

SISTEMA DE MONITORAMENTO DE CABEÇOTE EXTRUSOR PARA MANUFATURA ADITIVA

Guilherme Bueno Silveira, guilherme.ifsc@gmail.com¹

Igor Pereira, ip.pereiraigor@gmail.com¹

Leonardo Santana, leonardosantana29@gmail.com¹

Cassiano Bonin, cassbonin@ifsc.edu.br¹

Aurélio da Costa Sabino Netto, asabino@ifsc.edu.br¹

¹Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis, Florianópolis - SC

Resumo: Possuindo uma vasta área de aplicação, as tecnologias ligadas ao processo de manufatura aditiva por extrusão vêm ganhando cada vez mais destaque. Dentre os módulos que compõem uma impressora 3D, o cabeçote extrusor é responsável pela fusão e deposição da matéria-prima. Este possui um motor responsável pela condução do filamento ao bico extrusor aquecido que deposita o material para a impressão. Este processo de condução, fusão e deposição do filamento pode apresentar alguns problemas que afetam diretamente na qualidade da peça, como o entupimento do tubo do bico extrusor, a perda de passo do motor acoplado ao extrusor e o escorregamento entre filamento e elemento de fricção. Atualmente, há poucas publicações e estudos relacionados ao comportamento do cabeçote extrusor de impressoras 3D e ao aprimoramento do mesmo. Neste sentido, o presente estudo busca abordar e monitorar as possíveis falhas no cabeçote extrusor de uma impressora 3D, propondo ajustes e melhorias. Para o monitoramento do cabeçote extrusor, foi desenvolvido um sistema instrumentado capaz de registrar a movimentação do filamento ao longo do módulo e a temperatura em diversos pontos do mesmo, com encoder rotacional e sensores de temperatura (PT-100). Por meio de uma série de testes, foram gerados dados que indicam o controle de temperatura do sistema como um fator relevante para o bom funcionamento do extrusor. Com o encoder foi registrada a movimentação do filamento dentro do extrusor para comparação com o sinal de step proveniente do driver de motor de passo, traçando assim uma relação entre comando e valor real. Com base nos dados analisados, foi possível verificar que o tracionamento do filamento apresenta falhas que afetam a deposição do material. Tendo estabelecido as principais variáveis de extrusão que afetam a qualidade geral da peça, foi utilizado o sistema de supervisão SCADABR com o intuito de realizar o monitoramento sob o sistema e registrar eventos que levem a fabricação de peças fora dos requisitos de projeto.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, Impressão 3D, Extrusão, SCADABR.

1. INTRODUÇÃO

As tecnologias voltadas para o desenvolvimento de protótipos se aprimoram a cada ano, com inovações, tanto na redução de tempo de produção, quanto na melhora da qualidade final dos produtos. Um dos métodos que vem se destacando atualmente, pela redução no tempo de fabricação, é a manufatura aditiva, onde é possível transitar, em poucas etapas, de um modelo conceitual feito em sistema CAD para um arquétipo físico. Em geral, os processos de manufatura aditiva, destacam-se pelo baixo consumo de matéria-prima, baixo refugo e por apresentar menores gastos com manutenção (SOOD, 2011).

Utilizando as tecnologias ligadas ao processo de manufatura aditiva por extrusão de materiais, as máquinas popularmente conhecidas como Impressoras 3D estão cada vez mais difundidas no âmbito industrial e no mundo acadêmico. Dentre os módulos que compõem uma impressora 3D, o cabeçote extrusor dispõe de elementos responsáveis pela fusão e deposição da matéria-prima. Este sistema possui um motor que conduz o filamento ao bico aquecido, no qual o material alcança sua temperatura de processamento, sendo então depositado sobre a plataforma de construção, onde a peça toma forma (CASAGRANDE, 2013).

Este processo de condução, fusão e deposição do filamento pode apresentar problemas, afetando o desempenho do cabeçote extrusor (AGARWALA *et al.*, 1996; WEEREN *et al.*, 1995 e HUANG, 2014). Dentre as principais falhas no sistema, de acordo com Santana (2015), destacam-se: o entupimento do tubo do bico aquecido, a perda de comando no

acionamento do motor responsável por mover o filamento, e o escorregamento entre o filamento e a polia ranhurada. Os resultados obtidos pelo referido autor mostram que, para filamentos com diâmetro de 3,00 mm, são identificados valores de escorregamento importantes, tal fator exerce uma influência maior sobre a integridade final das peças fabricadas que outros parâmetros de processo, tais quais a velocidade de impressão, temperatura de extrusão, e espessura de camada. O estudo de Santana (2015) alerta também para o fato de o escorregamento entre o filamento e o elemento tracionador apresentar-se como um efeito imprevisível e de magnitude aleatória.

Com base no exposto pela literatura, surge uma lacuna acerca dos efeitos do escorregamento no uso de filamentos com diâmetros menores, especificamente, 1,75 mm. Neste sentido, o presente estudo busca apresentar um módulo instrumentado desenvolvido para monitorar as possíveis falhas no cabeçote extrusor de uma impressora 3D do tipo RepRap para filamentos de 3 mm e 1,75 mm.

2. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO

2.1. Projeto Mecânico

Com a finalidade de monitorar a temperatura do sistema de extrusão e o escorregamento do filamento, foi desenvolvido um módulo de testes, por onde o filamento é conduzido antes de entrar no módulo extrusor (*Bulldog*®), conforme mostrado na Fig. 1 (a) e (b). O aparato é acoplado à parte superior do cabeçote extrusor, podendo trabalhar com filamentos de 1,75 e 3,00 mm de diâmetro. O protótipo foi projetado visando a simplicidade de fabricação, de modo que outros usuários possam reproduzi-lo em processos de manufatura aditiva ou fabricá-lo em metal.

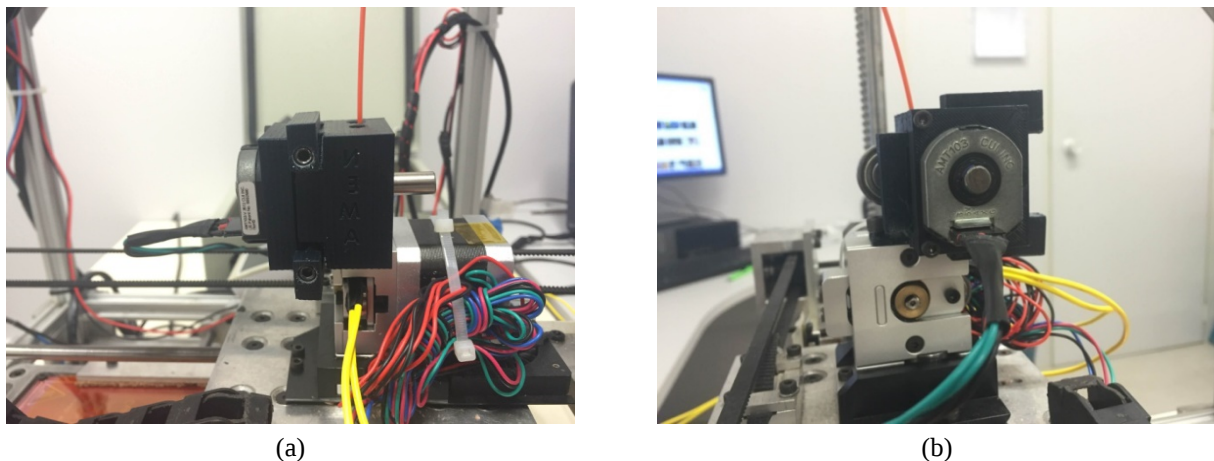


Figura 1. Sistema de monitoramento para extrusão acoplado ao Bulldog®, (a) vista frontal, e (b) lateral.

O sistema de monitoramento possui um eixo metálico envolvido por uma borracha, que sofre um movimento angular, devido ao contato gerado com a passagem do filamento (Fig. 2). O eixo é montado com rolamentos, para evitar que o atrito externo afetasse os ensaios, e acoplado a um *encoder*, modelo AMT103 CUI INC e gera pulsos proporcionais ao movimento do filamento. O módulo tem a capacidade de trabalhar com diferentes diâmetros de filamento, pois conta com um sistema de ajuste, composto por molas, que servem para aproximar e garantir a pressão de contato do filamento com o eixo.

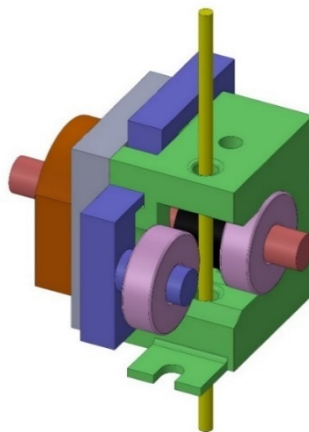


Figura 2. Módulo de ensaios para extrusão (CAD).

2.2. Projeto Eletrônico e supervisão

Para fazer a leitura dos dados obtidos pelo módulo de testes, foi desenvolvido um *firmware* que interpreta os sinais provenientes da instrumentação do mesmo. O *firmware*, desenvolvido em linguagem de programação em C, foi gravado em um microcontrolador *Atmega 2560*, da plataforma Arduino, no qual são conectados todos os sensores utilizados.

O Arduino é conectado diretamente ao sinal de *step* do *driver* do motor de passo, e à saída de sinal do *encoder* além de quatro sensores de temperatura do tipo PT-100. Para fazer a conexão desses sinais com o microcontrolador foi projetada e implementada uma placa de circuitos (*shield*) que é acoplado acima do Arduino facilitando e regulando a chegada de sinais.

Efetuada as aquisições, o microcontrolador envia os dados para o sistema supervisor *open source* SCADABR, que monitora os valores de temperatura, rotação do encoder e os *step* enviados ao motor de passo, a partir dos dados mostrados são feitas relações e gráficos entre os dados. Com este sistema, o usuário pode acompanhar em tempo real as informações do módulo extrusor, identificando parâmetros que influenciam negativamente nos resultados da impressão

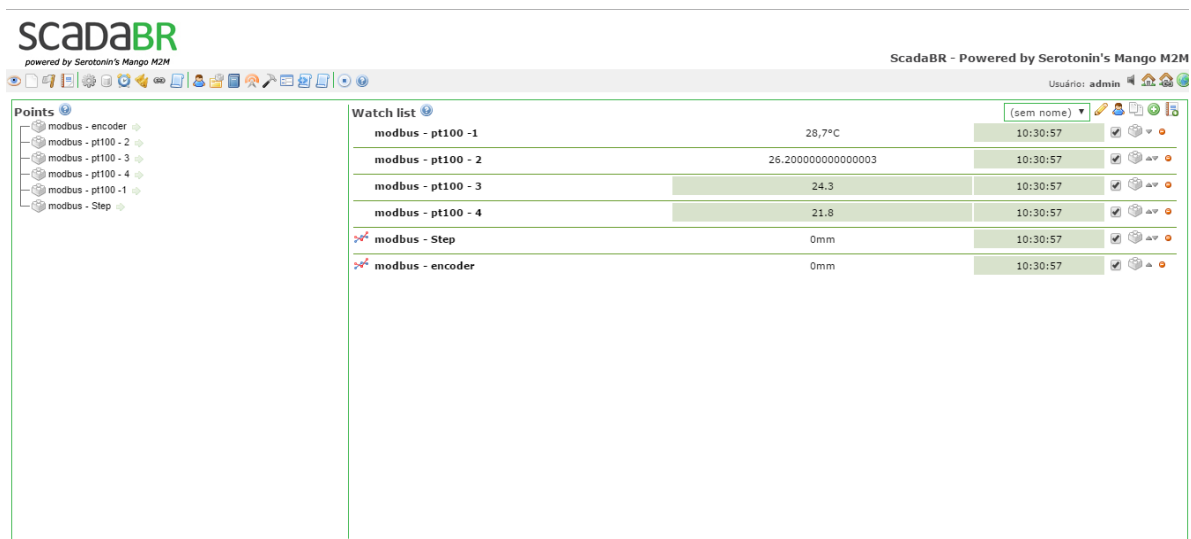


Figura 3. Interface de comunicação com usuário SCADABR.

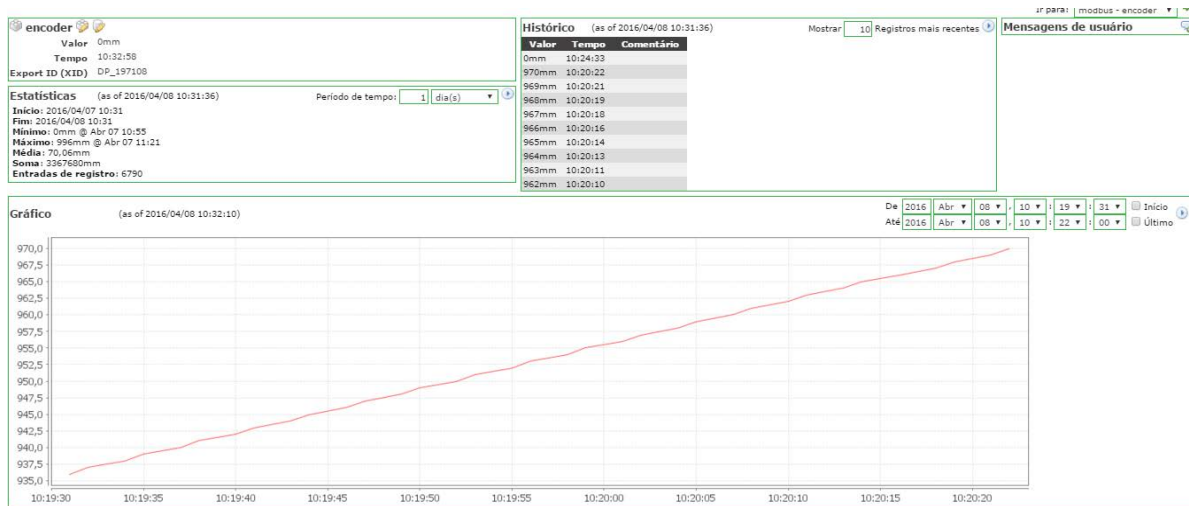


Figura 4. Valores de movimentação tabelados e em gráfico.

A ferramenta de supervisão SCADABR, mostrada acima, é executada em um computador pessoal, sendo diretamente ligada ao *firmware* do Arduino através de um link de comunicação *modbus-RS232*, possibilitando a troca de mensagens do sistema físico com o software de interface. A partir dessa integração de funcionalidades do sistema e a leitura dos sensores na tela, torna-se possível identificar quais os parâmetros influenciam negativamente ao longo da extrusão, em tempo de execução da tarefa, ver Fig. 5.

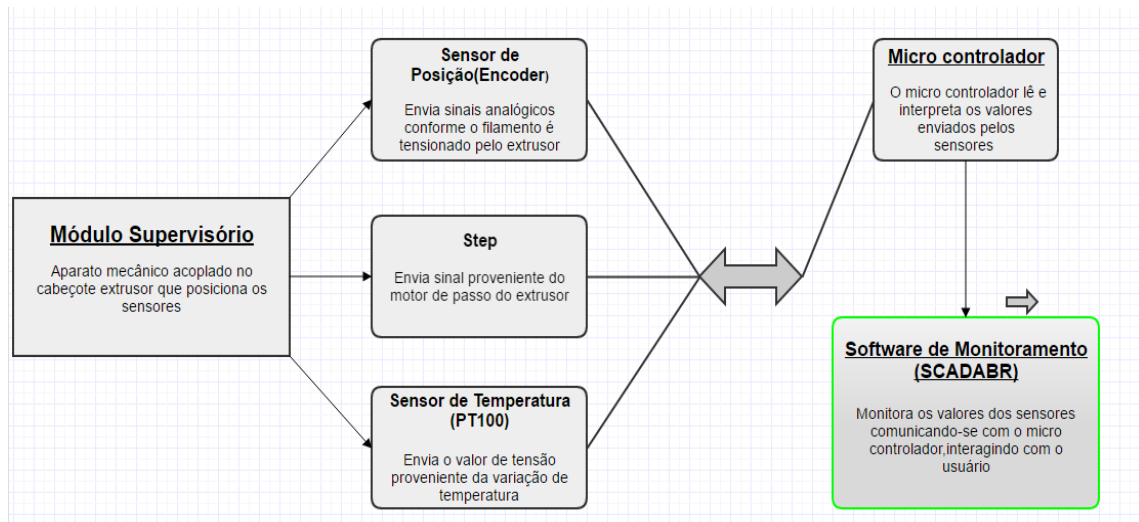


Figura 5. Módulos de aquisição de dados do sistema.

2.3. Procedimento experimental

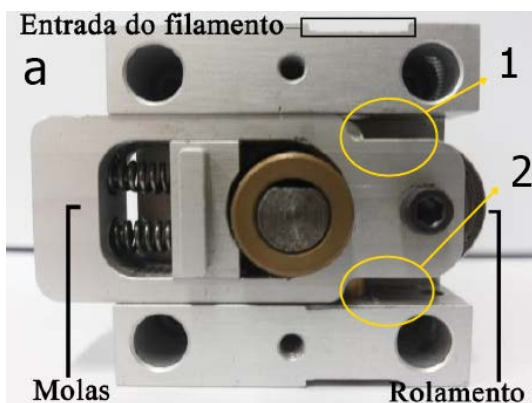
Para a realização dos testes de extrusão foi usado um módulo extrusor *Bulldog Lite*[®], configurado para utilização filamentos de 1,75 mm. Em conjunto com o módulo extrusor, na qual foi acoplado um bico do tipo *Hexagon Hotend* com 0,4 mm de diâmetro. Este modelo possui bico e dissipador térmico em sua composição. O aquecimento é realizado por meio de um resistor do tipo cartucho com potência de 30W.

Para avaliação do sistema de monitoramento, foram realizados testes de extrusão livre utilizando filamento de ABS (1,75 mm), com pigmentação laranja, fornecido pela empresa *3D Machine*. A impressora 3D utilizada para realização dos testes foi desenvolvida no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) e teve como referências plataformas de código aberto, dentre elas o modelo de máquina RepRap MendelMax.

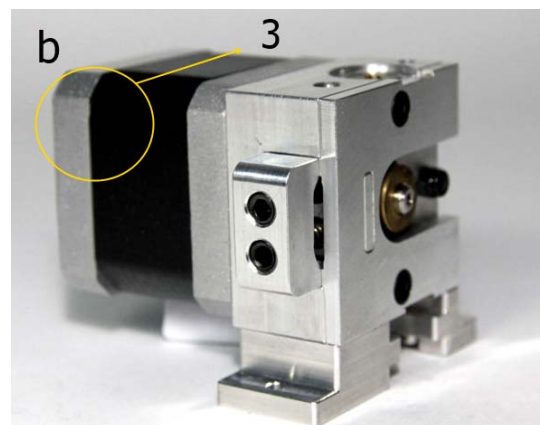
Os testes foram realizados com uma temperatura de extrusão de 230 °C, durante 25 minutos, usando uma velocidade de extrusão fixa de 40 mm/min, gerando um comprimento de 1000 mm de filamento por ensaio. Foram realizadas quatro repetições. Ao fim de cada etapa obteve-se o valor de somatório de *steps* enviados ao motor de passo do extrusor (1000 mm) em comparação com o valor medido pelo *encoder*. Em uma situação ideal, entre esses valores, existe uma proporção fixa *Kp*, determinada experimentalmente. O escorregamento é proveniente da diferença expressa na equação 1.

$$\text{Escorregamento} = \text{ValorStep} - Kp \cdot \text{ValorEncoder} \quad (1)$$

Os sensores de temperatura PT100 foram dispostos em regiões de interesse do módulo extrusor (Fig. 6), como: o eixo trator do *Bulldog Lite* e área de entrada do filamento (Região 1), o rolamento de tensão (Região 2), e motor de passo que move o eixo (Região 3). Buscou-se avaliar o comportamento térmico do módulo ao longo das extrusões e verificar se as temperaturas do motor, do eixo ranhurado que empurra o filamento, e da câmara por onde passa o filamento, influenciam no escorregamento. Tal verificação se faz necessária dada a proximidade destes elementos e a possível transferência de calor por condução ao filamento pode então ser testada.



(a)



(b)

Figura 6. Regiões de monitoramento de temperatura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Testes de temperatura

As figuras 7 (a), (b), e (c) apresentam os resultados das medições nas três regiões diferentes, julgadas importantes para monitoramento para a fusão e deposição do filamento em boa qualidade. Estes testes foram realizados sequencialmente, com o mínimo intervalo de tempo entre cada início de ensaio.

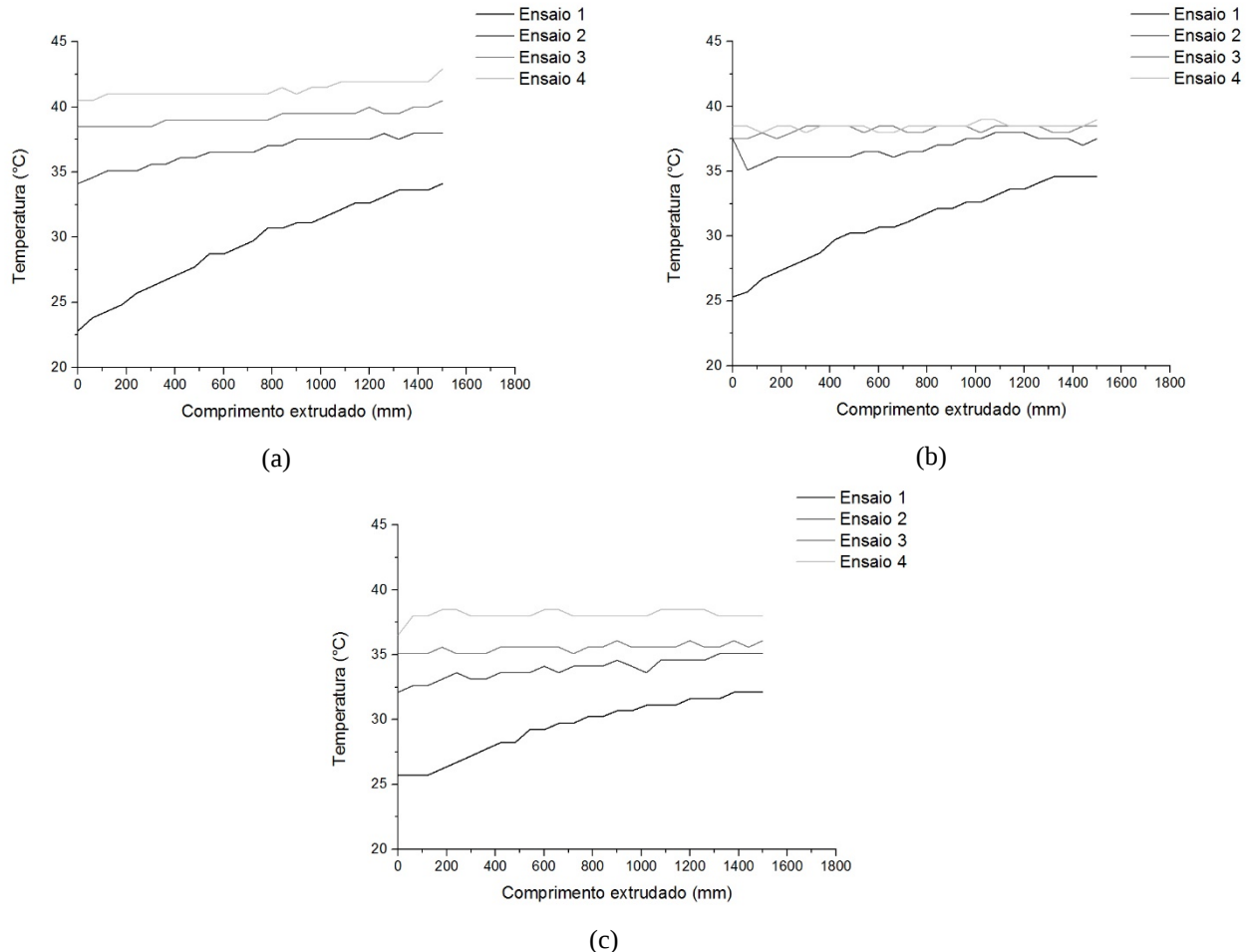


Figura 7. Resultados obtidos na medição de temperatura, (a) Região 1, (b) Região 2, e (c) Região 3.

Observa-se que, a cada novo ensaio, as temperaturas nas regiões monitoradas elevaram-se consideravelmente. Conforme os testes eram repetidos as temperaturas supervisionadas elevaram-se de uma forma que induz a afirmar que quanto mais tempo e repetições o processo demanda do extrusor, o aquecimento do mesmo se acentua. É possível inferir que o responsável por tal efeito é o bico aquecido, atuando como fonte de calor e, estando muito próximo aos demais componentes do cabeçote extrusor, o aquece por condução térmica. Além dos efeitos provenientes do bico na temperatura da região de tracionamento, há também um aquecimento do motor de passo do cabeçote extrusor, proveniente de sua condição de trabalho e que não pode ser negligenciado. O fato é que o aumento das temperaturas na região de tracionamento e o aquecimento da própria matéria-prima (filamento) causam problemas, sendo a causa mais importante para as falhas de escorregamento que ocorrem durante a fabricação de peças (Santana, 2015).

3.2 Testes de Escorregamento

Para diagnosticar a influência da temperatura durante o processo, os dados do *encoder* acoplado no módulo de teste foram comparados com os valores de *step* do motor. Comparando os sinais obtidos de ambas as saídas, foi possível verificar se o comando enviado pelo usuário e registrado pelo *step* do motor foi reproduzido pela máquina, a partir da rotação do eixo do *encoder*. Tais dados foram registrados em conjunto paralelamente aos ensaios de monitoramento da temperatura anteriores. Os resultados são apresentados na Fig.8 (a), (b), (c), e (d) que indicam quatro ensaios em sequência com as mesmas condições.

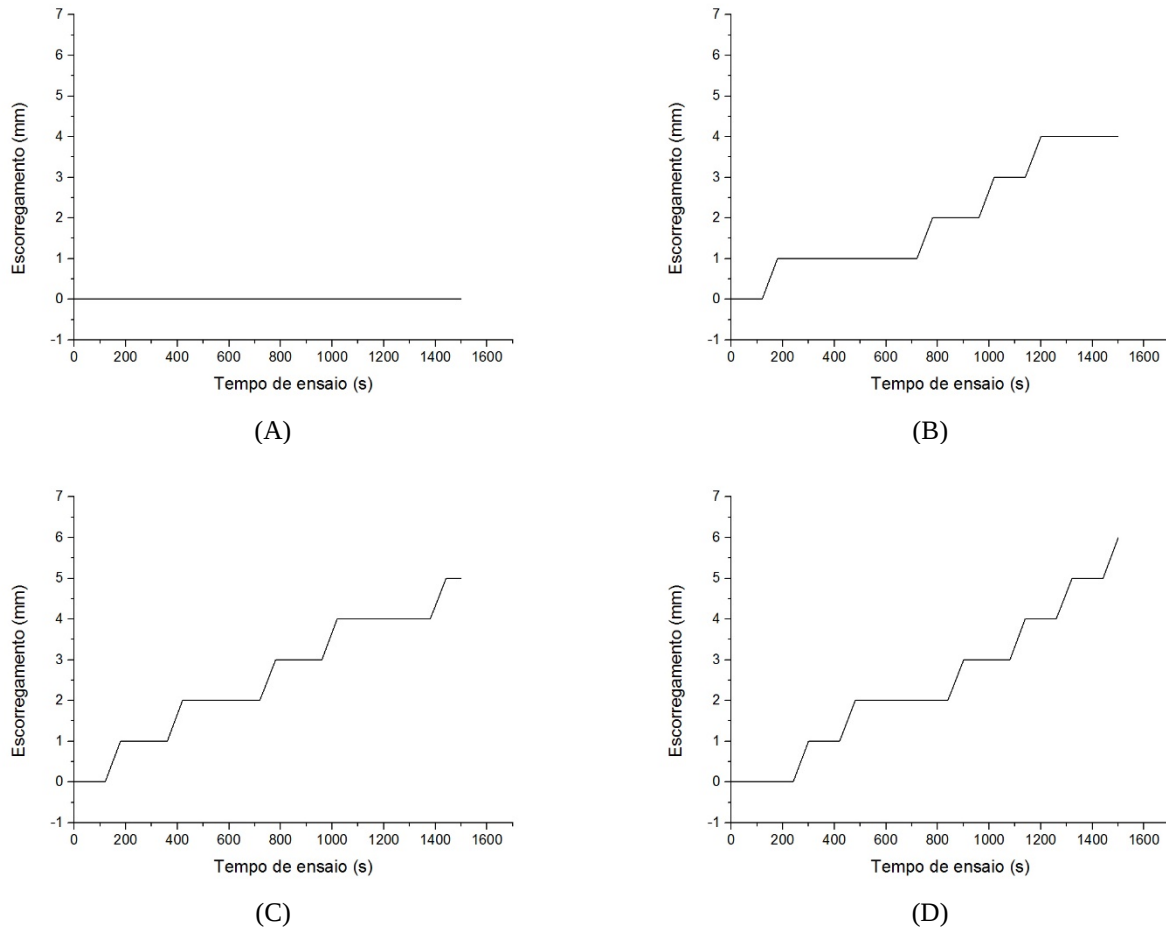


Figura 8. Escorregamento do filamento com o tempo: (a) Ensaio 1, (b) Ensaio 2, (c) Ensaio 3 e (d) Ensaio 4.

Como é possível observar na Figura 8a, o primeiro ensaio não apresentou escorregamento, enquanto os ensaios posteriores (Fig. 8b-d) começaram a se comportar de forma distinta, indicando um aumento gradativo das taxas de escorregamento.

Estes dados foram registrados através do tempo de extrusão, sendo possível traçar uma relação entre eles e calcular o percentual de escorregamento. Nota-se que o escorregamento tende a aumentar de maneira aproximadamente linear ao longo das extrusões. Isto é, conforme mais ensaios foram executados e o tempo de trabalho do extrusor aumentou, a taxa de escorregamento do processo apresenta valores cada vez mais elevados. Este fator compromete de forma negativa o desempenho da impressora 3D, por exemplo, na fabricação de peças mais complexas ou de dimensões maiores, que exigem mais tempo para serem fabricadas.

Da mesma maneira que nos testes de temperatura, a execução contínua de ensaios afetou os resultados obtidos, havendo um aumento gradativo de escorregamento nos ensaios de extrusão, conforme observa-se na Fig. 9.

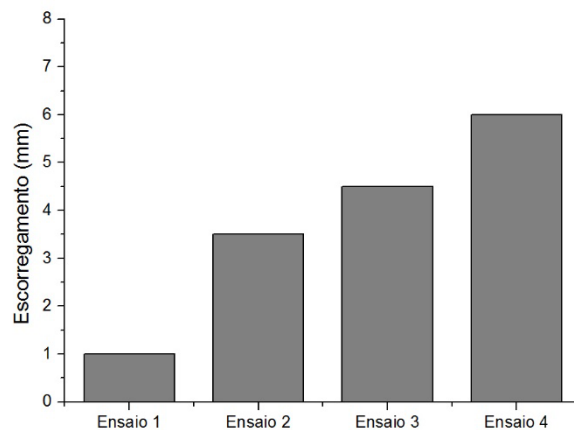


Figura 9. Escorregamento do filamento em função do ensaio.

Dos fatores que influenciam o aumento gradativo do escorregamento destacam-se a falha na comunicação entre o microcontrolador com sistema de extrusão, problemas no sistema mecânico do extrusor e a influência das temperaturas do sistema no processo. Durante a pesquisa foi enfatizado a influência da elevação da temperatura do sistema nos ensaios de extrusão para apontar causas para o acontecimento do escorregamento do filamento.

Observando os valores de temperatura do módulo e de escorregamento do filamento, é possível traçar uma relação entre ambos. Na medida em que o sistema eleva sua temperatura, a probabilidade de haver um escorregamento aumenta, tendendo a falhas na alimentação de filamento como consequência.

4. CONCLUSÃO

O sistema de monitoramento para cabeçote extrusor foi projetado e desenvolvido com êxito, tendo uma boa compatibilidade com o módulo de extrusão da impressora 3D, além de atender as expectativas na aquisição de dados de temperatura e movimentação da matéria prima (filamento). As informações provenientes dos sensores do módulo de monitoramento foram analisadas e armazenadas pelo software supervisor SCADABR a fim de traçar relações entre os dados. Deste modo, valida-se o conceito de módulo para monitoramento de escorregamento do módulo extrusor.

A partir dos resultados dos ensaios realizados, percebeu-se um aumento no valor de escorregamento em conjunto com o aumento nas temperaturas do sistema. Tal aumento no escorregamento entre o filamento e o eixo trator compromete a repetitividade de fabricação das peças na máquina.

Destaca-se que apesar da diferença de temperatura do sistema entre o início e o final dos ensaios ser de menos de 20°C, o acréscimo no escorregamento não pode ser ignorado, visto que peças que exigem maior precisão em seus parâmetros seriam afetadas de maneira significativa por tal escorregamento.

A partir de referências anteriores (Santana, 2015), também é notável que, comparativamente, os valores de escorregamento do filamento de 1,75mm são menores que os resultados dos ensaios com filamento de diâmetro de 3,00 mm. Tal fato justifica a utilização de filamentos de menor diâmetro, por estes exigirem menos esforços de tracionamento, além de diminuir a redução necessária para extrudar um filamento por um bico aquecido de 0,4mm de diâmetro.

A constatação desta relação torna evidente a influência da temperatura do sistema extrusor para melhor qualidade no processo de impressão 3D, salientando a importância da refrigeração dessa região. Com base nas análises, é indicado utilizar um sistema de refrigeração no cabeçote extrusor da máquina de impressão 3D com ênfase na região próxima ao eixo recartilhado que traciona o filamento. Tal medida ajudaria a diminuir a temperatura na região de trabalho e evitaria o escorregamento na alimentação de material. Outra oportunidade evidenciada no âmbito dessa pesquisa é o aprimoramento nas funções exercidas pelo SCADABR, é possível que o sistema supervisor envie sinais de alerta ao usuário ao constatar o escorregamento, e realizaria o controle para melhor desempenho do motor de passo, interrompendo as operações da máquina caso a mesma não atinja os parâmetros estipulados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Santa Catarina, pela infraestrutura e pelos recursos disponibilizados.

6. REFERÊNCIAS

- Agarwala, M. K.; Jamalabad, V. R.; Langrana, N. A.; Safari, A.; Whalen, P. J.; Danforth, S. C., 1996, "Structural quality of parts processed by fused deposition". *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 2(4), pp. 4-19.
- Casagrande, M.V.S., 2013, "Projeto de um cabeçote de extrusão de uma máquina de prototipagem rápida FDM", 110p. Projeto de Graduação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro.
- Huang, B., 2014, "Alternate Slicing and Deposition Strategies for Fused Deposition Modelling", Ph.D. thesis, School of Engineering, Auckland University of Technology, Auckland.
- Santana, L., 2015, "Avaliação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA", 166 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis.
- Sood, A.K., 2011, "Study of Parametric Optimization Fused Deposition Modelling (FDM) Process", Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, India.
- Weeren, R. Van; Agarwala, M.; Jamalabad, V. R.; Bandyopadhyay, A.; Vaidyanathan, R.; Langrana, N.; Safari, A.; Whalen, P.; Danforth, S.; Ballard, C., 2013, "Quality of Parts Processed by Fused Deposition", Disponível em: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/1995/1995-37-Weeren.pdf>, acesso em: 14 de junho de 2016.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EXTRUDER MONITORING SYSTEM FOR ADDITIVE MANUFACTURING

Guilherme Bueno Silveira, guilherme.ifsc@gmail.com¹

Igor Pereira, ip.pereiraigor@gmail.com¹

Leonardo Santana, leonardosantana29@gmail.com¹

Cassiano Bonin, cassbonin@ifsc.edu.br¹

Aurélio da Costa Sabino Netto, asabino@ifsc.edu.br²

¹Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis, Florianópolis - SC

Abstract. *With a wide application area, the technologies related with the additive manufacturing process by extrusion are increasing gaining prominence. Among the modules that compose a 3D printer, the extruder is responsible for fusion and modeling of the raw material. This module has a motor responsible for the conduction of the filament to the hot end nozzle that deposits the material for print. This process of conduction, fusion and deposition of filament can present some imperfections that affect directly in the quality of the printer part, like an obstruction in the hot end tube, step loss in the extruder motor and the slip between the filament and the friction element. Currently, there are a few publications and studies about the behavior of the 3D printer extruders and his improvement. In this way, the current study intent to search and monitor the problems on the 3D printer extruder, proposing adjustments and improvements. For the monitoring of the extruder, was developed an instrumented system capable to register the filament movement through the module and the temperature in some of his points, with and rotational encoder and temperature sensor type PT100. With a series of tests, was recorded information that shows the temperature control as a relevant factor for the good operation of the extruding system. With the encoder was recorded the filament movement inside the extruder and then compared with the step motor signal from the step motor drive, making a relation between command and the true valor. With those analyzed tests was possible to record the failures of the filament traction that can affect the material deposition. Having established the extrusion variables that mainly affect the general quality of a printed part, the supervisory control system SCADABR was utilized to monitor the system and register the events that can make the fabrication of a part bellow of the project requirements.*

Keywords: Additive Manufacturing, 3D Print, Extrusion, SCADABR.