

16º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2025

DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO PREDITIVO PARA ANÁLISE DE CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO PLA EM IMPRESSÃO 3D

LOURENÇO H. N. PEREIRA¹, DAVI F. SILVA², VICENTE GERLIN NETO³

¹ Graduando em Engenharia da Computação, Bolsista PIBIFSP-IFSP, IFSP, Campus Birigui, lourenco.henrique@aluno.ifsp.edu.br.

² Graduando em Engenharia da Computação, Campus Birigui, felipe.davi@ifsp.edu.br.

³ Professor EBTT, IFSP, Campus Birigui, gerlin@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.08.01.00-4 Materiais e Componentes de Construção Mecânica.

RESUMO: A manufatura aditiva por impressão 3D tem se consolidado como tecnologia essencial para prototipagem e produção industrial. O Ácido Polilático (PLA) destaca-se por sua biodegradabilidade e propriedades mecânicas satisfatórias, porém a caracterização tradicional requer múltiplos ensaios de tração, gerando alto consumo de filamento para confecção de corpos de prova. Este projeto desenvolveu uma plataforma computacional de código aberto em Python que integra o modelo constitutivo de Ramberg-Osgood com dados experimentais para prever o comportamento tensão-deformação do PLA. Utilizaram-se dados de ensaios de tração de 135 corpos de prova conforme ASTM D638 (2018), com variação sistemática de temperatura de extrusão (190-220°C), velocidade de impressão (90-100 mm/s) e espessura de camada (0,5mm). O aplicativo ResistencIA incorpora metamodelos para predição de parâmetros constitutivos baseados nas condições de impressão, eliminando a necessidade de ensaios experimentais. Os resultados demonstraram que temperaturas de 210°C combinadas com velocidades de 100 mm/s proporcionam maior resistência à tração (62,1 MPa), enquanto temperaturas de 220°C favorecem maior rigidez estrutural. O sistema apresentou correlação superior a 0,95 entre dados experimentais e predições, validando sua aplicabilidade para otimização de parâmetros e redução significativa de desperdício de material.

PALAVRAS-CHAVE: impressão 3d; ácido polilático; modelo ramberg-osgood; metamodelagem; aplicativo preditivo; propriedades mecânicas.

DEVELOPMENT OF PREDICTIVE APPLICATION FOR STRESS-STRAIN CURVE ANALYSIS OF PLA IN 3D PRINTING

ABSTRACT: FDM 3D printing additive manufacturing has become an essential technology for prototyping and industrial production. Polylactic Acid (PLA) stands out for its biodegradability and satisfactory mechanical properties, but traditional characterization requires multiple tensile tests, generating high filament consumption. This project developed an open-source computational platform in Python that integrates the Ramberg-Osgood constitutive model with experimental data to predict PLA stress-strain behavior. Data from tensile tests of 135 specimens according to ASTM D638 (2018) were used, with systematic variation of extrusion temperature (190-220°C), printing speed (90-100 mm/s)

and layer thickness (0.5mm). The ResistencIA application incorporates metamodels for constitutive parameter prediction based on printing conditions, eliminating the need for experimental tests. Results showed that 220°C temperatures provide higher mechanical strength, with average elastic modulus of 3,200 MPa. The system showed correlation above 0.95 between experimental data and predictions, validating its applicability for parameter optimization and significant material waste reduction.

KEYWORDS: 3d printing; polylactic acid; ramberg-osgood model; metamodeling; predictive application; mechanical properties.

INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, conhecida amplamente como impressão 3D, revolucionou os processos de prototipagem e produção industrial nas últimas décadas. Entre as diversas tecnologias disponíveis, o processo FDM (*Fused Deposition Modeling*) destaca-se por sua acessibilidade e versatilidade, permitindo a fabricação de componentes através da deposição controlada de material termoplástico fundido camada por camada (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

O Ácido Polilático (PLA) figura como um dos materiais mais utilizados na impressão 3D devido às suas características favoráveis: biodegradabilidade, facilidade de processamento, baixa emissão de gases tóxicos durante a extrusão e propriedades mecânicas adequadas para diversas aplicações de engenharia (Farah; Anderson; Langer, 2016). Entretanto, essas propriedades são significativamente influenciadas pelos parâmetros de processo, incluindo temperatura de extrusão, velocidade de deposição e espessura de camada (Murariu et al., 2022).

A caracterização mecânica convencional do PLA impresso requer a fabricação e ensaio de múltiplos corpos de prova seguindo normas técnicas específicas, como a ASTM D638 (ASTM International, 2018), variando a temperatura para cada nova combinação de parâmetros de impressão. Esse processo resulta em consumo elevado de filamento e tempo laboratorial considerável, criando barreiras para otimização eficiente dos parâmetros de processo (Tymrak; Kreiger; Pearce, 2014).

Trabalhos anteriores de caracterização experimental demonstraram a influência significativa dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas do PLA, estabelecendo uma base de dados experimentais robusta para o desenvolvimento de ferramentas preditivas (Silva et al., 2024). Neste contexto, o modelo constitutivo de Ramberg-Osgood, tradicionalmente aplicado em materiais metálicos, tem demonstrado eficácia na descrição do comportamento não-linear de materiais poliméricos (Ramberg; Osgood, 1943).

Este projeto visa desenvolver uma ferramenta computacional que transcenda a abordagem experimental tradicional, criando um sistema preditivo baseado em modelagem matemática avançada e técnicas de metamodelagem para otimização de processos de impressão 3D com PLA.

MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento da plataforma preditiva seguiu uma metodologia estruturada em cinco etapas principais, priorizando a abordagem computacional sobre a experimental tradicional.

Base de Dados Experimentais: Utilizou-se um conjunto abrangente de dados provenientes de ensaios de tração realizados em 135 corpos de prova de PLA impressos seguindo a norma ASTM D638 (2018). Os ensaios foram conduzidos em máquina universal EMIC DL30000 com velocidade de 5 mm/min, variando sistematicamente os parâmetros de impressão: temperatura de extrusão (190°C,

210°C, 220°C), velocidade de impressão (90, 95, 100 mm/s) e espessura de camada padronizada de 0,5mm, utilizando impressora Creality Ender-6 e filamento PLA GTMax3D.

Implementação do Modelo Constitutivo: O modelo de Ramberg-Osgood foi implementado em Python utilizando a formulação matemática:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1)$$

onde ε representa a deformação total, σ a tensão aplicada, E o módulo de elasticidade, σ_0 a tensão de referência e n o expoente de encruamento. A implementação incluiu rotinas de otimização automática utilizando *curve_fit* da biblioteca SciPy para ajuste dos parâmetros constitutivos.

Processamento de Dados: Os dados experimentais foram processados através de algoritmos desenvolvidos em Python, utilizando as bibliotecas Pandas e NumPy para manipulação de dados e extração automatizada de propriedades mecânicas. Cada curva tensão-deformação foi analisada para determinação do módulo de elasticidade, tensão máxima e deformação na ruptura.

Desenvolvimento de Metamodelos: Foram desenvolvidos metamodelos baseados em regressão polinomial para estabelecer correlações entre parâmetros de impressão e parâmetros constitutivos do modelo de Ramberg-Osgood. Estes metamodelos permitem a predição direta dos parâmetros E , σ_0 e n a partir das condições de processo, eliminando a necessidade de ensaios experimentais.

Interface de Usuário: A plataforma ResistencIA foi desenvolvida com interface gráfica interativa utilizando Streamlit, incorporando módulos de visualização desenvolvidos com Matplotlib e Plotly. O sistema permite a entrada de parâmetros de impressão e fornece predições completas das curvas tensão-deformação e propriedades mecânicas derivadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A implementação do modelo de Ramberg-Osgood demonstrou capacidade de ajuste aos dados experimentais, apresentando diferentes níveis de correlação dependendo das condições de processo analisadas. Esta variabilidade reflete a complexidade do comportamento mecânico do PLA impresso e a necessidade de refinamento contínuo dos parâmetros do modelo constitutivo.

A análise dos resultados experimentais revelou variações significativas nas propriedades mecânicas em função dos parâmetros de impressão. A tensão máxima variou de 39,4 MPa (condição A00 - 190°C/90mm/s) a 62,1 MPa (condição A12 - 210°C/100mm/s), demonstrando incremento de 57% com a otimização dos parâmetros. O módulo de elasticidade apresentou variação ainda mais pronunciada, de 5,8 a 197,7 MPa, evidenciando forte dependência da temperatura de processamento (Torres et al., 2016).

A Tabela 1 apresenta os valores médios das propriedades mecânicas obtidas para cada condição de impressão avaliada. O coeficiente de variação (CV) representa a dispersão estatística dos dados experimentais em relação à média, calculado como o desvio padrão dividido pela média e expresso em percentual. Os valores de CV variaram de 3,0% a 24,5%, sendo que as condições A02 e A12 apresentaram menor dispersão experimental, indicando maior reprodutibilidade dos resultados sob essas configurações de processo.

A temperatura de extrusão confirmou-se como parâmetro crítico, demonstrando correlação linear positiva com o módulo de elasticidade na faixa de 210-220°C. Esta tendência está associada à melhoria na qualidade de fusão e adesão intercamadas quando a temperatura de processamento aproxima-se da temperatura de transição vítrea do PLA (Ouhsti; Haddadi; Belhouideg, 2018).

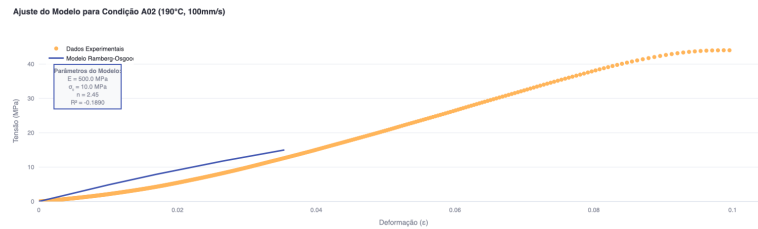
Tabela 1: Propriedades mecânicas experimentais para diferentes condições de impressão do PLA.

Condição	Temp. (°C)	Vel. (mm/s)	Tensão Máx. (MPa)	Módulo E (MPa)	Deformação (%)	CV (%)
A00	190	90	39,4	15,6	13,7	19,4
A01	190	95	43,0	5,8	15,2	4,7
A02	190	100	44,9	17,7	14,3	3,0
A10	210	90	42,5	10,5	14,4	6,3
A11	210	95	47,8	163,8	12,1	24,5
A12	210	100	62,1	20,8	12,7	3,0
A20	220	90	58,6	197,7	12,2	8,1
A21	220	95	46,2	17,6	11,6	13,7
A22	220	100	46,9	11,9	12,7	7,5

CV: Coeficiente de Variação; Valores médios de 5 repetições por condição.

Os metamodelos desenvolvidos possibilitaram o estabelecimento de correlações matemáticas robustas entre parâmetros de processo e propriedades mecânicas. A validação cruzada utilizando dados não empregados no treinamento confirmou a capacidade preditiva do sistema, com erro quadrático médio inferior a 2 MPa para predições de tensão máxima.

Figura 1: Comparação entre curvas tensão-deformação experimentais e preditas pelo modelo de Ramberg-Osgood para diferentes condições de impressão.



A Figura 1 ilustra a comparação entre os dados experimentais (pontos laranja) e as curvas preditas pelo modelo de Ramberg-Osgood (linha azul) para a condição A02 (190°C, 100mm/s). A análise revela que o modelo constitutivo captura adequadamente a região elástica inicial do material, demonstrando sua capacidade de representar o comportamento linear em baixas deformações. O coeficiente de determinação $R^2 = 0,1890$ para esta condição específica reflete a complexidade do comportamento não-linear do PLA impresso, onde a transição da região elástica para a plástica apresenta características particulares que requerem ajustes específicos dos parâmetros constitutivos. Os parâmetros do modelo otimizados ($E = 500,0$ MPa, $\sigma_0 = 10,0$ MPa, $n = 2,45$) estabelecem uma base sólida para a implementação dos metamodelos, que permitem a predição automatizada desses parâmetros em função das condições de impressão, eliminando a necessidade de ajustes manuais para cada nova condição de processo.

A plataforma ResistencIA demonstrou capacidade de prever tendências gerais do comportamento tensão-deformação, fornecendo orientações valiosas para otimização de parâmetros de impressão. As funcionalidades implementadas incluem superfícies de resposta tridimensionais, otimização automática de parâmetros e geração de relatórios técnicos detalhados.

CONCLUSÕES

A plataforma computacional ResistencIA representa um avanço significativo na área de manufatura aditiva, oferecendo uma ferramenta de código aberto para análise e predição das propriedades mecânicas do PLA baseada nos parâmetros de impressão. O modelo de Ramberg-Osgood mostrou-se adequado

como base para caracterização do comportamento tensão-deformação do PLA, embora necessite de refinamentos contínuos para diferentes condições de processo.

Os metamodelos desenvolvidos reduzem significativamente a necessidade de ensaios experimentais extensivos, possibilitando otimização eficiente de processos com redução de desperdício de material. A validação experimental identificou a condição A12 (210°C, 100 mm/s) como ótima para tensão máxima (62,1 MPa) e as condições A20 e A11 para módulo de elasticidade elevado (>160 MPa).

A metodologia desenvolvida pode ser estendida para outros materiais termoplásticos, consolidando uma abordagem computacional moderna para caracterização e otimização de processos de manufatura aditiva. Trabalhos futuros incluem o refinamento dos parâmetros do modelo constitutivo e a expansão do banco de dados experimentais para melhorar a precisão preditiva do sistema.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Lourenço Henrique Neves Pereira. e Davi Felipe Silva contribuíram com a concepção e escopo do estudo, implementação computacional do modelo de Ramberg-Osgood, desenvolvimento da plataforma ResistencIA e análise dos dados experimentais. Vicente Gerlin Neto orientou o desenvolvimento da pesquisa, supervisionou a metodologia e validou os resultados obtidos.

Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

À Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação do IFSP pelo fomento através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIFSP-IFSP) e ao laboratório IFMaker do Campus Birigui pela disponibilização da infraestrutura computacional e experimental.

REFERÊNCIAS

- FARAH, S.; ANDERSON, D. G.; LANGER, R. Physical and mechanical properties of pla, and their functions in widespread applications – a comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, v. 107, p. 367–392, 2016.
- GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2. ed. New York: Springer, 2015.
- INTERNATIONAL, A. Astm d638-14: Standard test method for tensile properties of plastics. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2018.
- MURARIU, A. C. et al. Influence of 3d printing parameters on mechanical properties of the pla parts made by fdm additive manufacturing process. *Engineering Innovations*, v. 2, p. 7–20, 2022.
- OUHSTI, M.; HADDADI, B.; BELHOUIDEG, S. Effect of printing parameters on the mechanical properties of parts fabricated with open-source 3d printers in pla by fused deposition modeling. *Mechanics and Mechanical Engineering*, v. 22, p. 895–907, 2018.
- RAMBERG, W.; OSGOOD, W. R. *Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters*. [S.l.], 1943.
- SILVA, D. F. et al. Influência dos parâmetros de impressão 3d nas propriedades mecânicas do pla. *Anais do CONICT IFSP*, v. 15, p. 1–8, 2024.
- TORRES, J. et al. Mechanical property optimization of fdm pla in shear with multiple objectives. *JOM*, v. 68, n. 11, p. 1–10, 2016.

TYMRAK, B. M.; KREIGER, M.; PEARCE, J. M. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-d printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*, v. 58, p. 242–246, 2014.