Os parâmetros de controle do processo que provavelmente podem afetar as propriedades mecânicas das peças FDM são: Bead width, Air gap, Model build temperature, Raster orientation e color (AHN *et al.*, 2002). O foco deste trabalho é avaliar o desempenho mecânico devido a possibilidade de ocorrência de Air gap (lacuna) em peças fabricadas por FDM.

Air gap (lacuna) é o espaço entre os grânulos de material FDM, sendo o padrão zero, o que significa que os grânulos apenas se tocam. Portanto, uma lacuna positiva significa que os grânulos de material não se tocam, o que resulta em uma estrutura frágil que cresce rapidamente (AHN *et al.*, 2002).

A presença de vazios é um dos principais defeitos encontrados em polímeros e compósitos de matriz polimérica, sendo extremamente difícil evitá-los por completo. Esses defeitos podem comprometer o comportamento estrutural das peças, uma vez que são pontos potenciais de concentração de tensão, além de favorecer a absorção de água e aumentar os vazios pré-existentes (WOLFF, 1993).

Relativo à resistência mecânica, de acordo com a ficha técnica dos filamentos (3DLAB, 2023), os corpos de prova (CP) impressos têm as seguintes características:

Tabela 2. Características mecânicas dos CP impressos em PLA e ABS (3DLAB, 2023).

	ABS	PLA	Norma
Tensão de escoamento / MPa	14,7	28,4	ASTMD638
Módulo de elasticidade / MPa	1335,9	1896	ASTMD638
Tensão de ruptura / MPa	29	46	ASTMD638
Dureza / Shore D	74	85	ASTMD2240
Alongamento / %	7,08	3,69	ASTMD638

De acordo com WOLFF (1993), um dos principais defeitos encontrados em polímeros e compósitos de matriz polimérica são os vazios, que podem comprometer o comportamento estrutural das peças fabricadas. Estes vazios podem ser induzidos no processo de fabricação por bolhas de ar formadas nas peças por motivos variados, como subprodutos voláteis que se encontram na matriz do material, erros de fabricação, entre outros. Para ELKOLALI *et al.* (2022) a presença dos vazios, além de afetar as propriedades mecânicas, pode também aumentar a penetração de água.

Outra informação de extrema importância na resistência mecânica das peças fabricadas em 3D é a anisotropia de fabricação da peça. Segundo LOVO e FORTULAN (2017) e CHACÓN *et al.* (2017) a direção das camadas influencia diretamente na resistência da peça. No trabalho realizado por LOVO e FORTULAN (2017) foi realizado teste de tração em peças impressas e foi observado que num CP fabricado com deposição de material nas direções opostas ao carregamento [90°] (Figura 2a) resistiram a 40% do valor obtido para a matéria prima utilizada no estudo, na direção cruzada ao carregamento [$45^\circ/-45^\circ$], 78% (Figura 2b) e nas direções [$0^\circ/90^\circ$] (Figura 2c) 85%.

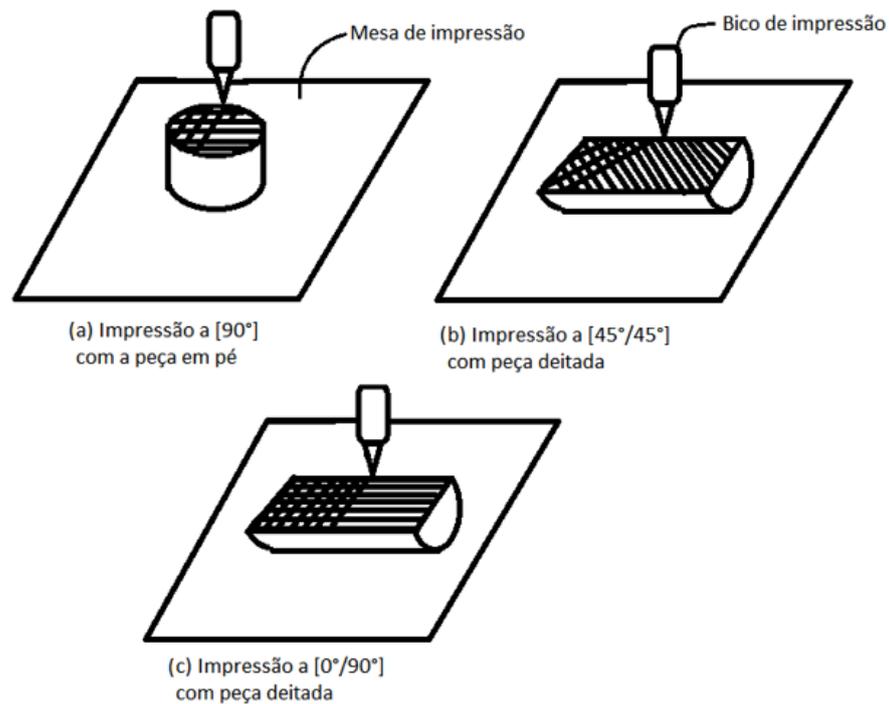


Figura 2 - Direções de deposição de filamento em peças que sofrerão carga axial: (a) [90°]; (b) [45°/- 45°]; (c) [0°/90°]. (Adaptado de LOVO e FORTULAN)

A direção de impressão pode ser controlada no software gerador do arquivo .gcode, porém o posicionamento da peça no software é fundamental para que a impressão seja feita da melhor forma, conforme pode ser verificado nas Figuras 2a e 2c, onde a impressão da peça onde a deposição de material foi realizado na direção da carga aplicada foi determinante para uma maior resistência mecânica. A Figura 3 (LOVO e FORTULAN, 2017) mostra um esquema de impressão onde são apresentadas duas camadas consecutivas em direções diferentes.

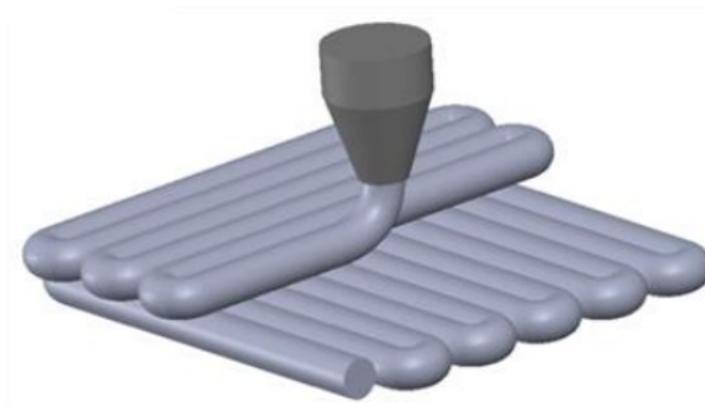


Figura 3 - Esquema de impressão de duas camadas consecutivas. (LOVO e FORTULAN, 2017)

2. Materiais e Métodos

Neste trabalho, foram fabricados até 06 corpos de provas padronizados e testados conforme norma ISO 527-2, CP tipo 1A (2012) pelo processo de MA utilizando os materiais PLA e ABS. Foram realizados ensaios destrutivos de tração, onde foram registrados os valores da tensão aplicada no CP em função de sua deformação, sendo avaliados os resultados de Módulo de Young e Tensão e Deformação Máximas, com posterior tratamento estatístico dos dados. Os ensaios foram realizados conforme norma ISO 527, em uma máquina de ensaio Filizola, modelo BME-20kN, pertencente ao Laboratório de Materiais do IPqM, utilizando-se uma velocidade de deslocamento de 50 mm/min até a ruptura e célula de carga de 20kN.

Os CP foram projetados em software CAD conforme Figura 4, abaixo e as dimensões básicas conforme tabela 3, que é um extrato da tabela 1 da norma ISO 527-2 (2012) – página 5.

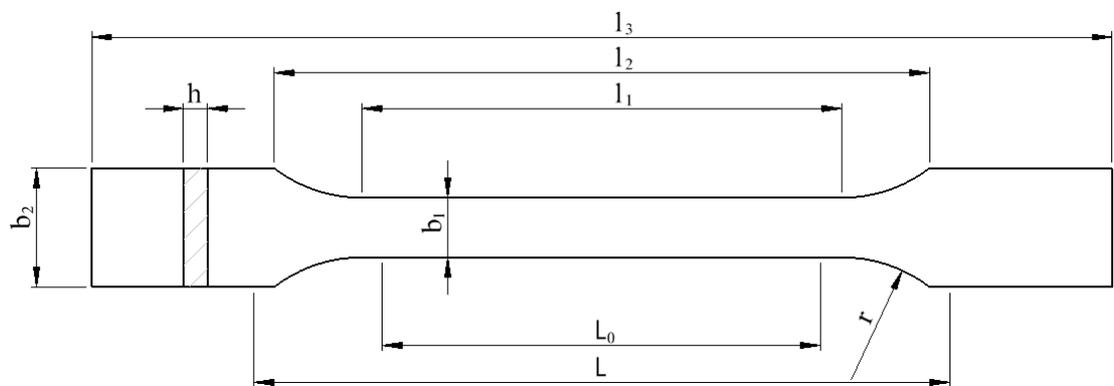


Figura 4 - Desenho dos CP. (ISO 527-2 2012)

Tabela 3. Dimensões do CP da Figura 2 (ISO 527-2 2012 – tabela 1, coluna 1A, página 5).

Dimensão / mm	1A
l_3	170
l_1	80 ± 2
r	24 ± 1
l_2	$109,3 \pm 3,2$
b_2	$20 \pm 0,2$
b_1	$10 \pm 0,2$
h	$4 \pm 0,2$
L_0	$75 \pm 0,5$
L	115 ± 1

Os defeitos foram distribuídos nos CP conforme Figura 5 abaixo sendo o espaçamento entre defeitos detalhado na Figura 6 (o posicionamento para círculos e losangos é a mesma nos CP).

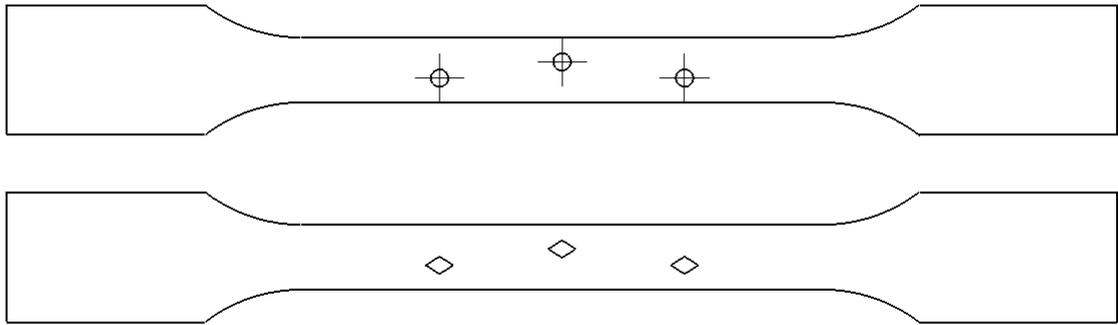


Figura 5 - Desenhos dos CP com defeitos.

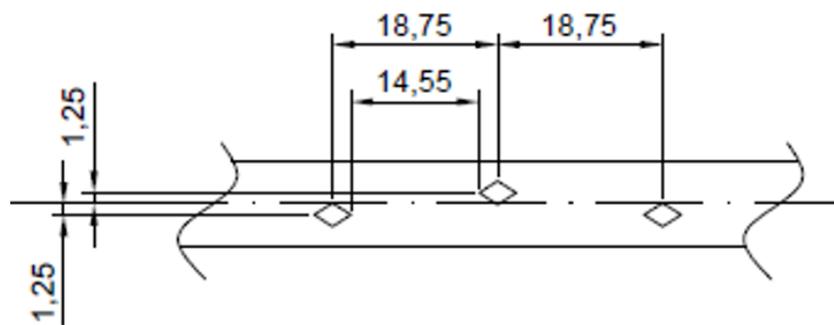


Figura 6 - Posicionamento dos defeitos no CP.

Todos os defeitos foram feitos com a mesma área conforme tabela 4.

Tabela 4. Dimensões dos defeitos.

	Círculo	Losango
Dimensões / mm	Ø 2,68	D = 4,2 d = 2,69
Área / mm ²	5,7	5,7
Dimensão alinhada axialmente ao CP	2,668	4,2

Os CP foram impressos no Laboratório de Prototipagem Mecânica (LabProM) do Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), em impressora 3D modelo Creality Ender 3 Pro que utiliza filamentos de diversos materiais com Ø 1,75 mm e bico de impressão de 0,4 mm e os arquivos. gcode foram gerados no software Ultimaker Cura, versão Arachne Engine Beta 99.9.1. Para a impressão foram utilizados os filamentos da empresa 3DLAB, tanto PLA quanto ABS.

Para as peças foi utilizada direção de impressão [90°/90°] posicionadas deitadas na mesa de impressão, ou seja, todas as linhas de impressão na direção de aplicação da carga de tração conforme Figura 7.

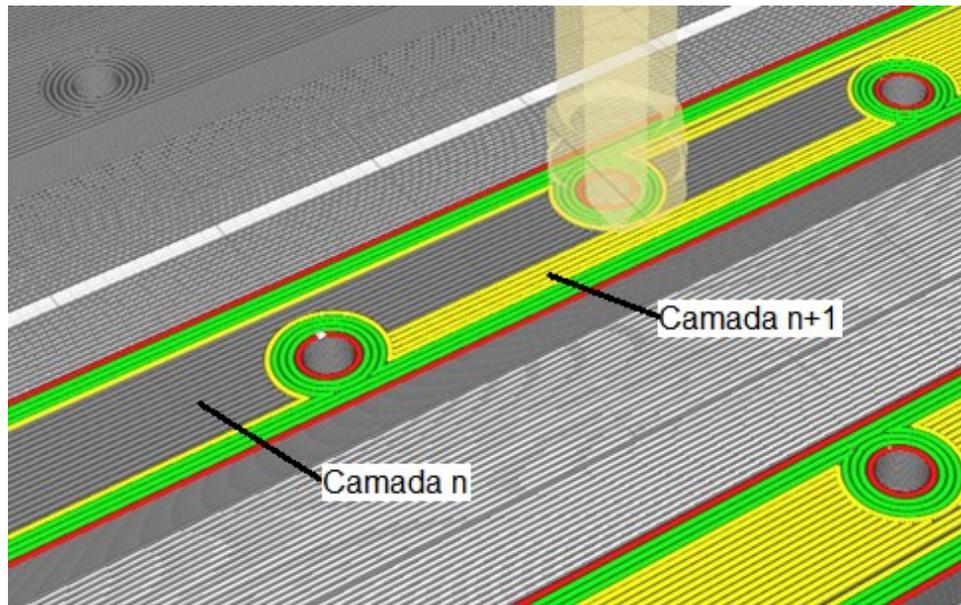


Figura 7 - Direção de impressão dos CP a [90°/90°].

Na tabela 5 estão especificados os principais parâmetros de impressão.

Tabela 5. Principais parâmetros de impressão utilizando na fabricação dos CP.

Parâmetro	ABS	PLA
Temperatura bico / °C	225	200
Temperatura mesa / °C	110	60
Altura da camada / mm		0,2
<i>Infill</i> (preenchimento)		100%
Velocidade de impressão / mm/s		60

Os dados gerados foram compilados e analisados no software Statistica®, utilizando a metodologia de análise de variância (ANOVA) a partir de um planejamento de experimentos do tipo 2², ou seja, dois fatores (material e geometria do defeito), cada um a dois níveis, ou seja, material PLA x material ABS e geometria circular x geometria com cantos vivos. A tabela 6 mostra o planejamento de experimentos 2² onde, para os níveis inferiores (-1) temos o formato circular e material PLA e nos superiores (1), o formato losangular e material ABS.

Tabela 6. Planejamento de experimentos.

CP	Círculo	Losango
1	-1	-1
2	-1	1
3	1	-1
4	1	1

Visando verificar a possibilidade de se utilizar a estatística paramétrica, inicialmente serão analisados os critérios para atender a este tipo de análise, quais sejam a homogeneidade das variâncias (homocedasticidade) e normalidade dos resíduos. A normalidade dos resíduos foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors e a homoscedasticidade foi avaliada a partir dos testes de Cochran-Bartlet e Levene's. Os diferentes grupos de ensaios foram comparados a partir do teste de Fisher LSD. A avaliação de significância dos fatores de entrada assim como todas as avaliações anteriores utilizaram um nível de significância de $\alpha=0,05$.

3. Resultados e discussão

A tabela 7 apresenta os resultados obtidos nos grupos de ensaios de 1 a 4, cada um com até 6 réplicas.

Tabela 7. Resultados dos ensaios mecânicos.

Modelo CP	Nº CP	Módulo / MPa	Tensão máxima / MPa	Deformação máxima / %
1	1	3167,46	30,025	0,952
	2	3442,75	29,35	0,952
	3	3176,56	30,1	0,895
	4	3152,83	31,175	0,971
	5	3612,99	34,3	1,143
	6	3491,56	31,075	0,914
2	1	3097,66	32,75	1,067
	2	3324,28	32,95	0,99
	3	3094,14	33,6	1,086
	4	3213,4	25,275	0,781
	5	3352,31	32,675	1,029
	6	3340,69	18,025	0,571
3	1	1718,54	20,65	3,733
	2	722,428	20,95	0,99
	3	1049,61	20,3	1,124
	4	1559,84	22,35	1,162
	5	1588,83	23,55	1,352
4	1	1985,46	20,275	1,39
	2	1258,53	21,375	1,219
	3	2032,32	21,975	1,143
	4	1986,79	22,35	1,486
	5	955,989	23,325	1,448

3.1 Módulo de Young

A Figura 8 mostra a distribuição dos resíduos em função dos valores previstos pelo modelo matemático proposto pela ANOVA. Foram filtrados os resultados que apresentaram maiores resíduos, de forma a garantir tanto quanto possível a homoscedasticidade.

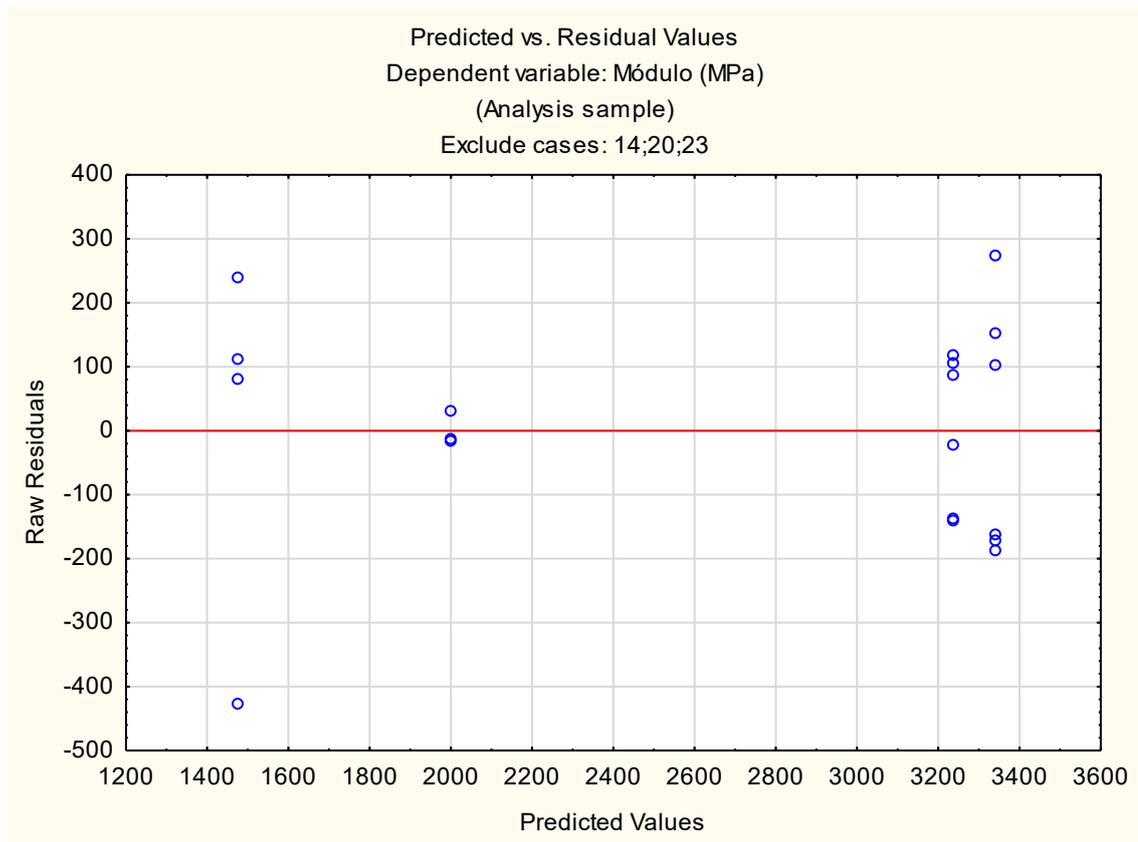


Figura 8 - Gráfico de valores previstos x resíduos - módulo.

Nas tabelas 8 e 9 são realizados os testes de Cochran-Bartlett e Levene's que verificam a homocedasticidade.

Tabela 8. Teste de Cochran-Bartlett para homocedasticidade.

Tests of Homogeneity of Variances (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)
Effect: Formato*Material
Exclude cases: 14;20;23

	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr	df	p
Módulo / MPa	121,9103	0,611938	8,041892	3	0,045154

Tabela 9. Teste de Levene's para homocedasticidade.

Levene's Test for Homogeneity of Variances (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)
Effect: Formato*Material
Degrees of freedom for all F's: 3, 15
Exclude cases: 14;20;23

	MS Effect	MS Error	F	p
Módulo / MPa	26974,37	6748,184	3,997278	0,028197

Apesar da H_0 ser rejeitada em ambos os testes ($p < 0,05$), no teste de Cochran-Bartlett o valor encontrado é muito próximo do valor de não-rejeição ($p = 0,045$).

No histograma apresentado na Figura 9 é possível verificar a distribuição dos valores de resíduos. No mesmo gráfico é mostrado o resultado da estatística p para os testes de Shapiro-Wilks ($p=0,30$) e Lilliefors ($p=0,20$). Dado que $p > 0,05$ não se rejeita a H_0 , confirmando a normalidade dos resíduos.

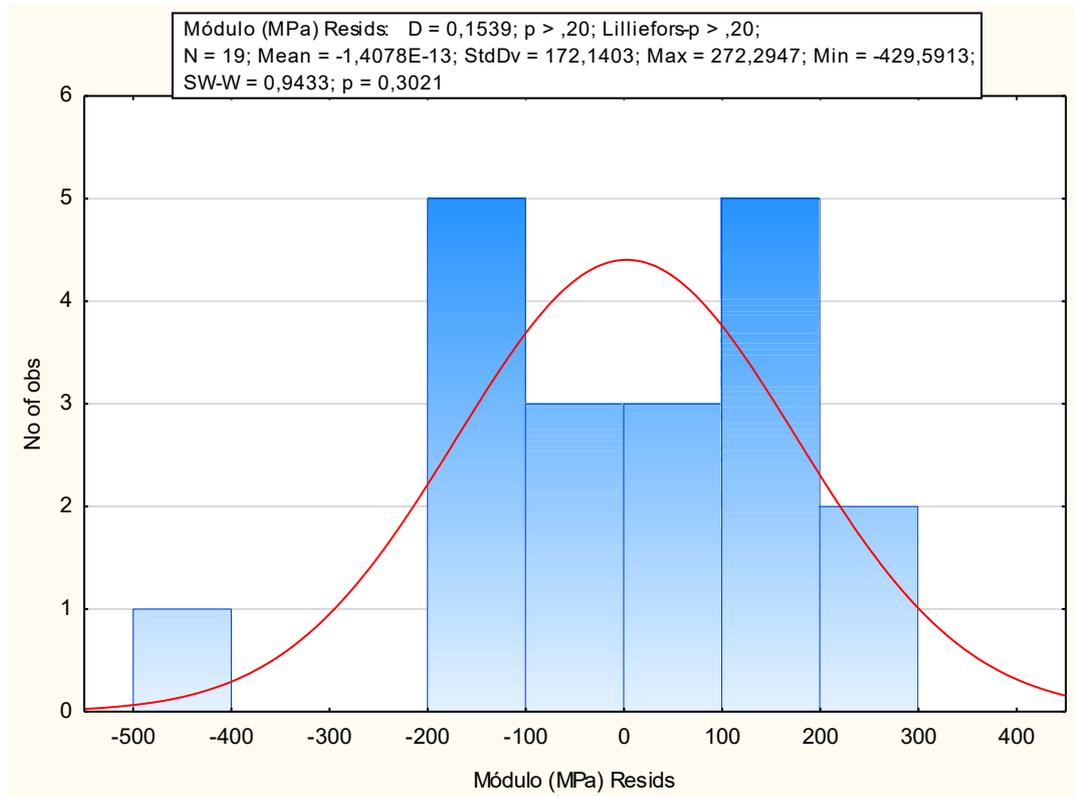


Figura 9 - Histograma dos resíduos - módulo.

Na tabela 10 são mostrados os efeitos principais e de interação das variáveis, onde é considerado como H_0 que os fatores de entrada analisados não influenciam no efeito estudado, neste caso, no módulo.

Tabela 10. Efeito das variáveis.

Univariate Results for Each DV (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)
Sigma-restricted parameterization
Effective hypothesis decomposition
Exclude cases: 14;20;23

Effect	Módulo/ MPa SS	Módulo/ MPa MS	Módulo/ MPa p
Intercept	110370957	110370957	0,000000
Formato	191253	191253	0,034906
Material	10463629	10463629	0,000000
Formato*Material	427405	427405	0,003450

Como pode ser observado, em todos os casos a H_0 é rejeitada, o que significa que os fatores analisados influenciam diretamente no módulo. Já a coluna MS (média quadrática) nos revela qual variável tem mais influência no módulo. Neste caso, o material é o fator de maior influência (maior valor de MS).

Seguindo com a análise da interação de variáveis, é apresentado o gráfico da Figura 10, onde são mostrados os efeitos do material (eixo x) e formato dos defeitos (linhas azul e vermelha) no módulo (eixo y).

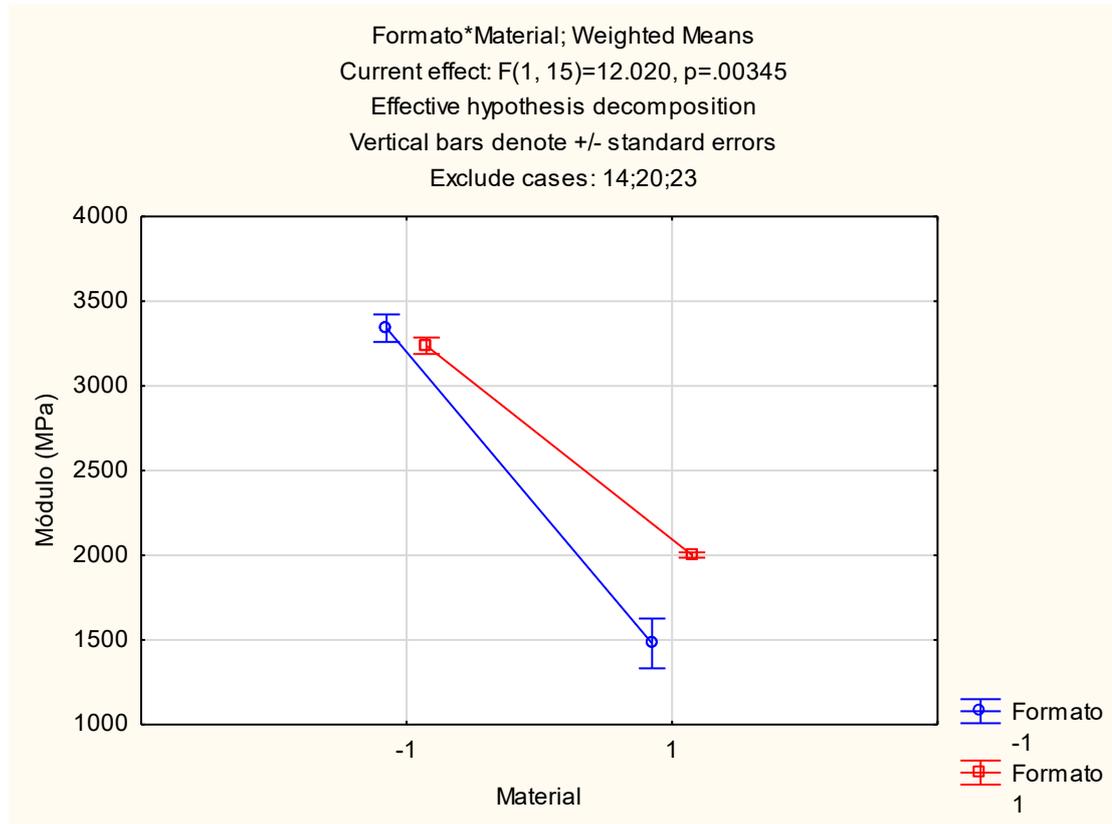


Figura 10 - Gráfico do material e formato do defeito no módulo.

Verifica-se através do gráfico uma considerável diminuição do módulo em função do material, onde os valores são maiores para os CP feitos em PLA (-1). Os diferentes resultados para os módulos dos grupos de ensaio 1 a 4 são comparados entre si a partir do teste de Fisher LSD, como mostrado na Tabela 11.

Tabela 11. Tabela de teste Fisher LSD de comparação de pares de intervalos de dados de módulo.

LSD test; variable Módulo (MPa) (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)
 Probabilities for Post Hoc Tests
 Error: Between MS = 35559., df = 15.000
 Exclude cases: 14;20;23

Cell No.	Formato	Material	{1}	{2}	{3}	{4}
1	-1	-1		0,000000	0,356339	0,000000
2	-1	1	0,000000		0,000000	0,002486
3	1	-1	0,356339	0,000000		0,000000
4	1	1	0,000000	0,002486	0,000000	

Pela tabela, considerando a H_0 de que não há diferença entre o par de intervalos de dados comparados, a única comparação onde $p > 0,05$ é a 1 x 3, que correspondem aos dois tipos de defeitos dos CPs feitos em PLA ($p = 0,36$). Isto confirma o que pode ser verificado visualmente na Figura 10, ou seja, para os CPs em PLA, não houve impacto da geometria do dano no módulo. Já para os CPs produzidos em ABS, a geometria teve um impacto estatisticamente significativo no módulo ($p=0,002$), sendo os módulos em torno de 500MPa menores obtidos com dano do tipo circular (1500MPa) em comparação ao dano do tipo losango (2000MPa).

3.2 Tensão Máxima

Para esta será utilizada a mesma abordagem de análise que foi feita para o módulo. Na Figura 11 estão os valores previstos x resíduos.

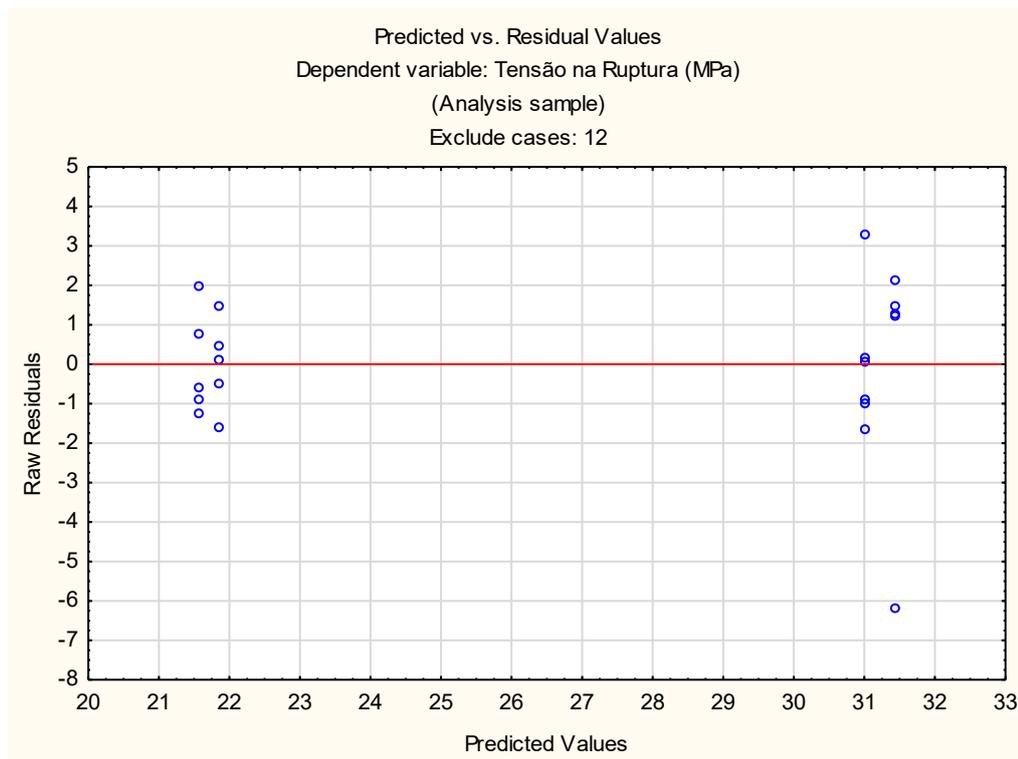


Figura 11 - Gráfico de valores previstos x resíduos.

No teste da homocedasticidade de Cochran-Bartlett (tabela 12), a H_0 não é rejeitada ($p = 0,118$), logo não há diferença nas variâncias, demonstrando a homogeneidade das variâncias da amostra. O resultado é confirmado também pelo teste de Levene's, na tabela 13 ($p=0,22$).

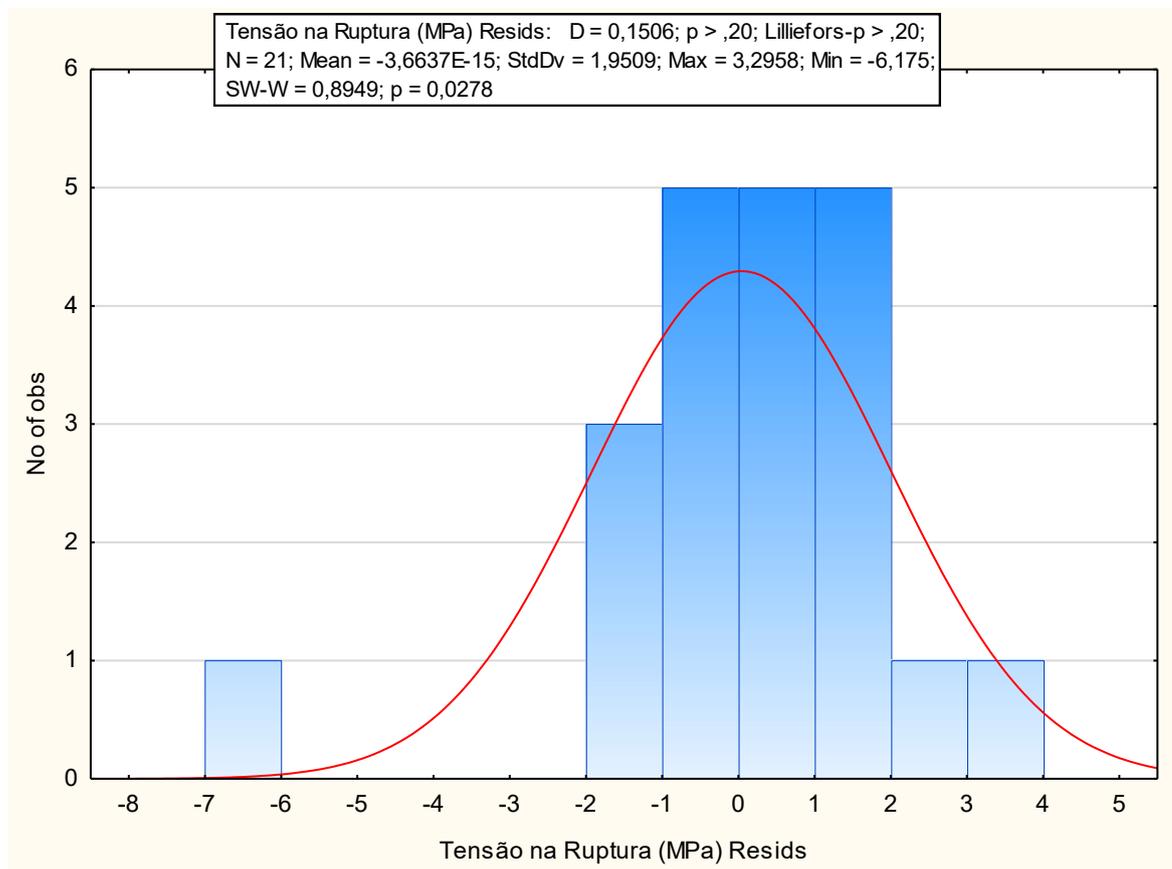
Tabela 12. Teste de Cochran-Bartlett para homocedasticidade.

Tests of Homogeneity of Variances (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)					
Effect: Formato*Material					
Exclude cases: 12					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr	df	p
Tensão na Ruptura/ MPa	9,363464	0,659825	5,866736	3	0,118277

Tabela 13. Teste de Levene's para homocedasticidade.

Levene's Test for Homogeneity of Variances (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)				
Effect: Formato*Material				
Degrees of freedom for all F's: 3, 17				
Exclude cases: 12				
	MS Effect	MS Error	F	p
Tensão na Ruptura / MPa	2,688048	1,627310	1,651835	0,214908

Foi então gerado o gráfico da Figura 12, onde se verifica a não rejeição da H_0 pelo teste de Lilliefors ($p=0,20$), demonstrando a normalidade de resíduos, embora tal hipótese tenha sido rejeitada por Shapiro-Wilks ($p=0,03$).

**Figura 12 - Histograma dos resíduos – tensão na ruptura.**

Na tabela 14, do efeito dos fatores de entrada sobre a variável de resposta tensão máxima, a H_0 não é rejeitada para o formato e para a interação entre o formato e material, ou seja, estes fatores de entrada não têm influência na tensão máxima para o nível de significância adotado. Apenas o material teve influência significativa ($p \rightarrow 0$).

Tabela 14. Efeitos das variáveis.

Univariate Results for Each DV (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)
 Sigma-restricted parameterization
 Effective hypothesis decomposition
 Exclude cases: 12

Effect	Tensão na Ruptura / MPa SS	Tensão na Ruptura / MPa MS	Tensão na Ruptura / MPa p
Intercept	14620,88	14620,88	0,000000
Formato	0,73	0,73	0,692304
Material	472,56	472,56	0,000000
Formato*Material	0,03	0,03	0,938183

Pelo gráfico da Figura 13 são mostrados os efeitos do material (eixo x) e formato dos defeitos (linhas azul e vermelha), desta vez na tensão de ruptura (eixo y).

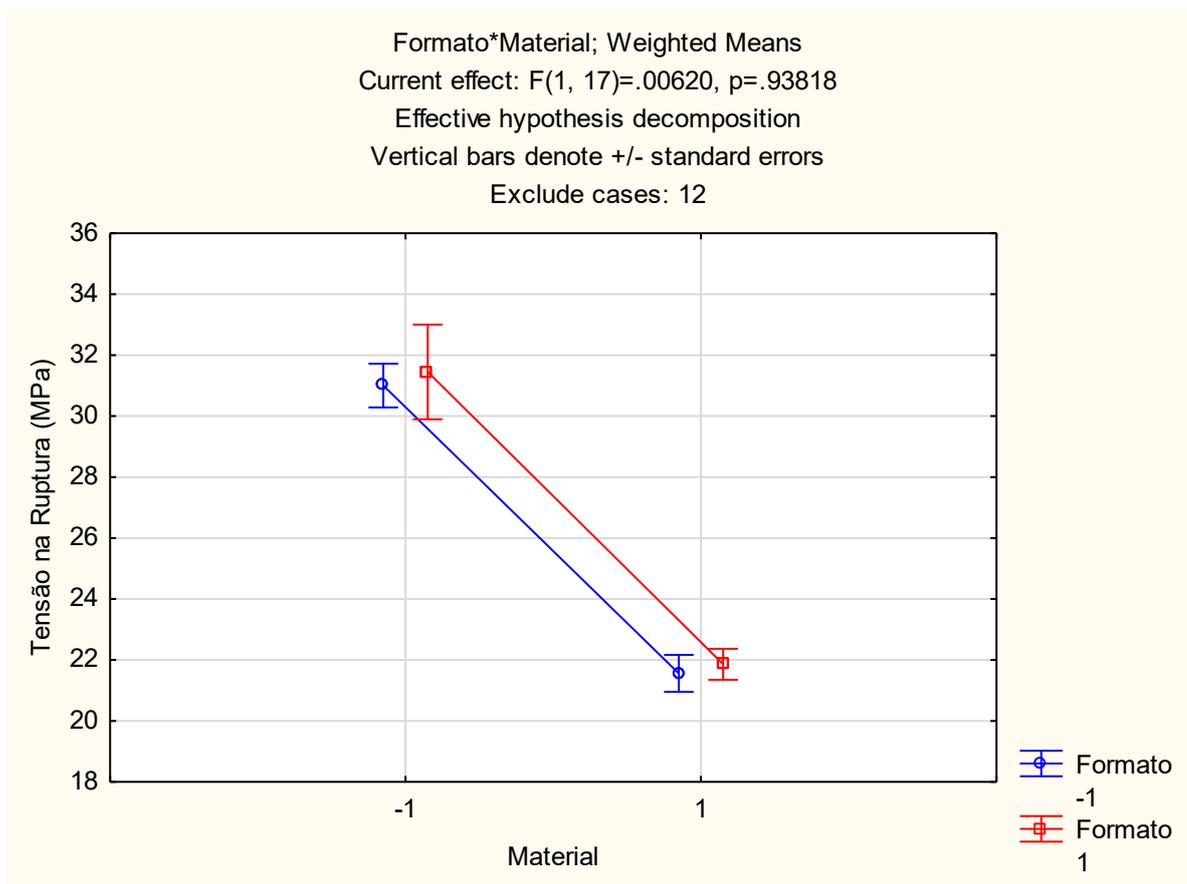


Figura 13 - Gráfico do material e formato do defeito na tensão máxima.

Realizando análise semelhante à feita para o módulo, pode-se verificar através do gráfico uma considerável diminuição da tensão máxima em função do material, onde os valores são maiores para os CP feitos em PLA (-1). No caso dos tipos de defeitos é possível verificar, através da tabela 15

que, de fato, a geometria não foi significativa tanto para os cps em PLA ($p=0,73$) quanto para os CPs em ABS ($p=0,82$).

Tabela 15. Tabela de teste Fisher LSD de comparação de pares de intervalos de dados de tensão de ruptura.

Cell No.	Formato	Material	{1}	{2}	{3}	{4}
1	-1	-1		0,000001	0,732155	0,000002
2	-1	1	0,000001		0,000001	0,825304
3	1	-1	0,732155	0,000001		0,000002
4	1	1	0,000002	0,825304	0,000002	

3.3 Deformação Máxima

Continuando a análise, desta vez da deformação máxima, na Figura 14 é apresentado o gráfico de valores previstos x resíduos.

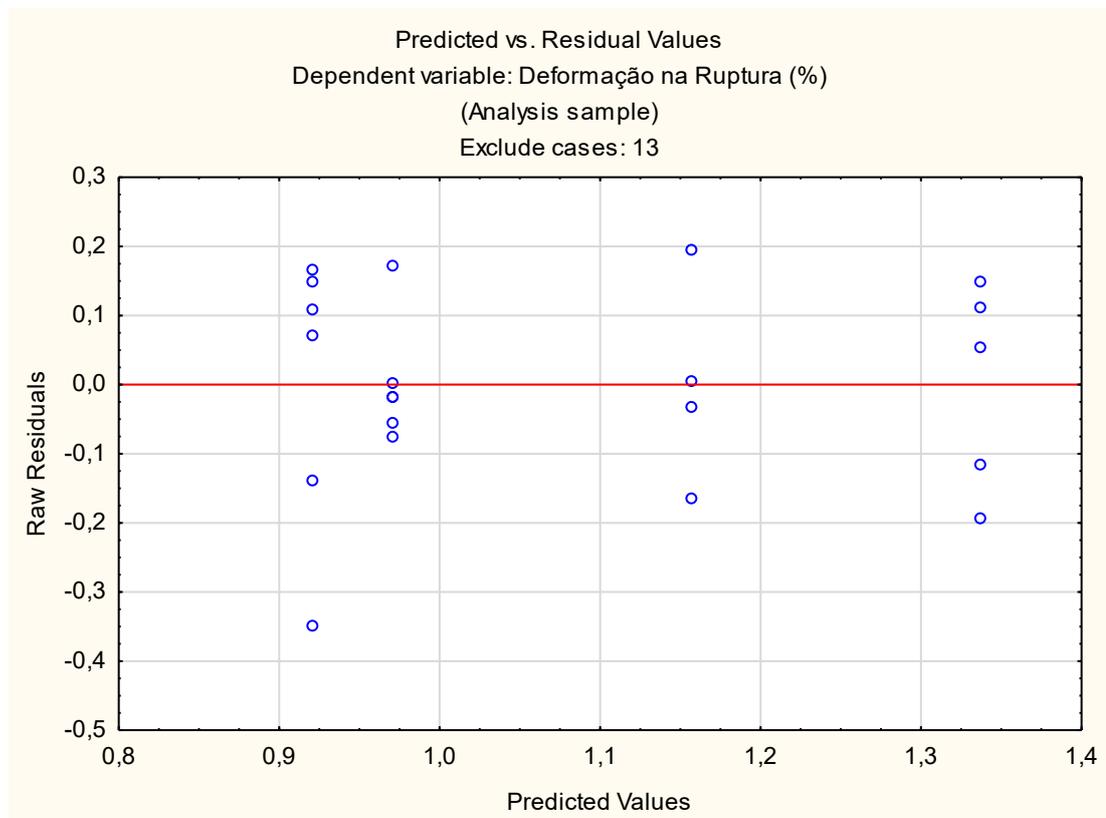


Figura 14 - Gráfico de valores previstos x resíduos.

No teste da homocedasticidade de Cochran-Bartlett (tabela 16), a H_0 não é rejeitada ($p = 0,42$), logo não há diferença nas variâncias, o que é confirmado pelo teste de Levene's na tabela 17 ($p = 0,17$), demonstrando a homogeneidade das variâncias da amostra.

Tabela 16. Teste de Cochran-Bartlett para homocedasticidade.

Tests of Homogeneity of Variances (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)					
Effect: Formato*Material					
Exclude cases: 12					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr	df	p
Deformação na Ruptura /%	5,264708	0,441294	2,841678	3	0,416685

Tabela 17. Teste de Levene's para homocedasticidade.

Levene's Test for Homogeneity of Variances (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)				
Effect: Formato*Material				
Degrees of freedom for all F's: 3, 17				
Exclude cases: 12				
	MS Effect	MS Error	F	p
Deformação na Ruptura /%	0,011685	0,006172	1,893274	0,169057

Gerado então o gráfico da Figura 15, onde se verifica pelo teste de Lilliefors ($p = 0,20$) e Shapiro-Wilks ($p = 0,37$) a não rejeição da H_0 , confirmando assim a normalidade dos resíduos.

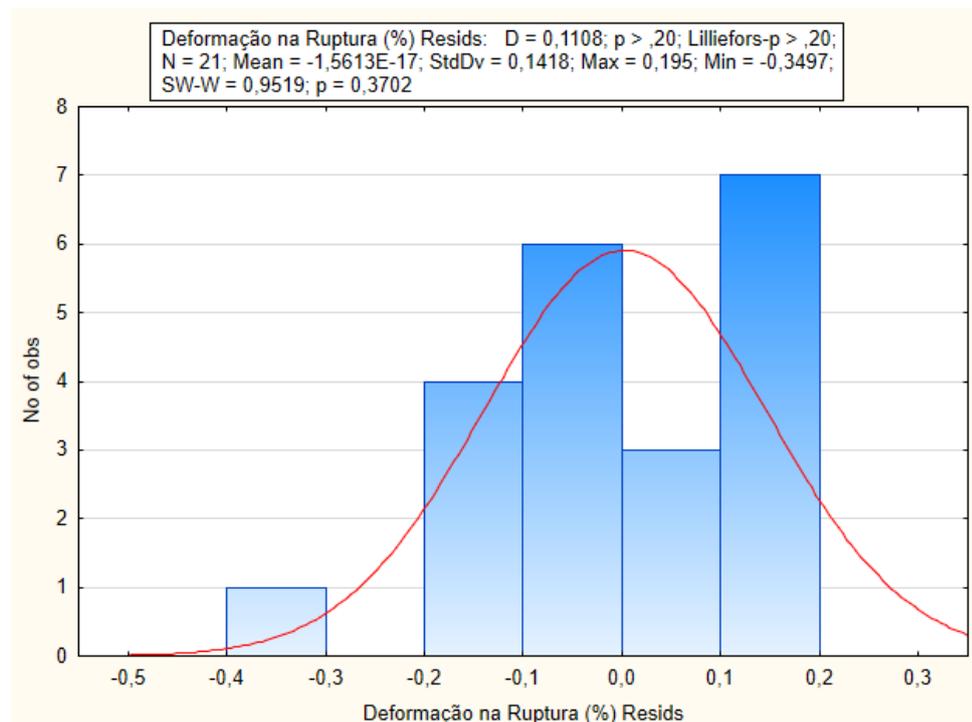


Figura 15 - Histograma dos resíduos – Deformação na ruptura.

Na análise da tabela 18 do efeito dos fatores de entrada sobre a variável de resposta deformação máxima, assim como para a tensão máxima, a H_0 não é rejeitada para o formato e a interação entre o formato e material, ou seja, estes fatores de entrada não têm influência na deformação máxima para o nível de significância adotado. Apenas o material teve influência significativa ($p \rightarrow 0$).

Tabela 18. Efeito das variáveis.

Univariate Results for Each DV (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)
Sigma-restricted parameterization
Effective hypothesis decomposition
Exclude cases: 13

Effect	Deformação na Ruptura /% SS	Deformação na Ruptura /% MS	Deformação na Ruptura /% p
Intercept	24,55824	24,55824	0,000000
Formato	0,02148	0,02148	0,354145
Material	0,46321	0,46321	0,000371
Formato*Material	0,06794	0,06794	0,108429

Pelo gráfico da Figura 16, onde também são mostrados os efeitos do material (eixo x) e formato dos defeitos (linhas azul e vermelha), desta vez na deformação máxima (eixo y).

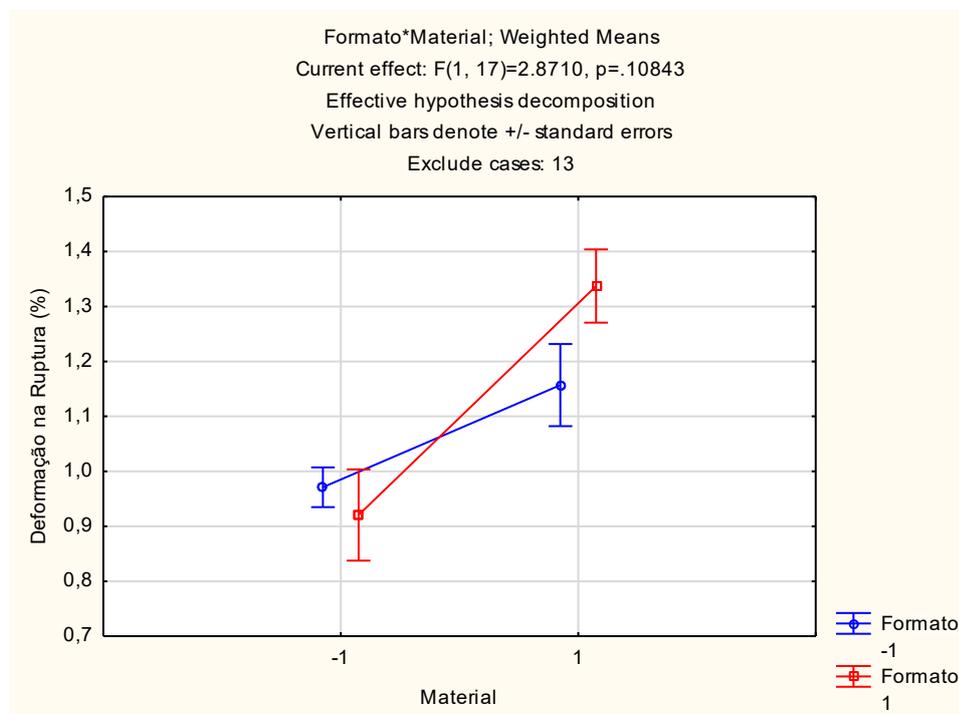


Figura 16 - Gráfico do material e formato do defeito na deformação máxima.

Desta vez, diferentemente dos gráficos para o módulo e tensão máxima, pode-se verificar através do gráfico um considerável aumento da tensão máxima em função do material, onde os valores são maiores para os CP feitos em ABS (1).

No caso dos tipos de defeitos é possível verificar, através da tabela 19 que, a geometria não foi significativa tanto para os CPs em PLA ($p=0,58$) quanto para os CPs em ABS ($p=0,099$). Para os defeitos circulares, onde $p=0,079$, o material não foi significativo, porém, para os losangos, o material foi estatisticamente significativo ($p=0,00034$), onde o PLA teve uma deformação de cerca de 0,9%, enquanto o ABS de cerca de 1,35% (uma diferença de 0,45%).

Tabela 19. Tabela de testes LSD – Fisher.

LSD test; variable Deformação na Ruptura (%) (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)						
Probabilities for Post Hoc Tests						
Error: Between MS = .02367, df = 17.000						
Excluye cases: 13						
Cell No.	Formato	Material	{1}	{2}	{3}	{4}
1	-1	-1		0,078599	0,577074	0,001081
2	-1	1	0,078599		0,029288	0,098822
3	1	-1	0,577074	0,029288		0,000336
4	1	1	0,001081	0,098822	0,000336	

4. Conclusão

De forma geral, foi possível concluir que as propriedades mecânicas dos materiais escolhidos para impressão 3D de peças são, como esperado, fortemente dependentes dos materiais selecionados, cabendo, portanto, na etapa de design de produto, proceder-se com a correta seleção do material polimérico mais adequado do ponto de vista técnico, considerando as propriedades térmicas e mecânicas mediante o cenário de aplicação, mas também do ponto de vista de viabilidade técnica e econômica. Do ponto de vista de geometria dos defeitos, foi possível provar estatisticamente que a geometria dos defeitos ou vazios encontrados nas peças poliméricas produzidas via manufatura aditiva podem impactar diretamente variáveis tipicamente utilizadas para fins de projeto de peças e equipamentos para, pelo menos, alguns materiais (por exemplo, ABS), como foi observado para a rigidez do material, devendo esse fator ser levado em conta tanto no design de produtos expostos a carregamentos estáticos mas também dinâmicos, somando-se a ele fatores como distribuição, quantidade e profundidade dos defeitos.

Agradecimentos

Agradecemos ao Laboratório de Prototipagem Mecânica (LabProM-IPqM) e ao Laboratório de Materiais do IPqM.

Referências

- 3DLAB. Fabricante de Filamentos 3DLab. 2023. Disponível em: <https://3dlab.com.br>. Acesso em: 08 set 2023.
- Ahn, S. *et al.* (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. Rapid prototyping journal.
- Chacón, J.M., Caminero, M.A., García-Plaza E., Núñez, P.J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, volume 124 (ISSN 0264-1275), pages 143-157.

- Elkolali, M. *et al.* (2022). Void content determination of carbon fiber reinforced polymers: A comparison between destructive and non-destructive methods. *Polymers*, volume 14, n. 6, (ISSN 2073-4360). <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/6/1212>
- Gorni, A. A. (2001). Introdução a prototipagem rápida e seus processos. *Revista Plástico Industrial*, p. 230–239.
- International Organization for Standardization. ISO 527-2: Plastics - determination of tensile properties - part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. Rio de Janeiro, 2012. 11 p.
- Ligon, S. C. *et al.* (2017). Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. *Chemical Reviews*, n. 117, p. 10212–10290.
- Lovo, J. F. P.; Fortulan, C. A. Estudo de propriedades mecânicas e anisotropia em peças fabricadas por manufatura aditiva tipo FDM. I Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da EESC-USP (SiPGEM/EESC-USP), 2016.
- Wolff, E. G. (1993). Moisture effects on polymer matrix composites. *SAMPE Journal*, v. 29, n. 3, p. 11–19.