



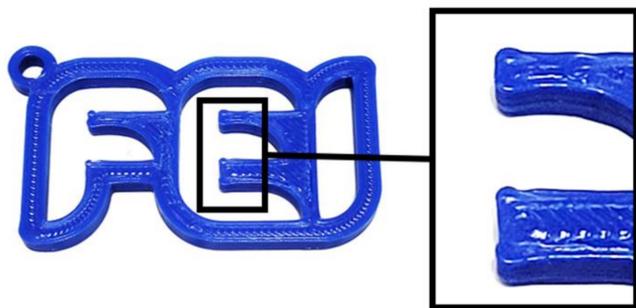
SMART DEPOSITION: CONTROLE ATIVO DE VAZÃO PARA MANUFATURA ADITIVA POLIMÉRICA DO TIPO FDM



INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva por deposição de material fundido (FDM) é atualmente um dos métodos mais populares de impressão 3D para a confecção de protótipos. Este método envolve aquecer um polímero termoplástico até o estado semilíquido e sobrepôr camadas que resfriam na geometria desejada.

Um dos principais problemas observados no método FDM é a falta de sincronia entre a vazão de material extrudado e o movimento realizado pelo cabeçote de impressão. Esse fenômeno está principalmente relacionado à compressão do filamento entre o motor e o bico aquecido, causando defeitos de impressão, principalmente quando há mudança na da velocidade do cabeçote de impressão:



Fonte: Autor.

O método mais popular para minimizar este problema atualmente em impressoras industriais ou de mesa (domésticas) é a técnica denominada *linear advance*, que consiste em um sistema de controle de malha aberta do tipo *feedforward* para compensar o material excedente ou faltante durante as mudanças de velocidade. Esta técnica requer uma calibração prévia manual da sua agressividade, e que preferencialmente deve ser executada pelo operador sempre que há mudanças de material, temperatura ou velocidade média de impressão, a fim de maximizar a qualidade geométrica das peças produzidas.

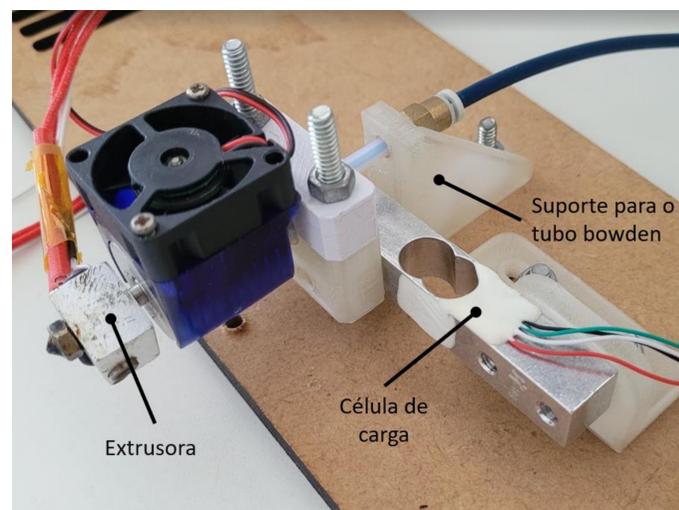
OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar e testar um método alternativo para a compensação da vazão de extrusão, afim de melhorar a qualidade geométrica das peças produzidas e eliminar calibrações manuais. Para atingir este objetivo, o projeto foi dividido nas seguintes etapas:

- Estudo da dinâmica de extrusão, com o auxílio de softwares de simulação (MATLAB/Simulink) e a construção de uma plataforma de testes para aquisição de dados;
- Estudo de metodologias de controle que melhor se adaptam ao sistema;
- Desenvolvimento de protótipo funcional, incluindo a adaptação do mesmo em uma impressora 3D.

DESENVOLVIMENTO

O primeiro passo para o desenvolvimento de qualquer controlador é definir o modelo da planta a ser controlada. Para melhor entendimento da dinâmica de extrusão, foi adaptada uma banca de testes capaz de medir a força de extrusão:



Fonte: Autor.

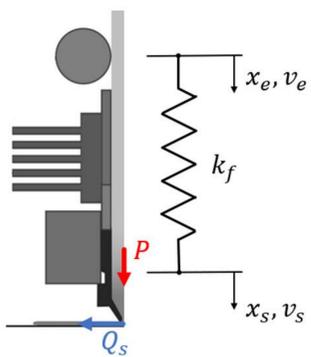


SMART DEPOSITION: CONTROLE ATIVO DE VAZÃO PARA MANUFATURA ADITIVA POLIMÉRICA DO TIPO FDM



Com a bancada, foi possível identificar os efeitos não-lineares da dinâmica de extrusão, causados principalmente pelo escoamento não-newtoniano dos polímeros, e também a flutuação da temperatura de extrusão, fatores que influenciam diretamente na relação entre vazão e força de extrusão.

Para a modelagem da planta, optou-se por um modelo linear com parâmetros variantes no tempo (LPV), conforme:



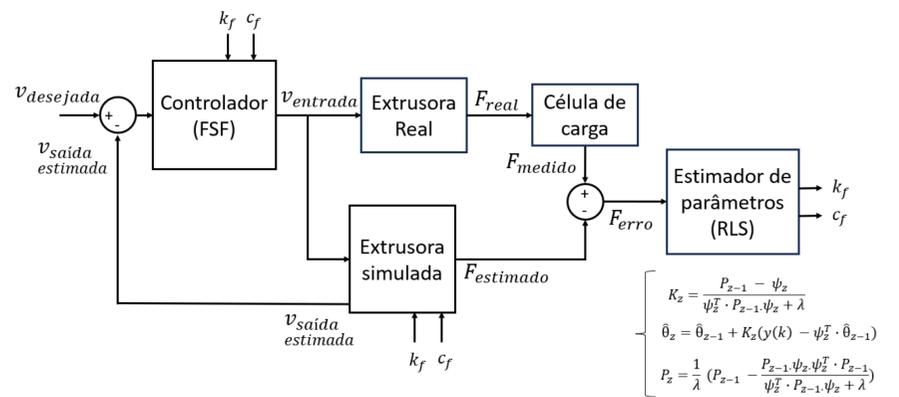
$$\dot{v}_s = (v_e - v_s) \frac{k_f}{c_f}$$

$$F_k = v_s \cdot c_f$$

Fonte: Autor.

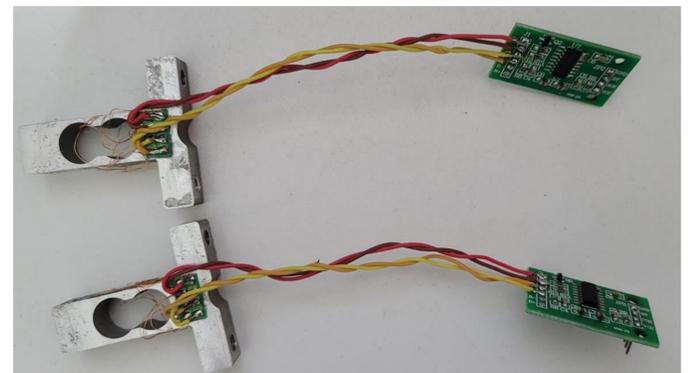
A implementação de um controlador para a planta requer uma medição ou estimativa da vazão de saída. Medir este valor diretamente não é viável devido à alta temperatura na região e espaço confinado. Para isto, optou-se pela medição da força de extrusão, que pode ser correlacionada à vazão de saída conforme observado nas equações de modelagem.

O controlador escolhido para o ajuste de vazão é o de realimentação total de estados, com ganhos de controle adaptativos, recalculados a todo instante a partir da variação dos parâmetros da planta. Para estimar estes parâmetros, foi escolhido o estimador recursivo de mínimos quadrados com fator de esquecimento, que ajusta os parâmetros do modelo linear em tempo real, em função do erro entre a força de extrusão medida e estimada pelo modelo.



Fonte: Autor.

Para medir a força de extrusão, optou-se pela integração de células de carga do tipo single-point na extrusora. As células foram dimensionadas e fabricadas de acordo com as forças de extrusão medidas na bancada de testes.



Fonte: Autor.

A integração das células de carga requer o desenvolvimento de um novo cabeçote de extrusão. Para garantir que a qualidade de impressão não seja comprometida, foram adotados quatro principais critérios para o projeto mecânico:

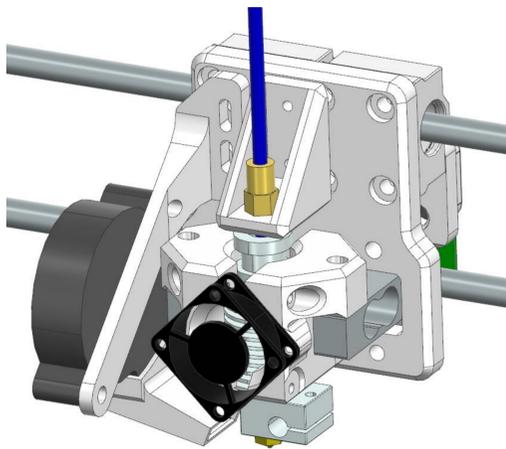
- Garantir a refrigeração do dissipador de calor da extrusora;
- Garantir o resfriamento do material extrudado;
- Garantir rigidez adequada do cabeçote de extrusão;
- Maximizar a qualidade do sinal de força de extrusão.



SMART DEPOSITION: CONTROLE ATIVO DE VAZÃO PARA MANUFATURA ADITIVA POLIMÉRICA DO TIPO FDM



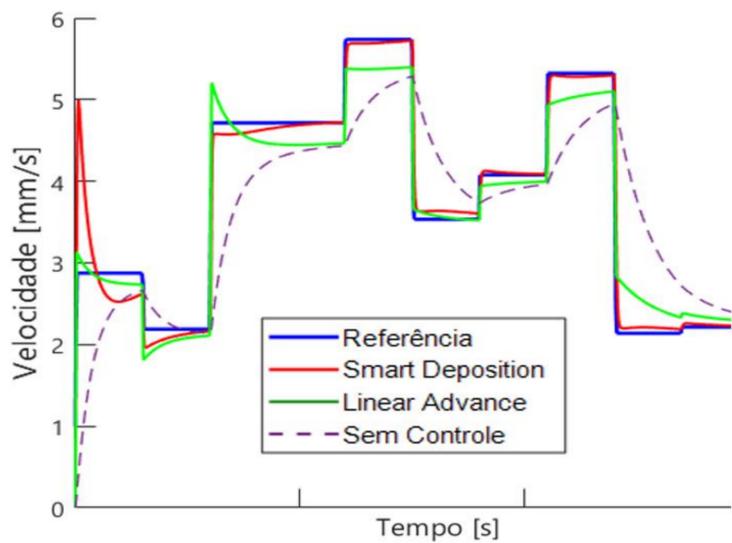
Após algumas iterações e análises computacionais por elementos finitos, definiu-se a construção final do novo cabeçote de impressão:



Fonte: Autor.

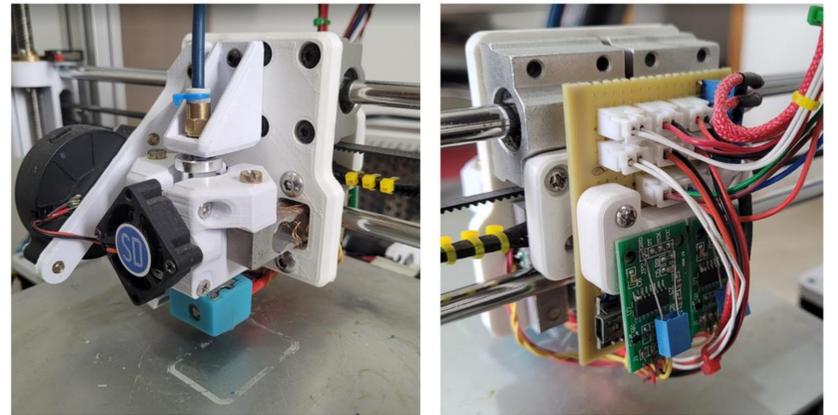
RESULTADOS

O modelo de controle adaptativo proposto foi simulado com o auxílio dos softwares Matlab e Simulink, e mostrou desempenho superior ao método de compensação *Linear Advance*:



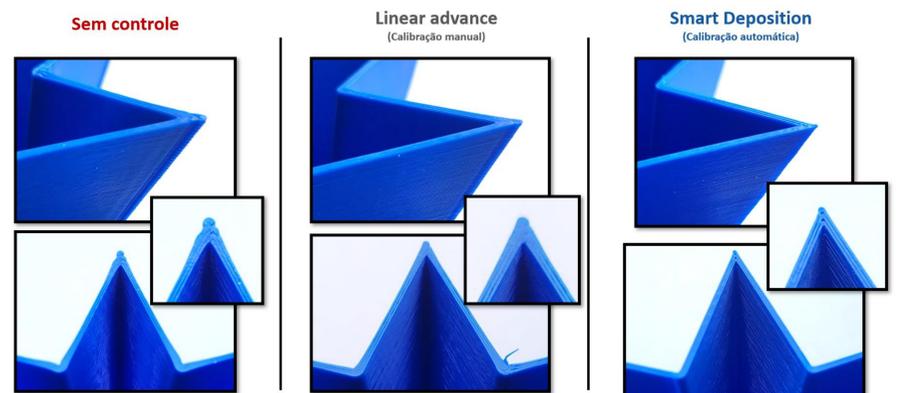
Fonte: Autor.

Pôde-se construir e testar o cabeçote de extrusão instrumentado, com resultados satisfatórios para os critérios do projeto mecânico:



Fonte: Autor.

Ao final, pôde-se testar o desempenho do controlador proposto, e compará-lo ao método *linear advance*:



Fonte: Autor.

CONCLUSÃO

O sistema de controle adaptativo proposto melhorou significativamente a qualidade das peças impressas em relação a condição sem controle, e superou o método *linear advance* (compensador de malha aberta) em diversas situações, principalmente em peças maiores, onde há grande variação dos parâmetros do modelo. Além disso, eliminou a necessidade de calibração manual, simplificando a preparação da impressão. A metodologia é aplicável para qualquer impressora FDM, com potencial para estudos adicionais e melhorias futuras.