



## APLICAÇÃO DO PLANEJAMENTO FATORIAL NO TRATAMENTO TÉRMICO DE FILAMENTOS PLA

Thiago F. Fortes<sup>1</sup>; Matheus J. C. de Oliveira<sup>1</sup>; Emanuel A. O. Silva <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais - Campus Juiz de Fora

matheus.oliveira@ifsudestemg.edu.br

**Palavras-Chave:** Propriedades, Manufatura aditiva, Termoplásticos.

### Introdução

Os polímeros termoplásticos vêm assumindo crescente relevância tecnológica no contexto da manufatura aditiva, especialmente nos processos de impressão 3D por Modelagem por Deposição Fundida. Entre os materiais mais utilizados destaca-se o ácido polilático (PLA), devido à facilidade de processamento, ampla disponibilidade comercial e propriedades mecânicas adequadas para aplicações em prototipagem e fabricação de componentes. Além disso, o PLA apresenta origem renovável, biodegradabilidade, elevada rigidez e boa estabilidade dimensional, características que favorecem sua aplicação na engenharia de materiais (FRIED, 2014; CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Apesar dessas vantagens, peças produzidas por impressão 3D frequentemente apresentam limitações relacionadas à anisotropia mecânica, presença de tensões residuais, baixa resistência térmica e heterogeneidades microestruturais geradas durante a deposição das camadas. Essas características podem comprometer o desempenho estrutural e restringir a utilização dos componentes em condições mais exigentes. Segundo Souza, Ferreira e Amorim Júnior (2020), parâmetros de impressão como temperatura de extrusão, altura de camada e orientação de deposição exercem influência significativa sobre as propriedades mecânicas do PLA.

Nesse contexto, o tratamento térmico de recozimento surge como uma alternativa para melhorar o desempenho do material. O recozimento promove a reorganização molecular e o aumento da cristalinidade em polímeros semicristalinos, resultando em melhorias na rigidez, resistência térmica e estabilidade dimensional (FRIED, 2014). Além disso, o tratamento contribui para o alívio das tensões residuais geradas durante a impressão, reduzindo deformações e aumentando a integridade estrutural das peças.

Martins, Pereira e Oliveira (2021) observaram que tratamentos térmicos controlados podem melhorar significativamente as propriedades térmicas e mecânicas de polímeros utilizados em impressão 3D. Os autores destacam que a reorganização microestrutural favorece maior coesão entre camadas e redução de defeitos internos, fatores diretamente relacionados ao desempenho mecânico do material.



A caracterização das propriedades mecânicas do PLA tratado termicamente requer metodologias experimentais padronizadas. Nesse sentido, os ensaios de tração realizados conforme a norma ASTM D638-14 constituem uma ferramenta amplamente utilizada para determinação da resistência mecânica, módulo de elasticidade e deformação dos materiais poliméricos (ASTM INTERNATIONAL, 2014).

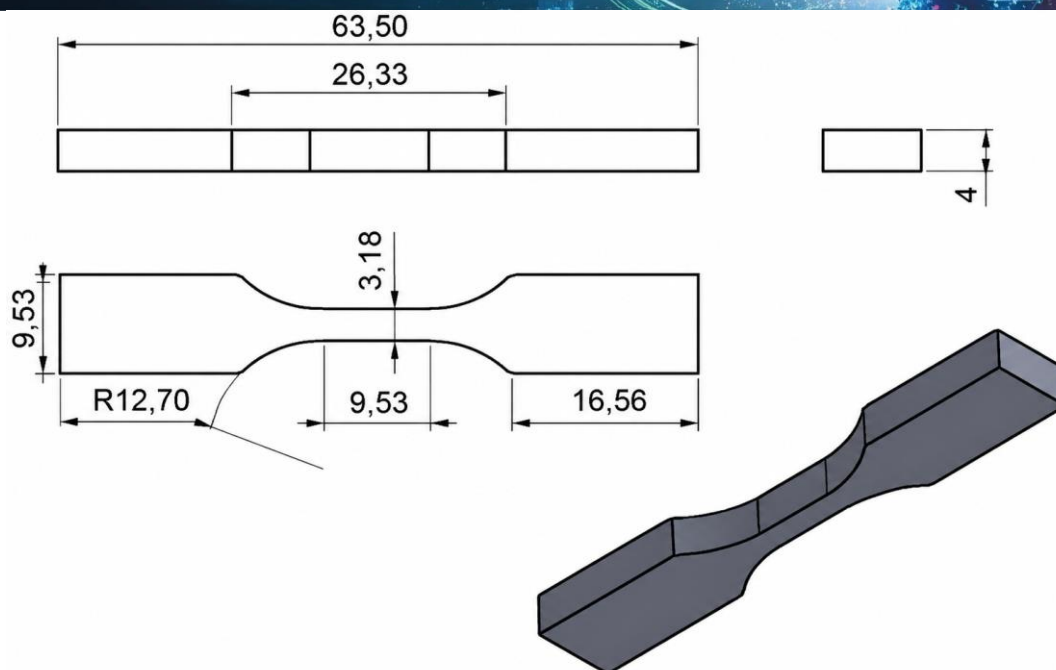
Os efeitos do recozimento dependem diretamente das condições de processamento, especialmente temperatura e tempo de exposição. Dessa forma, a aplicação de técnicas estatísticas torna-se fundamental para avaliar a influência dessas variáveis e suas interações. O planejamento experimental fatorial permite identificar fatores significativos de forma eficiente e com menor número de experimentos (MONTGOMERY, 2019). Complementarmente, a Metodologia de Superfície de Resposta possibilita modelar e otimizar processos multifatoriais por meio de relações matemáticas entre variáveis de entrada e respostas de interesse (MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2016).

Embora existam estudos sobre o tratamento térmico do PLA, ainda são limitadas as pesquisas que utilizam planejamento experimental e análise de superfície de resposta para otimização simultânea dos parâmetros de recozimento. Além disso, poucos trabalhos correlacionam de forma abrangente os efeitos das condições térmicas com as propriedades mecânicas e estruturais do material.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo investigar a influência do tratamento térmico de recozimento nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais do PLA produzido por impressão 3D, utilizando planejamento fatorial. Buscou-se avaliar a influência das variáveis térmicas sobre propriedades como resistência mecânica, estabilidade dimensional e organização estrutural do polímero, contribuindo para o desenvolvimento de componentes com desempenho superior e maior potencial de aplicação industrial.

## **Material e Métodos**

Para a realização deste trabalho foram utilizados filamentos comerciais de ácido polilático (PLA) com diâmetro de 1,75 mm, empregados em processos de manufatura aditiva por modelagem por deposição fundida. Inicialmente, os filamentos foram cortados em amostras com comprimento útil de 200 mm e submetidos a tratamentos térmicos de recozimento em diferentes condições de temperatura, tempo de permanência e taxa de aquecimento.



**Figura 1 – Desenho técnico do corpo de prova com dimensões em milímetros e representação tridimensional (Fonte do autor).**

Os tratamentos térmicos foram realizados em forno elétrico resistivo Linn Elektro Therm, modelo KK 260/1650, utilizando resfriamento lento no interior do forno após o término do ciclo térmico. Foram avaliadas temperaturas de 80 °C e 120 °C, além de tempos de permanência de 30 min e 90 min e taxas de aquecimento de 2 °C/min e 10 °C/min.

| Variáveis de entrada (k) para o PLA | Níveis |     |
|-------------------------------------|--------|-----|
|                                     | +1     | -1  |
| Temperatura de queima (°C)          | 80     | 120 |
| Tempo de queima (min)               | 30     | 90  |
| Taxa de aquecimento (°C/min)        | 2      | 10  |

**Tabela 1 – Variáveis de entrada e níveis de controle para o tratamento térmico do PLA (Fonte do autor).**

O delineamento experimental foi conduzido por meio de planejamento fatorial completo 2<sup>3</sup>, composto por oito experimentos. Todas as condições foram executadas de forma aleatorizada e em triplicata, totalizando 16 amostras de PLA (duas para cada experimento).

Após os tratamentos térmicos, as amostras foram caracterizadas mecanicamente. As propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaio de tração conforme a norma ASTM D638, utilizando máquina universal de ensaios TME Group 200WD com velocidade de 1 mm/min.



Foram determinados o módulo de elasticidade, limite de resistência à tração e deformação total após ruptura.

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente por meio de análise de variância (ANOVA), considerando nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ), além da aplicação de análise de superfície de resposta para correlacionar os parâmetros térmicos com as propriedades físicas, mecânicas e estruturais do material estudado.

## Resultados e Discussão

Inicialmente, foram realizados ensaios de tração nas amostras produzidas, obtendo-se valores médios de resistência mecânica compreendidos no intervalo de  $28,06 \pm 6,88$  MPa. Esses resultados serviram como base para a posterior análise estatística por meio de planejamento fatorial.

| Amostras   | Tempo(min) | Temperatura(C°) | Taxa(C°/min) | Tensão de resistencia (MPa) | Deformação maxima (mm) |
|------------|------------|-----------------|--------------|-----------------------------|------------------------|
| PLA080302  | 30         | 80              | 2            | 25                          | 0,675                  |
| PLA080302  | 30         | 80              | 2            | 21                          | 1,152                  |
| PLA0809010 | 90         | 80              | 10           | 20                          | 0,559                  |
| PLA0809010 | 90         | 80              | 10           | 26                          | 1,096                  |
| PLA0803010 | 30         | 80              | 10           | 27                          | 0,572                  |
| PLA0803010 | 30         | 80              | 10           | 25                          | 0,757                  |
| PLA080902  | 90         | 80              | 2            | 44                          | 1,729                  |
| PLA080902  | 90         | 80              | 2            | 39                          | 1,587                  |
| PLA120302  | 30         | 120             | 2            | 29                          | 0,535                  |
| PLA120302  | 30         | 120             | 2            | 29                          | 0,472                  |
| PLA1203010 | 30         | 120             | 10           | 34                          | 0,633                  |
| PLA1203010 | 30         | 120             | 10           | 35                          | 0,488                  |
| PLA1209010 | 90         | 120             | 10           | 29                          | 0,552                  |
| PLA1209010 | 90         | 120             | 10           | 22                          | 0,646                  |
| PLA120902  | 90         | 120             | 2            | 21                          | 0,512                  |
| PLA120902  | 90         | 120             | 2            | 23                          | 0,354                  |

**Tabela 2: Resultados obtidos através dos testes de tração (Fonte do autor)**

A identificação das amostras foi definida de acordo com os parâmetros de processamento empregados. Os três primeiros dígitos correspondem à temperatura de queima, os dois dígitos subsequentes representam o tempo de permanência nessa temperatura e a última identificação refere-se à taxa de aquecimento utilizada durante o processamento térmico.

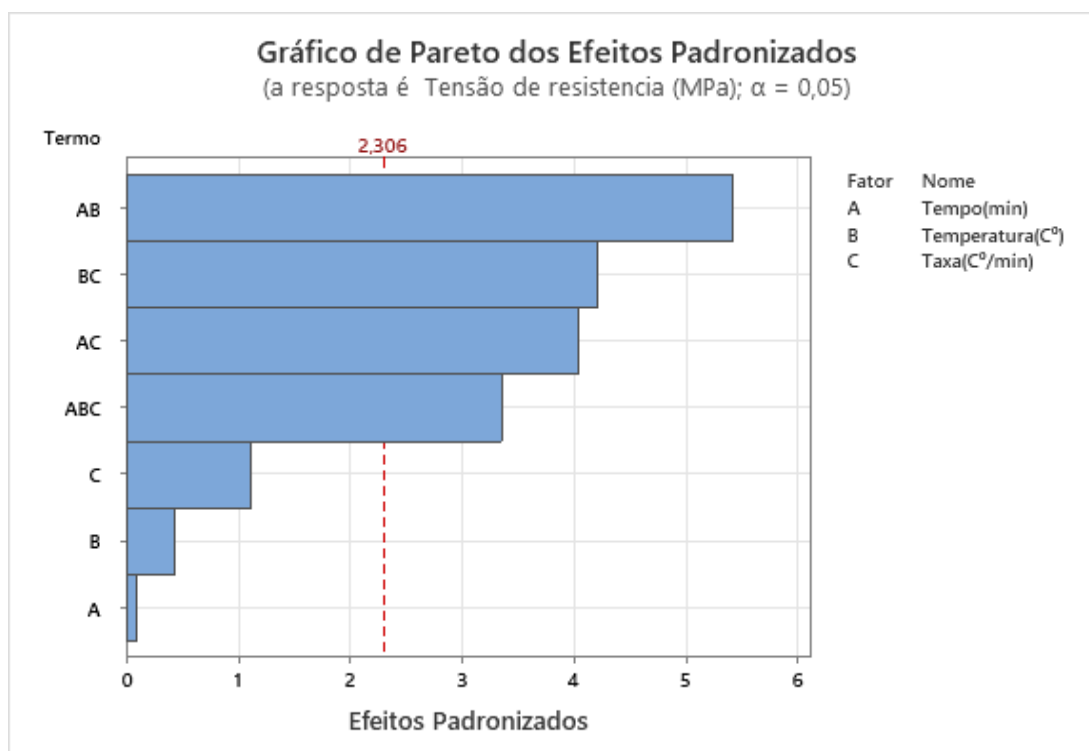
Com os dados de temperatura, tempo de queima, taxa de aquecimento, limite de resistência e deformação máxima devidamente organizados, procedeu-se à análise de experimento fatorial utilizando o software Minitab. Foram considerados três fatores de entrada (temperatura,



tempo e taxa de aquecimento) e duas variáveis-resposta independentes: limite de resistência à tração e deformação máxima.

A análise do gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o limite de resistência à tração demonstrou que todos os efeitos avaliados, incluindo os fatores principais e suas interações, ultrapassaram o valor crítico de referência (2,306), correspondente ao nível de significância de 5%. Esse resultado evidencia que todos os fatores estudados exercem influência estatisticamente significativa sobre a resistência mecânica do material.

Entre os fatores analisados, a temperatura de queima e o tempo de processamento apresentaram os maiores efeitos padronizados, confirmando sua relevância no desenvolvimento das propriedades mecânicas do material. Adicionalmente, a taxa de aquecimento também apresentou influência significativa, embora em menor magnitude. Dessa forma, pode-se afirmar que a resistência à tração é fortemente dependente da combinação entre temperatura, tempo e taxa de aquecimento, sendo todos os parâmetros relevantes para a otimização do processo.



**Figura 2: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados - Tensão de resistência (Fonte do autor).**



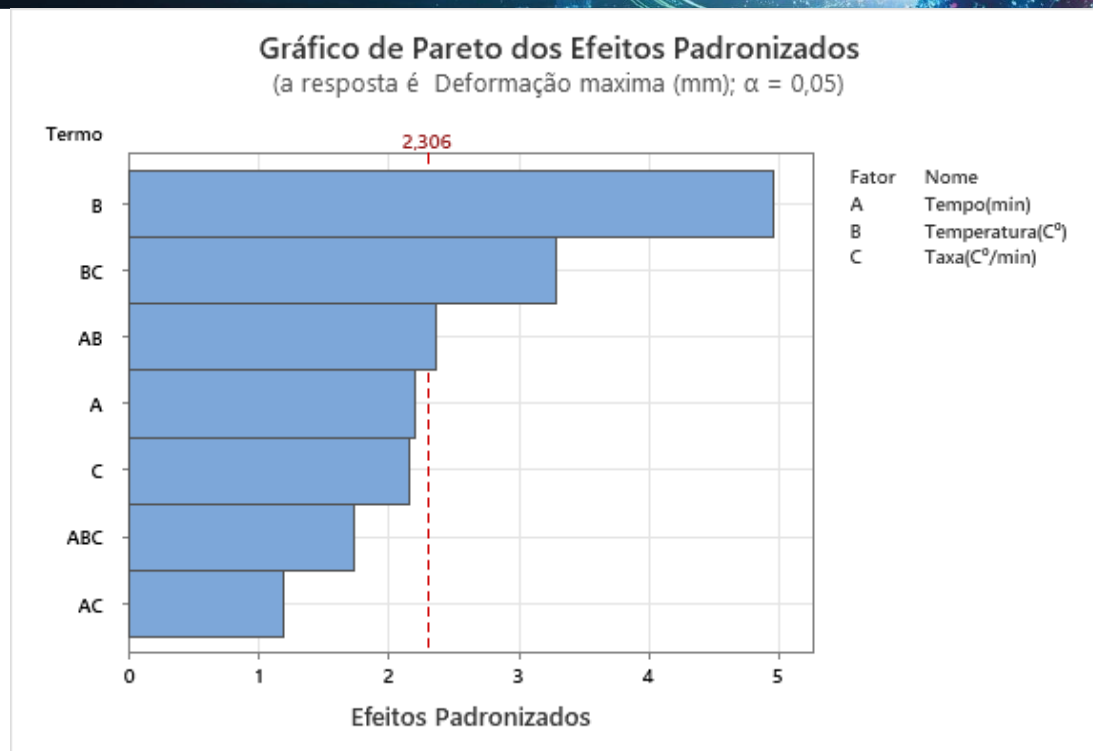
### Análise de Variância

| Fonte                                   | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-----------------------------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Modelo                                  | 7  | 643,438  | 91,920   | 10,89   | 0,002   |
| Linear                                  | 3  | 12,188   | 4,063    | 0,48    | 0,704   |
| Tempo(min)                              | 1  | 0,063    | 0,063    | 0,01    | 0,934   |
| Temperatura(C°)                         | 1  | 1,563    | 1,563    | 0,19    | 0,678   |
| Taxa(C°/min)                            | 1  | 10,563   | 10,563   | 1,25    | 0,296   |
| Interações de 2 fatores                 | 3  | 536,188  | 178,729  | 21,18   | 0,000   |
| Tempo(min)*Temperatura(C°)              | 1  | 248,062  | 248,062  | 29,40   | 0,001   |
| Tempo(min)*Taxa(C°/min)                 | 1  | 138,063  | 138,063  | 16,36   | 0,004   |
| Temperatura(C°)*Taxa(C°/min)            | 1  | 150,063  | 150,063  | 17,79   | 0,003   |
| Interações de 3 fatores                 | 1  | 95,063   | 95,063   | 11,27   | 0,010   |
| Tempo(min)*Temperatura(C°)*Taxa(C°/min) | 1  | 95,063   | 95,063   | 11,27   | 0,010   |
| Erro                                    | 8  | 67,500   | 8,438    |         |         |
| Total                                   | 15 | 710,938  |          |         |         |

**Tabela 3: ANOVA Tensão de resistência (Fonte do autor).**

Partindo para a análise do gráfico de Pareto referente à deformação máxima, revelou que a temperatura de processamento constitui o fator de maior influência sobre essa propriedade. Além do efeito principal da temperatura, as interações Temperatura × Taxa de Aquecimento e Tempo × Temperatura apresentaram significância estatística, uma vez que seus efeitos padronizados ultrapassaram o valor crítico estabelecido para um nível de confiança de 95%.

Por outro lado, os fatores Tempo e Taxa de Aquecimento, quando avaliados isoladamente, não apresentaram efeitos estatisticamente significativos sobre a deformação máxima. Esses resultados indicam que o comportamento deformacional do material é predominantemente controlado pelos efeitos térmicos e pelas interações entre os parâmetros de processamento, evidenciando que a influência conjunta dos fatores é mais relevante do que seus efeitos individuais.



**Figura 3: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados - Deformação máxima (Fonte do autor).**

### Análise de Variância

| Fonte                                   | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-----------------------------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Modelo                                  | 7  | 2,16259  | 0,30894  | 7,86    | 0,005   |
| Linear                                  | 3  | 1,34279  | 0,44760  | 11,38   | 0,003   |
| Tempo(min)                              | 1  | 0,19163  | 0,19163  | 4,87    | 0,058   |
| Temperatura(C°)                         | 1  | 0,96776  | 0,96776  | 24,61   | 0,001   |
| Taxa(C°/min)                            | 1  | 0,18340  | 0,18340  | 4,66    | 0,063   |
| Interações de 2 fatores                 | 3  | 0,70061  | 0,23354  | 5,94    | 0,020   |
| Tempo(min)*Temperatura(C°)              | 1  | 0,22067  | 0,22067  | 5,61    | 0,045   |
| Tempo(min)*Taxa(C°/min)                 | 1  | 0,05581  | 0,05581  | 1,42    | 0,268   |
| Temperatura(C°)*Taxa(C°/min)            | 1  | 0,42413  | 0,42413  | 10,79   | 0,011   |
| Interações de 3 fatores                 | 1  | 0,11920  | 0,11920  | 3,03    | 0,120   |
| Tempo(min)*Temperatura(C°)*Taxa(C°/min) | 1  | 0,11920  | 0,11920  | 3,03    | 0,120   |
| Erro                                    | 8  | 0,31454  | 0,03932  |         |         |
| Total                                   | 15 | 2,47713  |          |         |         |

**Tabela 4: ANOVA Deformação máxima (Fonte do autor).**

A temperatura exerce influência mais pronunciada sobre o limite de resistência do PLA do que sobre sua deformação máxima, possivelmente devido às alterações microestruturais



promovidas durante o processamento térmico. O aumento da temperatura de queima favorece a difusão molecular e a reorganização das cadeias poliméricas, reduzindo defeitos internos, vazios e regiões de baixa coesão entre as camadas depositadas na impressão 3D (FRIED, 2014). Como consequência, ocorre um aumento significativo da capacidade do material de suportar tensões antes da ruptura, refletindo diretamente no limite de resistência. Por outro lado, a deformação máxima está associada principalmente à mobilidade das cadeias poliméricas e aos mecanismos de deformação plástica do material, propriedades que dependem não apenas da temperatura, mas também da orientação molecular, da taxa de resfriamento, da cristalinidade e da presença de tensões residuais. Dessa forma, embora a temperatura afeta ambas as propriedades, seu impacto é mais evidente na resistência mecânica, uma vez que a melhoria da adesão intercamadas e a redução de defeitos estruturais contribuem diretamente para a capacidade de carga do material, enquanto a deformação máxima resulta de uma combinação mais complexa de fatores microestruturais e mecânicos, comportamento também observado para peças de PLA produzidas por manufatura aditiva (SOUZA; FERREIRA; AMORIM JÚNIOR, 2020).

## Conclusões

Os resultados obtidos demonstraram que os parâmetros de processamento térmico exercem influência significativa sobre as propriedades mecânicas do PLA. A análise fatorial evidenciou que temperatura, tempo de queima e taxa de aquecimento afetam o limite de resistência à tração, sendo a temperatura e o tempo os fatores de maior relevância. Para a deformação máxima, observou-se predominância da influência da temperatura, além de interações significativas entre temperatura e taxa de aquecimento e entre temperatura e tempo de processamento. De modo geral, conclui-se que a temperatura constitui o parâmetro mais importante para o desempenho mecânico do material, uma vez que promove alterações microestruturais capazes de aumentar a coesão entre camadas e reduzir defeitos internos, refletindo principalmente no aumento da resistência mecânica. Dessa forma, a adequada combinação dos parâmetros de processamento mostra-se fundamental para a obtenção de peças com melhores propriedades mecânicas, maior potencial de aplicação tecnológica e alvo de estudos futuros.

## Agradecimentos

Agradecimentos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais Campus Juiz de Fora e ao Núcleo de Metalurgia pelo apoio técnico e financeiro - Edital 10/2026.



## Referências

MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. 10. ed. Hoboken: Wiley, 2019.

FRIED, J. R. Polymer Science and Technology. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2014.

SOUZA, M. T.; FERREIRA, R. T. L.; AMORIM JÚNIOR, W. F. Influência dos parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas do PLA. Revista Matéria, 25(4), 2020.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. Materials Science and Engineering: An Introduction. 10. ed. Hoboken: Wiley, 2018.

MARTINS, R. M.; PEREIRA, E. C.; OLIVEIRA, A. L. Caracterização térmica e mecânica de polímeros utilizados em impressão 3D. Polímeros, 31(2), 2021.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D638-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. West Conshohocken: ASTM International, 2014.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2016.