

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Matheus Massaru Ito

**Calibração de sistema de acionamento, para um cabeçote
intercambiável de extrusão vertical baseado em
monorosca**

São Carlos

2020

Matheus Massaru Ito

**Calibração de sistema de acionamento, para um cabeçote
intercambiável de extrusão vertical baseado em
monorosca**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Dra. Zilda de Castro Silveira
Coorientador: Luiz Eduardo Frezzatto Santos

**São Carlos
2020**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

I88c Ito, Matheus M.
Calibração de sistema de acionamento, para um
cabeçote intercambiável de extrusão vertical baseado em
monorosca / Matheus M. Ito; orientadora Zilda de Castro
Silveira. São Carlos, 2020.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2020.

1. sistema de acionamento. 2. controle torque e
velocidade. 3. extrusão. 4. manufatura aditiva. 5.
processamento de pó.. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Matheus Massaru Ito

Título: "Calibração de sistema de acionamento, para um cabeçote intercambiável de extrusão vertical baseado em monorosca"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 04 / 12 / 2020,

com NOTA (10,0 , Dez), pela Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Zilda de Castro Silveira - Orientadora - SEM/EESC/USP

Prof. Titular Alberto Cliquet Junior - SEL/EESC/USP

Mestre Henrique Takashi Idogava - Doutorando SEM - EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

AGRADECIMENTOS

Agreço à Prof^a Dr^a. Zilda de Castro Silveira por apoiar, ajudar e orientar durante o decorrer deste trabalho.

À meus pais Akira Ito e Carla Ap. Massae Uekawa Ito pelo suporte e apoio moral.

À minha namorada e parceira Lais Novelli pelo amor e pelo apoio nos momentos difíceis.

E aos meus companheiros de laboratório Luiz Eduardo Frezzatto Santos, Joaquim Netto Barbosa, Henrique Takashi Idogawa pela ajuda, amizade e esforços compartilhados durante este trabalho.

RESUMO

Ito, M.M. **Calibração de sistema de acionamento, para um cabeçote intercambiável de extrusão vertical baseado em monorosca.** 2020. 85p.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

Esse trabalho tem como principal objetivo propor um procedimento implementado por uma rotina computacional, para um sistema de acionamento para cabeçotes baseados em roscas para manufatura aditiva. Esse procedimento foi dividido na seleção dos principais parâmetros eletromecânicos, para controle de velocidade de rotação da rosca e torque conjugado com a variação da temperatura de impressão. Na sequência foi projetada as configurações de hardware, com auxílio computacional e realizados testes de validação do sistema. A última etapa foi a validação experimental com o protótipo funcional do cabeçote intercambiável de extrusão por monorosca para utilização em ambiente de pesquisa. O projeto e montagem de impressoras 3D baseadas em mecanismos de extrusão por rolo de tracionamento (FDM, patente expirada) são amplamente difundidos na comunidade open source design, porém com certas restrições pelo próprio princípio de funcionamento por deposição filamentar e variedade de materiais disponíveis comercialmente, em relação à qualidade dimensional e acabamento superficial. Para que haja repetição com confiabilidade, o filamento deve manter sua forma, suportar as forças de atrito e o carregamento de flambagem no período de plastificação. Essa condição só pode ser garantida, desde que sejam aplicados uma força e rigidez suficientes ao segmento filamentar envolvido no processo de deposição, no caso da monorosca, os controles operacionais são velocidade de rotação, curva de torque e temperatura. Considerando que o processo é dependente de um conjunto de variáveis, e em especial para mecanismos baseados em roscas de extrusão, o controle da velocidade de rotação e torque são fundamentais para avaliar o tempo de residência do material que é uma das medidas reológicas para avaliar a qualidade da mistura do material ao longo da geometria dimensionada.

Palavras-chave: Sistema de Acionamento; Controle Torque e Velocidade; Extrusão; Manufatura Aditiva; Processamento de Pó.

ABSTRACT

Ito, M.M. **Drive system calibration for a print head based on single screw applied to additive manufacturing.** 2020. 85p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

This work proposes the development of the hardware and computational routine dedicated to the driven system control of the interchangeable single screw applied to additive manufacturing. The main parameters studied and calibrated were rotating speed screw and torque, considering the processing material temperature. The steps to procedure development and implementation were the selection of the main electromechanical parameters, to control the thread rotation speed and torque considering the variation of the printing temperature. In the sequence, the hardware configurations were designed, with computational assistance and system validation tests were carried out. The last step was the experimental validation of the functional prototype of the interchangeable single screw print head for use in a research environment. The design and assembly of 3D printers based on extraction roller mechanisms (FDM – Fused Deposition Modeling, expired patent) are widespread in the open source design community, however with certain restrictions due to the principle of operation by filamentary deposition and variety of commercially available materials, regarding dimensional quality and surface finish. In order to obtain repeatability in the final parts, the filament must maintain its shape; withstand the frictional forces and the buckling load during the plasticization period. This condition can only be guaranteed, as long as sufficient force and rigidity are applied to the filament segment involved in the deposition process, in the case of single screw print head the operational controls parameters are rotation speed, torque curve and temperature. Considering that the process is dependent on a set of variables, and especially for mechanisms based on extrusion threads, the control of rotation speed and torque are fundamental to assess the residence time of the material, which is one of the rheological measures to evaluate the quality of the material mixture along the dimensioned geometry.

Keywords: Drive System; Rotating Speed and Torque Control; Additive Manufacturing; Powder Processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modos de falha durante o processo de extrusão (da esquerda para direita): diâmetro inconsistente do filamento que excede o diâmetro do bico; retorno anular flambagem do filamento.	18
Figura 2 – Fab@CTI.	19
Figura 3 – Protótipo de cabeçote de extrusão vertical baseado em monorosca. . . .	20
Figura 4 – Cabeçotes da Fab@CTI.	21
Figura 5 – Impressora 3D Fab@CTI com cabeçote de deposição por extrusão (rosca de seção variável).	22
Figura 6 – Cabeçote de extrusão e principais componentes.	23
Figura 7 – Dimensões da rosca de extrusão (mm).	24
Figura 8 – Desenho esquemático dos elementos que compõem o cabeçote de extrusão desenvolvido.	24
Figura 9 – Simulação térmica do perfil de temperatura no conjunto barril-rosca. .	25
Figura 10 – Sistema de instrumentação térmica e simulação térmica do cabeçote de extrusão. (a)Cabeçote de extrusão com termopares acoplados para análise de temperatura, (b)Imagem termográfica do cabeçote em funcionamento, (c)Perfil de temperatura para aquecimento de 90°C.	26
Figura 11 – Sistema mecânico atual do cabeçote. (a)Caixa de redução do cabeçote; (b)Funil com encapsulamento do cabeçote de extrusão.	27
Figura 12 – Estapas do Processo de Manufatura Aditiva.	29
Figura 13 – Princípios de processos de Manufatura Aditiva considerando passo único ou vários passos.	30
Figura 14 – Visão geral dos princípios de processamento para processos aditivos utilizando polímeros como matéria-prima.	31
Figura 15 – Principios de alimentação dos processos de MA por extrusão de material: (a)filamento contínuo; (b)varetas com perfil de cremalheira; (c)material em estado granulado; (d)êmbolo; (e)pressão com agulha controladora de vazão.	32
Figura 16 – Vista esquemática da técnica aditiva por matéria prima filamentar, com duas seringas de extrusão.	32
Figura 17 – Representação dos parâmetros de processo: (a)Parâmetros de processo FFF; (b)Orientação da peça.	33
Figura 18 – (a)Esquema do cabeçote monorosca; (b)Plataforma experimental Fab@CTI; (c)Processo de impressão 3D utilizando o cabeçote.	37
Figura 19 – (a)Rotor ; (b)Estator de um motor de passo.	38
Figura 20 – Esquemático de motor de passo em 2 e 3 pares de bobinas.	39

Figura 21 – Acionamento do motor de passo em modo unipolar.	40
Figura 22 – Acionamento do motor de passo em modo bipolar.	40
Figura 23 – Acionamento Unipolar em meio passo.	41
Figura 24 – Acionamento Bipolar em meio passo.	41
Figura 25 – Motor de relutância variável.	42
Figura 26 – Motor de Ímã Permanente.	42
Figura 27 – Motor de Passo Híbrido.	43
Figura 28 – Curva de <i>Pull-Out</i> Torque característica dos motores de passo.	44
Figura 29 – Freio de prony com marcações.	45
Figura 30 – Desenho com dimensões do motor kalatec.	48
Figura 31 – Informações contidas no <i>Datasheet</i> do fabricante.	49
Figura 32 – Curva de torque do modelo AK23/21F8FN1.8, fabricado pela Neomotion.	50
Figura 33 – Motores com eixos conectados por bucha de ABS para teste de Back-EMF.	51
Figura 34 – <i>Setup</i> de bancada para levantamento da curva de torque do motor.	52
Figura 35 – Peças do freio de prony confeccionado, com dimensões para cálculo de força resultante.	53
Figura 36 – <i>Driver</i> modelo WD2404 da Wotiom.	53
Figura 37 – <i>Driver</i> Pololu DRV8825.	54
Figura 38 – Sensor de Velocidade <i>Encoder</i> 9SS28.	54
Figura 39 – Lógica de funcionamento do encoder incremental.	55
Figura 40 – (a)RAMPS 1.4; (b)Logo da Marlin Firmware	55
Figura 41 – (a)Termistor NTC3950 100K; (b)Cartucho de Aquecimento 40W; (c)Placa de Aquecimento Heater Bed RepRap	57
Figura 42 – Esquema de ligações da RAMPS para os componentes do sistema de aquecimento.	58
Figura 43 – <i>Setup</i> de bancada para verificação de acionamento do motor.	59
Figura 44 – Osciloscópio aquisitando sinais de pwm(superior) e do encoder(inferior).	60
Figura 45 – <i>Setup</i> de bancada pra teste back EMF.	62
Figura 46 – Fonte: Autoria própria.	62
Figura 47 – Curva de Back EMF plotada.	63
Figura 48 – <i>Setup</i> do freio para levantamento da curva de torque com carga aplicada sobre o braço.	64
Figura 49 – Gráfico com curva de torque em função da velocidade de rotação.	65
Figura 50 – Gráfico com contraste de curvas teste vs kalatec.	66
Figura 51 – Gráfico com contraste de curvas teste vs NeoMotion.	66
Figura 52 – <i>Setup</i> de bancada para medição de temperatura.	69
Figura 53 – Monitoramento de funcionamento do sistema aquecimento pelo Repetier.	69
Figura 54 – Monitoramento de funcionamento do sistema de controle de temperatura pelo Repetier.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados do teste de Back-EMF.	63
Tabela 2 – Valores obtidos no teste de torque.	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação e Objetivo	18
1.2	Objetivos Específicos	20
2	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
3.1	Considerações sobre Manufatura Aditiva	29
3.2	Conceitos sobre a técnica aditiva <i>Filament Fused Fabrication</i>	31
3.3	Processamento por Extrusão	35
3.3.1	Cabeçotes de Extrusão por Rosca	35
3.3.2	Tempo de Residência	37
3.4	Motor de Passo	37
3.4.1	Princípio de Funcionamento	38
3.4.2	Modo de acionamento	39
3.4.3	Tipos de motores de passo	39
3.4.4	Perfil Torque vs. Velocidade	42
3.5	Freio de Prony	44
4	MATERIAIS E MÉTODOS	47
4.1	Implementação de um sistema de controle de tensão x velocidade	47
4.2	Seleção do motor	47
4.2.1	Counterelectromotive Force [Back-EMF]	48
4.2.2	Perfil de Torque & Freio de Prony	50
4.3	Drivers Wotion WD2404 e Pololu DRV8825	51
4.4	Microcontrolador Mega 2560	52
4.5	<i>Encoder</i> Incremental Digital 9SS28	52
4.6	RAMPS 1.4 & Marlin	55
4.6.1	Repetier-Host	56
4.6.2	Controle e Sensoriamento de Temperatura	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1	Acionamento do motor	59
5.2	KTC-HT23-401 Kalatec Nema 23	61
5.2.1	Back-EMF	61
5.2.2	Freio de Prony e Curva de Torque Experimental	64
5.3	Aquecimento e controle de temperatura	67

6	CONCLUSÃO	71
6.1	Conclusões sobre o projeto	71
6.2	Dificuldades encontradas	72
6.3	Trabalhos Futuros	72

	REFERÊNCIAS	75
--	--------------------	-----------

	APÊNDICES	81
--	------------------	-----------

	APÊNDICE A – CÓDIGO DE ACIONAMENTO DO MOTOR NEMA23	83
--	---	-----------

1 INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva apresenta muitos desafios com relação à pesquisa básica e aplicada, porque está inserida num domínio particular, no qual os conhecimentos transversais integrados de diferentes especialidades dentro da engenharia, tais como, áreas de projeto e fabricação, ciência e engenharia de materiais, instrumentação, melhoria e implementação de interfaces com hardware e software são entrelaçados para se obter peças finais com repetibilidade e integridade estrutural.

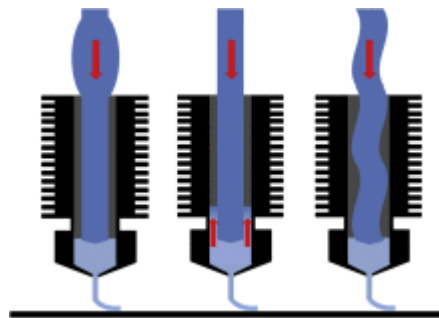
A técnica aditiva por extrusão ou FFF (Fused Filament Deposition), definida pela ISO-ASTM 52900;11961:2015 (E) é amplamente utilizada, a partir de matéria-prima termoplástica sob a forma sólida filamentar (THOMPSON et al., 2016; BALANI et al., 2019).

Seu papel relevante e popularidade dentro da Manufatura Aditiva (MA) decorre das contribuições de pesquisa e do mecanismo mais simplificado de deposição, oriundos de projetos acadêmicos como o RepRap.org e Fab@home, das Universidades de Bath e Cornell, respectivamente, dando início nos anos de 2006 e 2007, ao movimento open source design em impressão 3D low-end e criando o conceito das redes mundiais FabLabs. Com relação às pesquisas desenvolvidas diversos trabalhos têm sido publicados com diferentes focos de investigação: macroestrutura por meio da qualidade final da peça considerando acabamento superficial e a precisão geométrica; (ONWUBOLU; RAYEGANI, 2014; GALANTUCCI et al., 2015; VOLPATO et al., 2015; CHAIDAS et al., 2016; TYMRAK; KREIGER; PEARCE, 2014; ALAFAGHANI et al., 2017; SANTANA; ALVES; NETTO, 2017), bastante correlacionada com as áreas de processo de fabricação e caracterização de propriedades mecânicas; mesoestrutura por meio do estudo da morfologia de deposição (estruturação), e mais recentemente trabalhos teórico experimental para investigações do comportamento termomecânico das microestruturas e mesoestruturas (COSTA; DUARTE; COVAS, 2015; BALANI et al., 2019).

Durante o processo de deposição aditivo por extrusão, há um conjunto de requisitos técnicos multifatoriais, incluindo àqueles relacionados com o comportamento reológico/-mecânico filamentar, que deve atender a requisitos técnicos, como diâmetros calibrados dos bicos de deposição correlacionados com uma tolerância de ovalização deforma, para uma taxa constante de fluxo no tempo (SPOERK; HOLZER; GONZALEZ-GUTIERREZ, 2020). Também devem apresentar uma rigidez suficiente que permita que o filamento possa ser conduzido em formato de bobina até a câmara de aquecimento e, então depositado em deslocamento na base móvel de deposição. Alguns estudos citam um campo de tensão mínima em torno de 5%, de modo que, o filamento possa ser continuamente enrolado. Essa variação de tensão pode estar relacionada com a alta quantidade de preenchimento

nos filamentos, de acordo com a sua pigmentação (SPOERK; HOLZER; GONZALEZ-GUTIERREZ, 2020). Essa condição conduz a modos de falhas no processo de deposição e, consequentemente na parada do equipamento e/ou falhas primárias nas peças finais. A Figura 1 ilustra esses modos de falha primários, em sistemas aditivos baseados em FFF, que possui similaridade com princípios físicos de reômetros capilares.

Figura 1 – Modos de falha durante o processo de extrusão (da esquerda para direita): diâmetro inconsistente do filamento que excede o diâmetro do bico; retorno anular flambagem do filamento.



Fonte: (GILMER et al., 2018)

Para que haja repetição com confiabilidade do movimento entre as roda motriz e a conduzida, o filamento deve manter sua forma, suportar as forças de atrito e o carregamento de flambagem no período de plastificação. Essa condição só pode ser garantida, desde que sejam aplicados uma força e um valor de rigidez suficientes ao segmento filamentar envolvido no processo de deposição.

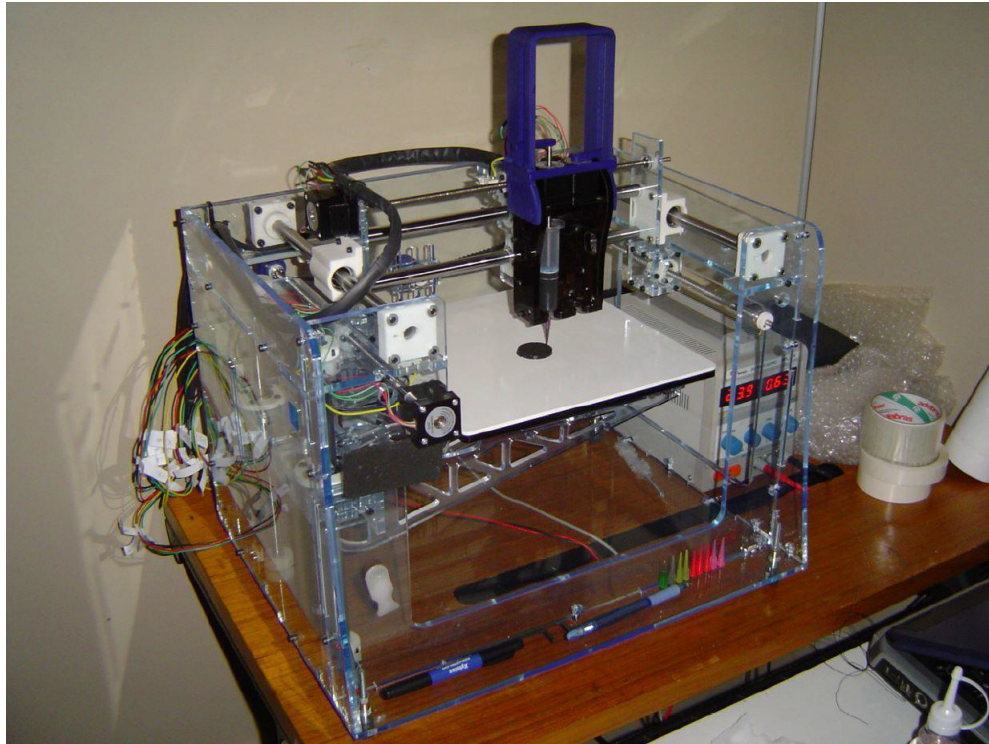
Considerando que o processo é dependente de um conjunto de variáveis, e em especial para mecanismos baseados em roscas de extrusão, o controle da velocidade de rotação e torque são fundamentais para avaliar o tempo de residência do material, em função da geometria pré-fixada, que fornece a qualidade da mistura ao longo da geometria pré-projetada.

1.1 Motivação e Objetivo

A proposta deste estudo adviu de vários trabalhos acerca de implementações (e.g. (SANTOS, 2019; NETTO; SILVEIRA, 2018; FREITAS, 2014)), melhorias e desenvolvimentos de tecnologias e modificações para manufatura aditiva para fins de pesquisa.

Inicialmente, Inforçatti Neto (2007) em parceria com o CTI Renato Archer desenvolveu uma impressora 3D adaptada, tendo o projeto Fab@Home (2006) como base (Figura 2). Denominando-a de Fab@CTI, Inforçatti Neto (2007) construiu uma plataforma de impressão com cabeçote de extrusão intercambiável entre, extrusão por seringa e extrusão por filamento fundido.

Figura 2 – Fab@CTI.

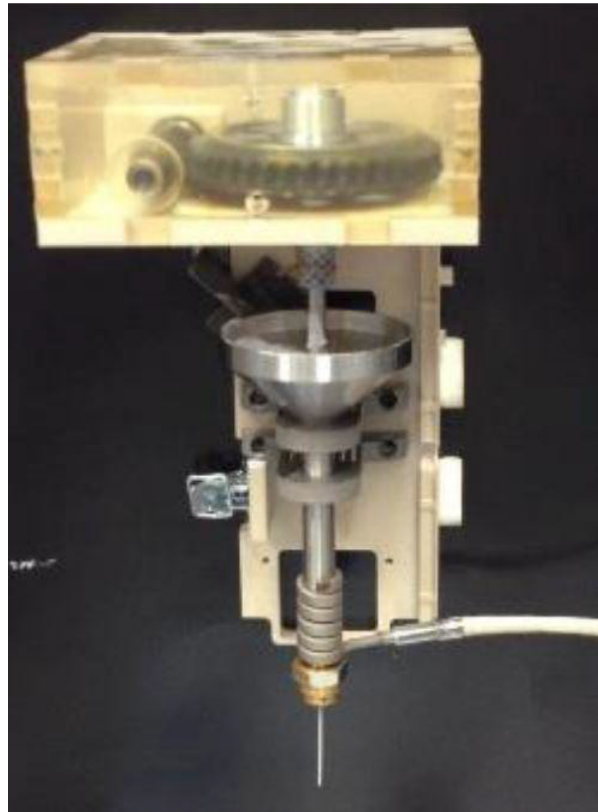


Fonte: (INFORÇATTI, 2007)

O projeto Fab@CTI visava anteriormente o porte reduzido para adequar-se ao ambiente de pesquisa e estudar as possibilidades de intercambiabilidade entre diferentes tipos de cabeçotes. Posteriormente, a área de pesquisa de desenvolvimento de materiais observou a necessidade de processar materiais em pequenas quantidades de material em estado particulado, fator este, que desencadeou uma série de estudos, entre pesquisadores de diferentes universidades, resultando no levantamento de diferentes características técnicas, que os guiaram ao desenvolvimento de um novo cabeçote de extrusão baseado em extrusão por rosca de seção variada. A partir disso, dois estudos foram realizados, sendo que um deles teve como foco o projeto e estudo do cabeçote (NETTO, 2013), e o outro teve como foco a validação experimental e análise paramétrica (FREITAS, 2012). A figura 3, mostra o protótipo do cabeçote desenvolvido por (FREITAS, 2014) durante seus estudos.

Este novo cabeçote de dimensões reduzidas permite o controle parcial do processamento de materiais poliméricos e com carga cerâmica. No entanto, o elevado peso do sistema mecânico e à elevada inércia do cabeçote, gera deslocamentos significativos no bico do extrusor que ocasionam imprecisões nos modelos impressos. Em detrimento disto, Frezzatto Santos (2019), realizou um estudo acerca de possíveis melhorias no sistema extrusão da figura 3. Seu estudo visou principalmente o aumento da robustez da estrutura que suporta o cabeçote, a redução de vibração causada pela inércia, e analisou a possibilidade de alteração no sistema de redução e sua caixa acoplamentos.

Figura 3 – Protótipo de cabeçote de extrusão vertical baseado em monorosca.



Fonte: (FREITAS, 2014)

O objetivo do estudo proposto neste documento é aprofundar a documentação técnica a respeito dos parâmetros elétricos e eletrônicos relacionados ao estudo realizado por Frezzatto Santos (2019), e contribuir para a área acadêmica no desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao acionamento de sistemas eletromecânicos de baixa potência, assim como, unir conhecimentos multi-disciplinares relacionados a um tema recente.

1.2 Objetivos Específicos

Dentre tudo que o escopo deste projeto engloba tem-se os seguintes pontos por objetivos específicos à este trabalho:

- Levantamento de parâmetros eletromecânicos utilizando sistema rosca-barril;
- Implementação de uma rotina computacional para calibração da curva torque x velocidade e temperatura;
- Validação experimental dos resultados obtidos;
- Implementação e protótipo funcional do sistema de acionamento.

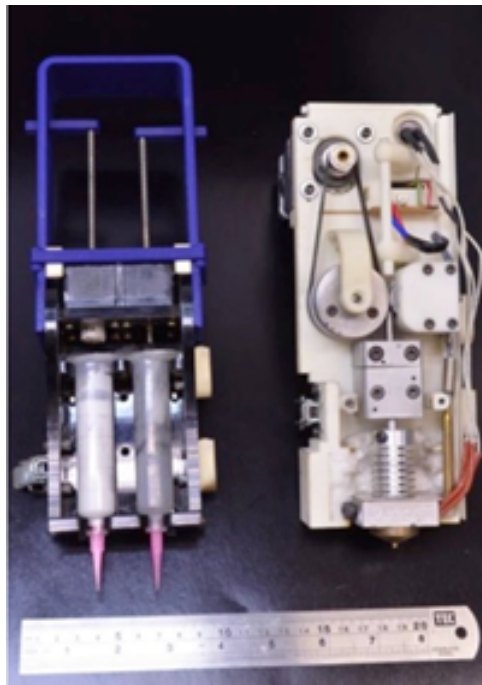
2 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

As impressoras 3D definidas como “desktop” começaram a ser difundidas mundialmente por meio das pesquisas desenvolvidas na Universidade de Cornell, com publicações e disponibilização do projeto Fab@home, pelos pesquisadores Malone e Lipson (2007) e pela Universidade de Bath, pelo pesquisador Bowyer, A., por meio do projeto open source “RepRap” (JONES et al., 2011).

Nesse contexto, em 2007 foi iniciado um projeto para implementação de impressoras 3D low-end e open source no CTI (Centro Federal de Tecnologia Renato Archer), localizado na cidade de Campinas, pela Divisão de Tecnologias Tridimensionais.

O projeto denominado Fab@CTI, tema do trabalho de conclusão de curso de Inforçatti Neto (2007), pautou-se na replicação do equipamento Fab@Home e melhoria do dispositivo de impressão baseado na técnica aditiva de injeção de material viscoso. No projeto, foram montados dois bicos com o objetivo de imprimir material biocompatível utilizando seringa e filamento baseado na patente FDM respectivamente (figura 4).

Figura 4 – Cabeçotes da Fab@CTI.



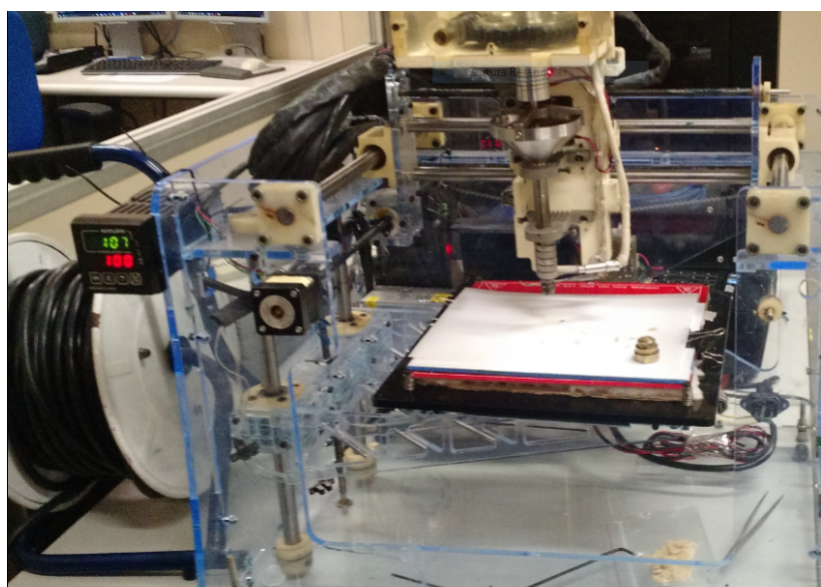
Fonte: Adaptado de (INFORÇATTI, 2007)

Inforçatti Neto (2007) e Freitas (2012) continuaram o projeto dentro do conceito de intercambiabilidade, por meio do desenvolvimento da solução construtiva e dimensionamento de um cabeçote de monorosca de seção variável com a proposta de processar matéria-prima em estado de pó e deposita-la em estado fundido para reuso de polímero

descartado (Nylon® 12) proveniente do equipamento industrial baseado na técnica de leito de pó (SLS). Posteriormente, a possibilidade de se processar PCL se mostrou uma frente de pesquisa para geração de scaffolds com aditivos (CUNHA et al., 2019; DÁVILA et al., 2016).

Dessa forma, a impressora 3D Fab@CTI (figura 5) se tornou uma plataforma de pesquisa com o objetivo de estudar o processamento de termoplásticos com aditivos e carregamentos, em baixas quantidades com possibilidade de pequena fração de materiais cerâmicos, para aplicações em medicina regenerativa (NETTO, 2013; SILVEIRA et al., 2014).

Figura 5 – Impressora 3D Fab@CTI com cabeçote de deposição por extrusão (rosca de seção variável).



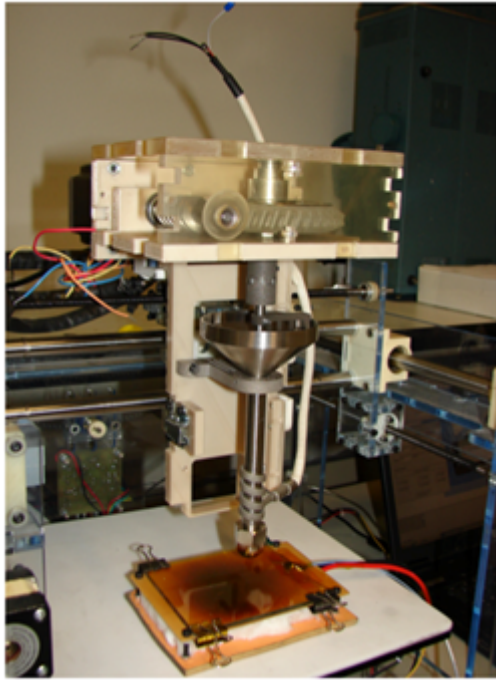
Fonte: Adaptado de (NETTO, 2013)

O cabeçote desenvolvido, assim como a mini-rosca de extrusão são mostradas na figura 6. A mini-rosca possui seção variável, ou seja, apresenta diferentes diâmetros para as zonas de alimentação, de compressão e de saída.

No cabeçote de extrusão, objeto deste estudo, o material em estado de pó é inserido no funil de alimentação e conduzido para dentro da cavidade do barril de extrusão pelo movimento rotativo de um rastelo solidário à rosca de extrusão. O material ao atingir a zona de compressão começa a se liquefazer devido ao atrito com a rosca e com as paredes internas do barril, ao aumento da pressão na cavidade e do calor gerado pelo aquecimento da resistência elétrica posicionada externamente à superfície do barril. Por fim o material é forçado através de uma restrição (bico de extrusão) e depositado sobre o substrato da plataforma. A figura 7 apresenta as dimensões da monorosca e o rastelo.

Os elementos mecânicos que constituem o conjunto que formam o cabeçote de

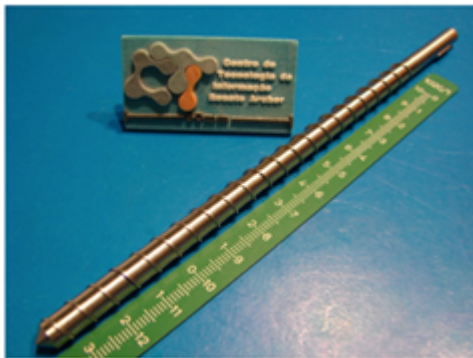
Figura 6 – Cabeçote de extrusão e principais componentes.



(a)



(b)



(c)



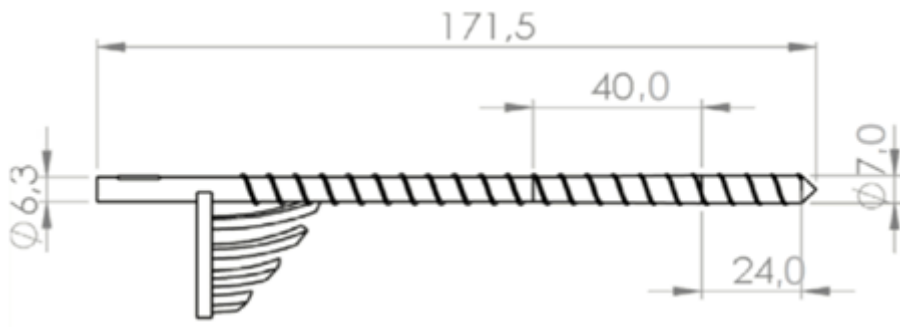
(d)

Fonte: Adaptado de (NETTO, 2013)

deposição baseado na mini monorosca são apresentados na figura 8.

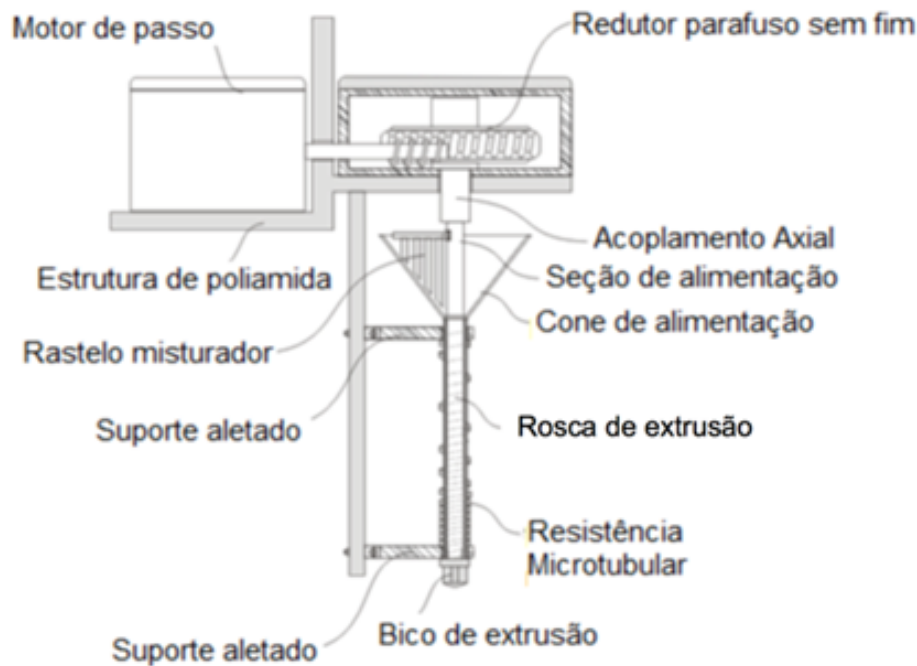
Freitas (2014) procedeu a análises para validação experimental do cabeçote de extrusão tendo como base a tecnologia FDM. Para tal intuito sucedeu-se a análises térmicas no conjunto barril-rosca de maneira a monitorar a temperatura e dissipação térmica (figura 9), aspectos importantes para o correto processamento de material, além da deposição do material em forma de filamento e geração de geometrias com aplicação de DOE. Além disso, dando continuidade ao trabalho de Inforçatti Neto (2013) os filamentos provenientes do processo de extrusão constituídos de material Nylon 12 e PCL foram avaliadas por meio de análises de degradação térmica, MEV e análises morfológicas.

Figura 7 – Dimensões da rosca de extrusão (mm).



Fonte: Adaptado de (NETTO, 2013)

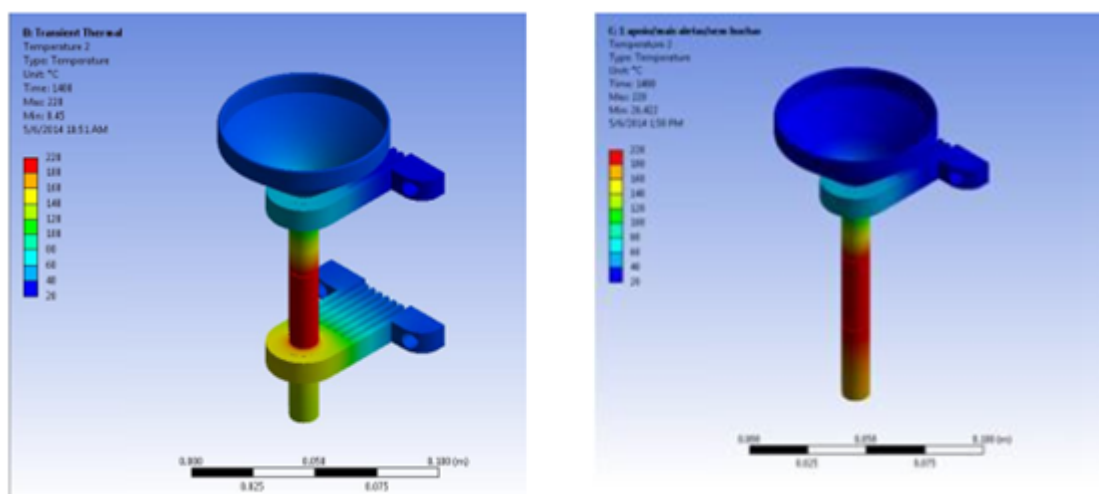
Figura 8 – Desenho esquemático dos elementos que compõem o cabeçote de extrusão desenvolvido.



Fonte: (FREITAS, 2014).

O processamento de termoplásticos requer conhecimentos bem definidos nas áreas de ciência dos materiais, tecnologias de processamento de polímeros e fundamentos de reologia. Segundo Barry et al. (1999) apud Becker et al. (2013), os materiais termoplásticos possuem comportamento sob fluência, pois apresentam variação em seu nível de viscosidade em função da taxa de cisalhamento. Muitas restrições ao fluxo do polímero amolecido podem ocorrer durante o preenchimento da cavidade gerando diferentes taxas de cisalhamento entre as moléculas poliméricas resultando em variações dinâmicas de viscosidade. Diferentes parâmetros podem influenciar na viscosidade e fluxo do material, sendo a temperatura e a pressão dois dos principais. Nesse contexto, é fundamental o monitoramento e controle de

Figura 9 – Simulação térmica do perfil de temperatura no conjunto barril-rosca.



Fonte: (FREITAS, 2014)

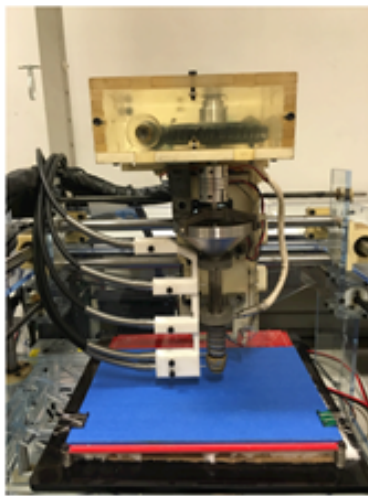
parâmetros do processo, como por exemplo, taxa de cisalhamento, pressão e variação da temperatura.

Chiaroni (2019) conduziu uma avaliação teórico-experimental do perfil de temperatura do cabeçote de extrusão. O procedimento consistiu em desenvolver a instrumentação para monitoramento "in loco" do perfil de temperatura no sistema de extrusão do cabeçote (Figura 10). Como complemento, foi realizada uma avaliação do perfil de temperatura por meio do uso de imagens termográficas concomitantemente a elaboração de um modelo computacional baseado em análise estrutural por elementos finitos no par barril-rosca e aproximação do polímero como uma das condições de contorno. Após a realização dos ensaios experimentais coeficientes de transferência de calor do modelo numérico foram ajustados fornecendo um modelo ajustado.

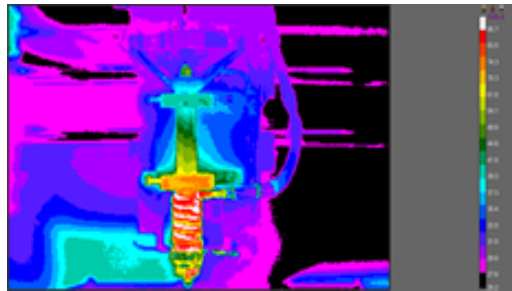
A análise empreendida por Chiaroni (2019) se mostra de suma importância em decorrência da necessidade de controle de temperatura no decurso do processamento de matéria-prima uma vez que diferentes materiais possuem propriedades térmicas distintas.

Atualmente, encontra-se em desenvolvimento uma nova versão do cabeçote concebido por Freitas (2014) no qual novas análises e testes relacionados a tempo de residência e temperatura de operação são desenvolvidos. A pesquisa conta com redimensionamento do sistema de transmissão e acionamento, assim como do sistema de aquecimento, parte dos quais são tratados no presente estudo. Dentre as alterações pode-se elencar a diminuição do sistema de redução de velocidades e do encapsulamento dos cartuchos de aquecimento como pode ser observado na figura 11.

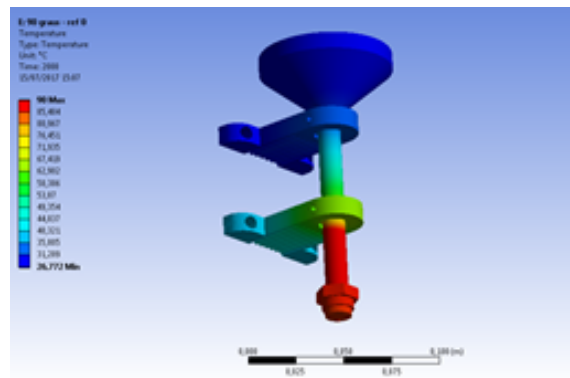
Figura 10 – Sistema de instrumentação térmica e simulação térmica do cabeçote de extrusão. (a)Cabeçote de extrusão com termopares acoplados para análise de temperatura, (b)Imagem termográfica do cabeçote em funcionamento, (c)Perfil de temperatura para aquecimento de 90°C.



(a)



(b)



(c)

Fonte: (CHIARONI; SILVEIRA, 2019).

Figura 11 – Sistema mecânico atual do cabeçote. (a) Caixa de redução do cabeçote; (b) Funil com encapsulamento do cabeçote de extrusão.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

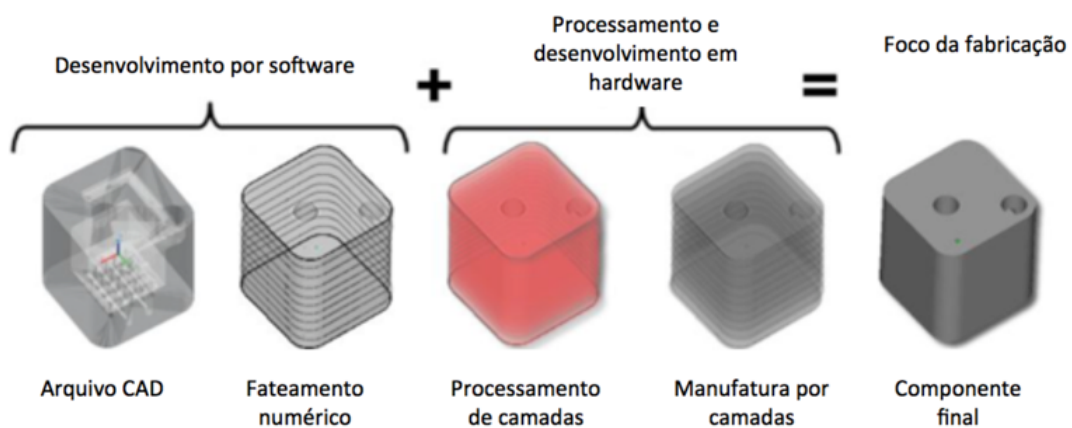
Nesta seção apresentam-se resumidamente os conteúdos e explicações das literaturas estudadas para a realização deste projeto.

3.1 Considerações sobre Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva, também conhecida por prototipagem rápida, é definida como a técnica de fabricação fundamentada na adição de material, que ocorre de forma controlada, possibilitando a fabricação de peças com alta complexidade geométrica (GIBSON, 2015).

Definida por cinco etapas básicas (VOLPATO, 2017), conforme mostrado na figura 12, o processo de fabricação por manufatura aditiva se dá inicialmente pela geração de um modelo tridimensional digital da peça desejada através de programas ou plataformas CAD.

Figura 12 – Etapas do Processo de Manufatura Aditiva.



Fonte: Adaptado de (SIDAMBE, 2014)

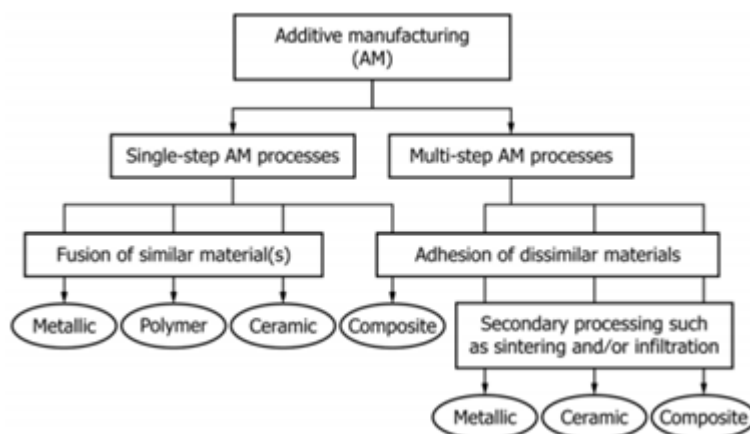
Posteriormente, esse modelo tridimensional é discretizado em camadas de acordo com especificações fornecidas pelo usuário, ou de acordo com as dimensões mínimas requeridas pelo maquinário. Após a discretização, ainda via software o modelo geométrico da peça é traduzido para o formato de código, que dita a sequência de movimentos que devem ser executados de forma que tenha se como resultado final a peça almejada. Uma vez gerado o código com instruções para a máquina, também conhecido como G-Code, a máquina deve executar a deposição de material, camada a camada, até a conclusão do processo de fabricação. Fatores como a qualidade do equipamento (precisão da plataforma de construção, geometria do bico, entre outras) e os parâmetros do processo,

como temperatura do bico, velocidade de translação e espessura da camada também têm influência direta nas propriedades finais do objeto. A geometria final do objeto é determinada pela trajetória das técnicas escolhidas (projeções ou deposição) ou ainda, uma combinação de ambas (THOMPSON et al., 2016).

Ao contrário das técnicas convencionais de fabricação, como a manufatura subtrativa (usinagem) e manufatura de transformação (estampagem, injeção, dentre outras), as técnicas de manufatura aditiva necessitam de menos ferramentas ou moldes específicas para produzir diferentes produtos, além possuir custo significativamente menor. Dado isto, a manufatura aditiva tem potencial para mudar o futuro da indústria, saindo da produção em massa para a customização em massa, que consiste na capacidade de gerar produtos com alto grau de personalização, sem aumentar os custos de produção. Além disso, devido ao fato de uma única máquina ser capaz de produzir peças dos mais variados tamanhos e formatos, a dinâmica do mercado atual poderá adaptar-se através da produção local de peças, excluindo a necessidade de produção externa, de fornecimento de peças em lotes de tamanho fixo, e de se manter estoques de peças (WHITE; POTENTE, 2012).

A norma ISO/ASTM 52900:2015 classifica a Manufatura Aditiva (MA) em processos aditivos de etapa única ou multi-etapas, considerando matéria-prima metálica e não metálica, conforme apresentado na Figura 13.

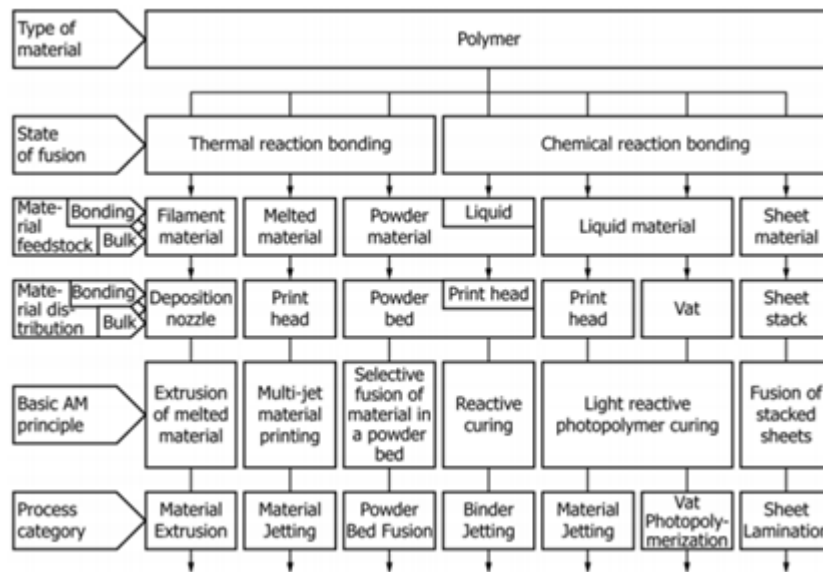
Figura 13 – Princípios de processos de Manufatura Aditiva considerando passo único ou vários passos.



Fonte: (STANDARD, 2015)

Dentre os materiais não metálicos, a norma classifica os processos pelo tipo de fonte de energia e forma de adesão exemplificados pela Figura 14. Cada técnica aditiva envolve um conjunto de conhecimentos transversais entre ciência e materiais de engenharia, projeto de sistemas mecânicos, parâmetros de processo de fabricação digital, interfaces e programação com software e hardware.

Figura 14 – Visão geral dos princípios de processamento para processos aditivos utilizando polímeros como matéria-prima.



Fonte: (STANDARD, 2015)

No próximo item (seção 3.2) são apresentados conceitos básicos da técnica aditiva por extrusão ou FFF (Filament Fused Fabrication), a qual é a técnica aditiva envolvida nesse trabalho.

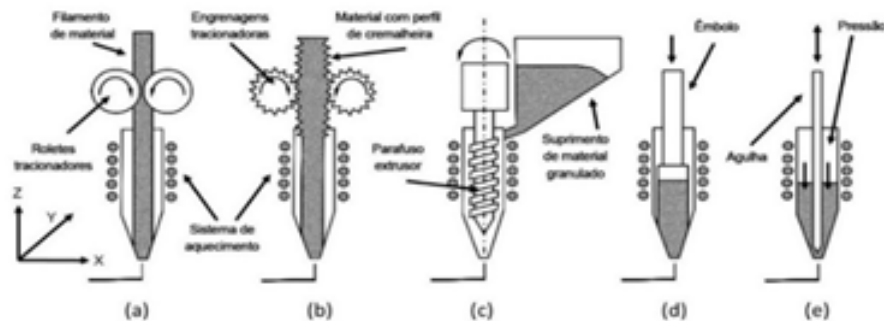
3.2 Conceitos sobre a técnica aditiva *Filament Fused Fabrication*

A tecnologia da Manufatura Aditiva, um dos pilares da indústria 4.0, extrapola o sistema de manufatura quando sobrepõem áreas de domínio interdisciplinar: projeto, processos de fabricação, materiais de engenharia e sistemas de controle. Dentro das atividades e do ciclo de desenvolvimento do produto pode oferecer um conjunto de benefícios como, por exemplo, maior facilidade de comunicação entre membros da equipe de engenharia e áreas correlatadas por meio da materialização de conceitos, protótipos físicos e técnicos. Sendo a peça estruturada, a partir da adição de camadas/voxels, o adequado planejamento do processo pode minimizar o desperdício de material e ferramental envolvido na geração dos protótipos e peças finais. (GAO et al., 2015) ressaltam que a manufatura aditiva possibilita projetos inovativos, livres de formas pré-definidas e peças com desempenho projetado fortalecendo os conceitos de projetos baseados em personalização e customização em massa.

O processo aditivo Fused Filament Fabrication (FFF) deposita o material, sob a forma filamentar, que é estruturado por meio de um bico, sobre um substrato com movimento cinemático que permita a construção da seção transversal no formato desejado. Com o aquecimento da mesa na temperatura adequada de acordo com as propriedades

reológicas da matéria-prima (filamento), o eixo Z é deslocado permitindo que o cabeçote inicie a deposição de material. Em equipamentos de manufatura aditiva, há um conjunto de parâmetros multifatoriais que resultam na qualidade final e repetitividade da peça final (por exemplo, largura e contorno de preenchimento), sendo que alguns desses parâmetros podem ser alterados diretamente ou indiretamente. O princípio de extrusão de materiais pode ser feito, a partir de diferentes mecanismos ilustrados pelas Figuras 15 (a) a (e), permitindo diferentes estados de matéria-prima.

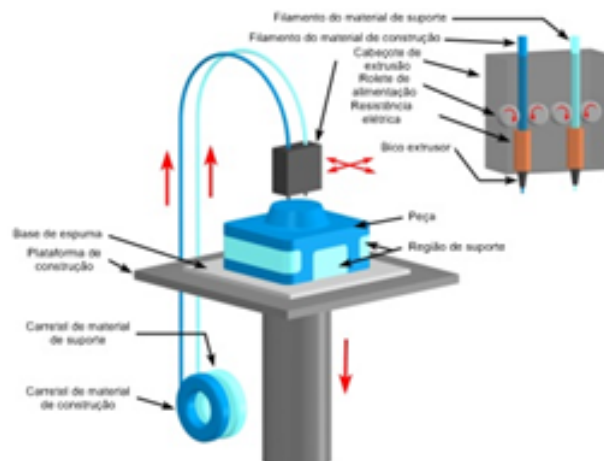
Figura 15 – Princípios de alimentação dos processos de MA por extrusão de material: (a)filamento contínuo; (b)varetas com perfil de cremalheira; (c)material em estado granulado; (d)êmbolo; (e)pressão com agulha controladora de vazão.



Fonte: Adaptado de (VOLPATO, 2017)

O mecanismo FFF, mais difundida para uso domiciliar, em laboratório de ensino e pesquisa, e equipamentos comerciais tem o mecanismo baseado num sistema de rolo trator, conforme ilustrado na Figura 16.

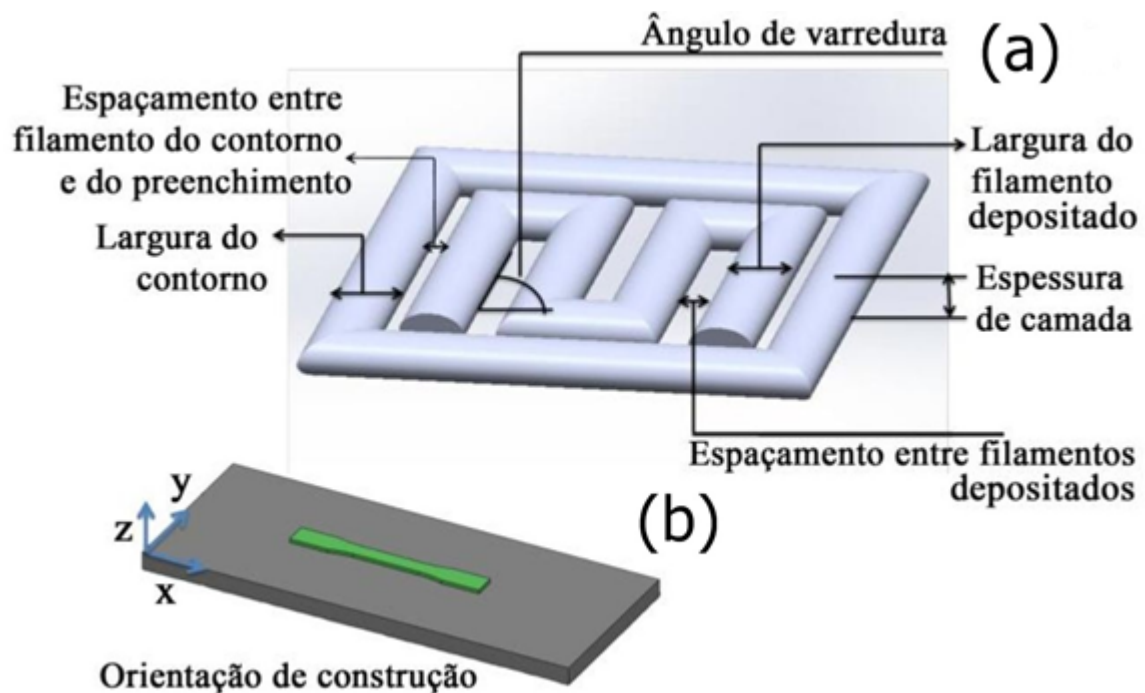
Figura 16 – Vista esquemática da técnica aditiva por matéria prima filamentar, com duas seringas de extrusão.



Fonte: Adpatado de (3DPARTS.CO.UK., 2020)

Uma das características de maior relevância nas peças produzidas por processos aditivos é qualidade final da peça, condição para processos FFF. Esta característica é uma combinação de diversos parâmetros de processo podendo, estes, ser classificados em parâmetros de operação, de equipamento e de materiais (AGARWALA et al., 1996; TURNER; STRONG; GOLD, 2014). A figura 17 ilustra como os parâmetros podem ser observados tanto micro como macroscopicamente.

Figura 17 – Representação dos parâmetros de processo: (a) Parâmetros de processo FFF; (b) Orientação da peça.



Fonte: Adaptado de (HOSSAIN et al., 2013)

A partir das ilustrações da Figura 17 serão descritos um conjunto de parâmetros operacionais que podem influenciar na qualidade final da peça gerada por técnica aditiva de extrusão:

- Orientação de construção (part build orientation): orientação da peça na plataforma de acordo com os eixos X, Y e Z respectivamente (ONWUBOLU; RAYEGANI, 2014; CROCCOLO; AGOSTINIS; OLM, 2013; SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2009; SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2010);
- Espessura de camada (Layer thickness): altura da camada depositada pelo bico extrusor medida na direção Z. (PENG; XIAO; YUE, 2014; ONWUBOLU; RAYEGANI, 2014; CROCCOLO; AGOSTINIS; OLM, 2013; SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2009; SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2010);

- Largura do contorno (contour width): largura do perímetro (ou contorno) delimitante da geometria interna da seção transversal;
- Número de contornos (number of contours): número de perímetros (internos e externos) construídos em torno da peça (DOMINGO-ESPIN et al., 2014; CROCCOLO; AGOSTINIS; OLMI, 2013);
- Largura do filamento (raster width ou road width): largura do filamento relacionada ao preenchimento da seção interna delimitada pelo contorno (FOGGIATTO et al., 2005; CROCCOLO; AGOSTINIS; OLMI, 2013; SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2009; SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2010);
- Ângulo de varredura (raster angle): direção na qual o preenchimento é depositado em relação ao eixo X da plataforma de deposição (ONWUBOLU; RAYEGANI, 2014; CROCCOLO; AGOSTINIS; OLMI, 2013; SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2009; SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2010);
- Espaçamento entre filamentos (raster to raster air gap ou air gap): distância entre dois filamentos adjacentes na mesma camada. Valores positivos deste parâmetro indicam que os filamentos se encontram distantes entre si, em contrapartida, valores negativos indicam sobreposição resultando em uma estrutura mais densa. Caso o valor seja nulo os filamentos apenas se tangenciam (AHN et al., 2002; ONWUBOLU; RAYEGANI, 2014; CROCCOLO; AGOSTINIS; OLMI, 2013; SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2009; SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2010);
- Espaçamento entre contorno e preenchimento (raster to contour air gap): indica a distância entre os filamentos do contorno externo e aqueles do preenchimento interno da peça (FOGGIATTO et al., 2005).

Outra condição relevante no processo diz respeito às temperaturas de extrusão e do envelope, destinadas a equipamentos com câmara fechada. Estas mantêm relação essencial com as propriedades reológicas e térmicas do material. A determinação da temperatura deve respeitar as seguintes premissas: (i) baixa viscosidade do material fundido de modo a facilitar a extrusão pelo bico; (ii) amolecimento da camada de material previamente depositada assegurando forte aderência entre camadas; (iii) maior viscosidade na deposição de maneira a proporcionar que o filamento depositado se suporte com propriedades adesivas suficientes (BELLINI, 2002).

Segundo Volpato et al., (2017) e Gibson et al., (2015), a técnica aditiva por extrusão utilizando filamentos apresenta como características vantajosas: simplicidade no princípio físico para deposição de camadas, atualmente há grande variedade de filamentos (termoplásticos) inclusive de uso industrial e, portanto, mais estáveis tanto mecânica quanto quimicamente; não requer pós-cura. A facilidade da construção mecânica impulsionou o

conceito de impressoras 3D denominadas “low-end”, estendendo a tecnologia de manufatura aditiva entre usuários não comerciais (WOHLERS et al., 2017).

As principais limitações dessa técnica, segundo Volpato et al. (2017) e Garg e Tai (2014) são: baixa precisão/resolução dimensionais vinculadas ao diâmetro do bico injetor; necessidade de estruturas de suporte para geração de geometrias com regiões em suspensão ou negativas com ângulo menor do que ângulo de suporte. A quantidade de material para essa condição pode elevar-se, e, havendo estrutura de suporte, há necessidade de pós-processamento para remoção manual de forma mecânica ou com uso de soluções químicas.

3.3 Processamento por Extrusão

O processo de extrusão consiste na conversão de matéria-prima em um produto com densidade e forma uniformes, realizado por meio da passagem forçada do material por uma matriz sob condições controladas (HALIM; FARRELL; KENNEDY, 2012; RAUWENDAAL, 2014).

Diversos mecanismos podem ser utilizados para gerar a pressão necessária para a extrusão, os quais podem ser divididos em bombas de deslocamento positivo e bombas de arraste. Nas bombas de deslocamento positivo, o fluido confinado em câmaras é carregado pela movimentação de um componente sólido da máquina, como é o caso das extrusoras por pistão e das bombas rotativas. Nas bombas de arraste, o fluido é confinado entre duas superfícies das quais uma se move, arrastando o material como no caso das extrusoras por rosca (WHITE; POTENTE, 2012).

3.3.1 Cabeçotes de Extrusão por Rosca

As extrusoras por rosca são consideradas as máquinas mais importantes no processamento de polímeros, sendo usadas para bombear, misturar, realizar reações químicas e devolatilizar sistemas poliméricos (WHITE; POTENTE, 2012).

Poucos são os equipamentos comerciais de manufatura aditiva com soluções construtivas baseadas no uso de roscas para processamento de termoplásticos. Parte dessa limitação pode ser atribuída à necessidade de entender os fenômenos associados ao processo como, por exemplo, o fluxo de material, mecanismos de plastificação e tempo de residência. Além deste, ainda há a dificuldade de projeto e fabricação de roscas nas dimensões adequadas ao volume de trabalho das impressoras 3D (VALKENAERS et al., 2013; VOLPATO et al., 2015; GIBSON, 2015; MANRICH, 2005; RAUWENDAAL, 2014).

Um dos primeiros cabeçotes de impressão 3D baseados em extrusão por rosca foi desenvolvido por Bellini, Shor e Gucerli (2005), utilizando rosca de diâmetro e passo constante para o transporte de grânulos de cerâmica misturados com ligantes poliméricos

até uma câmara de fusão.

Também utilizava rosca transportadora o cabeçote de microextrusão desenvolvido por Ragaert et al. (2013), entretanto, neste equipamento os grânulos de polímeros biodegradáveis eram previamente fundidos e bombeados até a rosca, que por sua vez direcionava o fluido até uma agulha de deposição.

A aplicação de conceitos de projeto de rosca para extrusão de termoplásticos no desenvolvimento de um cabeçote de impressão 3D foi originalmente relatada por Cheng et al. (2011), cujo objetivo era melhorar o controle do processo e a qualidade das peças produzidas com MA por extrusão. O projeto considerava uma vazão de $0,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ resultante da rotação de uma rosca de 12 mm de diâmetro e cerca de 86 mm de comprimento a uma velocidade de 400 rpm. Apesar de detalhar os cálculos de profundidade de canal, taxa de compressão e comprimento das zonas de processo, os autores não demonstraram a viabilidade do conceito por meio da construção de nenhum tipo de protótipo e a pesquisa parece ter sido interrompida.

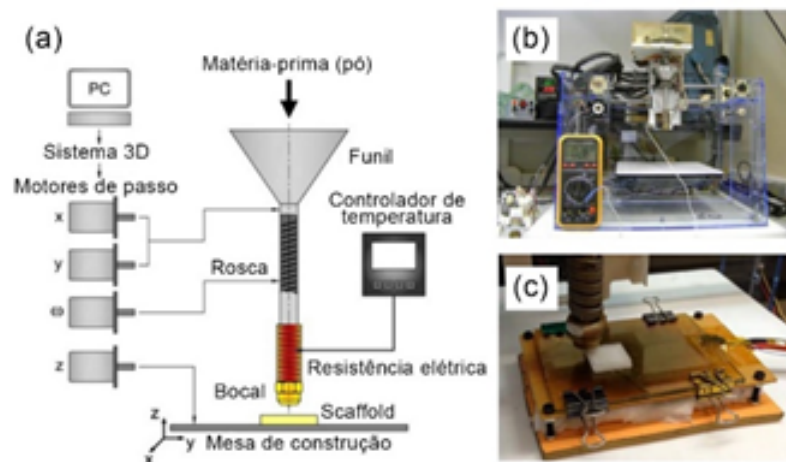
Por meio de uma abordagem sistemática, Silveira et al. (2014) projetaram um cabeçote de impressão 3D baseado no processo de extrusão rosca simples com o objetivo flexibilizar uma plataforma experimental de MA e permitir maior controle de processo. Dentre as ferramentas de projeto utilizadas, o QFD (Quality Function Deployment) auxiliou na identificação dos requisitos dos usuários e em seu desdobramento em atributos técnicos.

A rosca foi projetada com diâmetro máximo de 7 mm e comprimento de 110 mm, apresentando passo constante e profundidade do canal decrescente para compressão do material. O sistema opera com velocidades de rotação e de deposição baixas, de 10 a 15 rpm e até 15 mm/s, respectivamente, e em torque elevado (até 26 N.m) (SILVEIRA et al., 2014; DÁVILA et al., 2016).

O cabeçote, mostrado na Figura 18, permite alimentação de pequenas quantidades de material em pó com bocal de deposição intercambiável, podendo ser utilizado para o processamento de resinas virgens ou reaproveitadas de outros processos aditivos para a fabricação de filamentos e para a estruturação de geometrias tridimensionais (SILVEIRA et al., 2014; DÁVILA et al., 2016).

É importante salientar que o cabeçote desenvolvido por Silveira et al. (SILVEIRA et al., 2014) vem sendo utilizado por diferentes pesquisadores para o processamento de polímeros biocompatíveis misturados a partículas cerâmicas, para aplicação em engenharia tecidual (DÁVILA et al., 2016; CUNHA et al., 2019). Em razão da elevada demanda, o equipamento está sendo melhorado e replicado (CHIARONI; SILVEIRA, 2019; SANTOS, 2019).

Figura 18 – (a)Esquema do cabeçote monorosca; (b)Plataforma experimental Fab@CTI; (c)Processo de impressão 3D utilizando o cabeçote.



Fonte: Adaptado de (DÁVILA et al., 2016)

3.3.2 Tempo de Residência

Segundo Reitz, Podhaisky, Ely e Thommes (2013), o tempo de residência (RT) e sua distribuição (RTD) são os dois parâmetros de processo cruciais pois afetam grandemente a qualidade do produto. Estes caracterizam a probabilidade de duração de uma partícula participar do processo de extrusão. Altos tempos de residência podem causar degradação térmica mas se beneficiar caso cinemáticas de processo lentas estiverem envolvidas, por outro lado, baixos tempos podem ocasionar dispersão e distribuição da mistura inadequadas.

Van Zuilichem, Jager e Stolp (1988) em sua pesquisa identificou que a velocidade de rotação é uma das variáveis mais importantes que afetam o RT pois esta influencia diretamente a velocidade de transporte do material e, conseqüentemente, seu fluxo.

Além disso, o torque aplicado à rosca é de crucial importância para sobrepujar a resistência mecânica e tensão nas superfícies do barril e rosca causados pelo material em processamento (RAUWENDAAL, 2014).

3.4 Motor de Passo

O Motor de Passo é um motor elétrico que trabalha com corrente contínua (DC), permitindo controle preciso de posição e de velocidade. Ele conta com diversas bobinas agrupadas na forma de fases, de modo que sempre que uma fase é energizada o motor roda um passo, possibilitando fazer o giro completo de forma controlada.

Segundo Camargo (2007), os motores de passo antes de tudo, também utilizam o princípio do eletromagnetismo como força motriz. O eletromagnetismo é o nome da teoria unificada desenvolvida por James Maxwell, que relaciona a eletricidade com o magnetismo.

3.4.1 Princípio de Funcionamento

Sempre que há uma corrente elétrica, é gerada também uma variação de fluxo de campo magnético. Ou seja, quando há a movimentação ordenada de elétrons (corrente elétrica) é formado um campo magnético, como pode ser visto pela lei de Ampère-Maxwell com a equação 3.1:

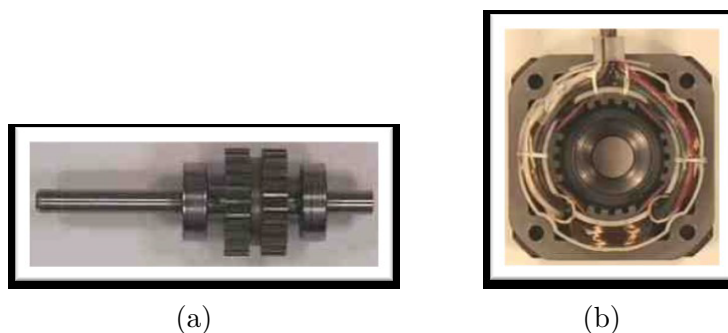
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i_{env} \quad (3.1)$$

Onde i_{env} é a corrente que induzirá o campo, B é o campo magnético e μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo.

Esta relação permitiu, entre outras aplicações, o desenvolvimento dos motores de passo. Diferentemente dos motores elétricos convencionais, os motores de passo oferecem uma precisão de posicionamento muito maior, além de possibilitar um controle de sua velocidade, acelerações e desacelerações. Isto é possível, pois o motor trabalha constantemente alinhando um campo eletromagnético apropriadamente criado, entre uma parte girante e uma fixa quando energizado; o que difere, basicamente, de um motor elétrico convencional, que, quando energizado, gira.

Os motores de passo são compostos por rotor (conjunto eixo-ímã que gira solidariamente à porção móvel do motor) e estator (corpo externo e fixo do motor, onde as bobinas são enroladas). Estes componentes podem ser observados na figura 19.

Figura 19 – (a)Rotor ; (b)Estator de um motor de passo.

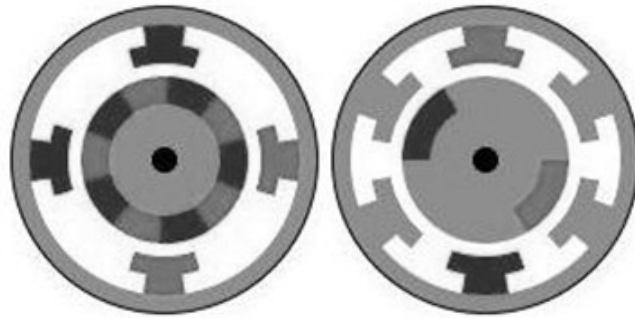


Fonte: (CAMARGO, 2007)

De um modo geral, este tipo de motor pode ter seu funcionamento explicado pelo alinhamento entre um ímã-permanente ou eletroímã e um campo gerado por pares de bobinas transpassadas por corrente elétrica.

As bobinas do estator estão posicionadas sempre em pares, podendo ser comumente encontradas em 2 ou 3 pares, como na figura 20:

Figura 20 – Esquemático de motor de passo em 2 e 3 pares de bobinas.



Fonte: (CAMARGO, 2007)

Para que o campo eletromagnético seja criado, as bobinas são acionadas separadamente ou em pares. Quando um par é acionado, uma corrente elétrica passa pelo fio que está enrolado ao redor do material ferro-magnético (bobinas + dente do estator) e assim o campo é gerado pela bobina e concentrado no dente do estator pelo material ferro-magnético.

Com isso, basta que o campo eletromagnético formado varie de posição para que o rotor se alinhe e dê movimento ao motor, passo a passo.

Esta troca de acionamento de bobinas é outra peculiaridade do motor de passo. O ligamento ou desligamento de um par de bobinas é feito através de um *driver* de potência que pode ter diversas configurações.

3.4.2 Modo de acionamento

O acionamento das bobinas pode também, ser feito de maneira individual (Unipolar) ou em pares (Bipolar), podendo ainda ser feito em passos inteiros ou em frações de passo.

A configuração unipolar significa que para cada bobina, só haverá um sentido de corrente, e portanto, de campo eletromagnético. Já para a bipolar, a corrente e o campo poderão assumir as duas direções, como exemplificado nas figuras 21 e 22 respectivamente.

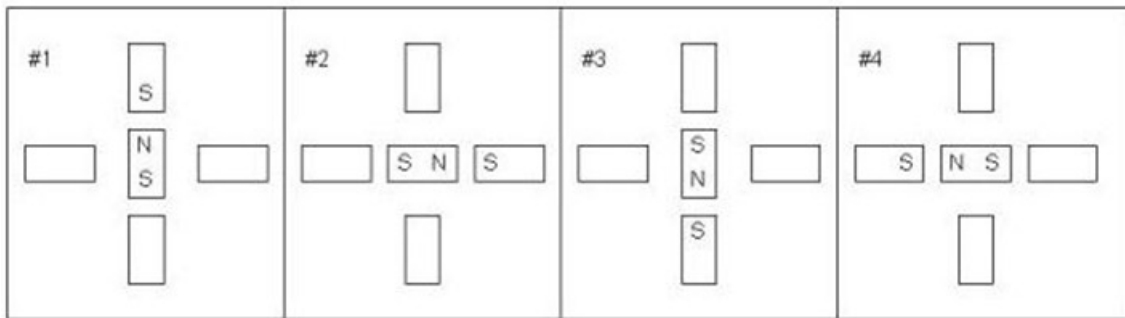
Para o acionamento de passo inteiro as bobinas deverão ser acionadas de maneira individual ou em pares. Já o acionamento com meio passo requer que sejam acionadas, de maneira intercalada, uma bobina e um par (figuras 23 e 24 respectivamente).

3.4.3 Tipos de motores de passo

Existem de maneira geral, três tipos de motores de passo no mercado.

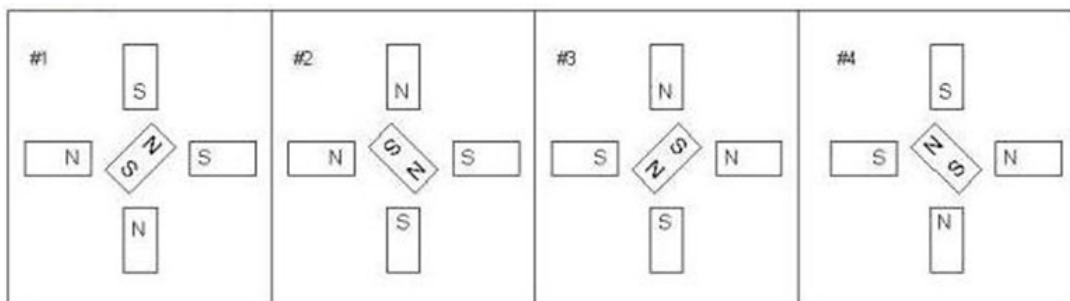
- **Motor de Relutância Variável:**

Figura 21 – Acionamento do motor de passo em modo unipolar.



Fonte: (CAMARGO, 2007)

Figura 22 – Acionamento do motor de passo em modo bipolar.



Fonte: (CAMARGO, 2007)

No motor de relutância variável (figura 25), o rotor inteiramente metálico é multi-dentado e ausente de ímã. A única fonte geradora de campo magnético provém das bobinas do estator, e portanto, o torque inicial do motor quando este está desligado é nulo.

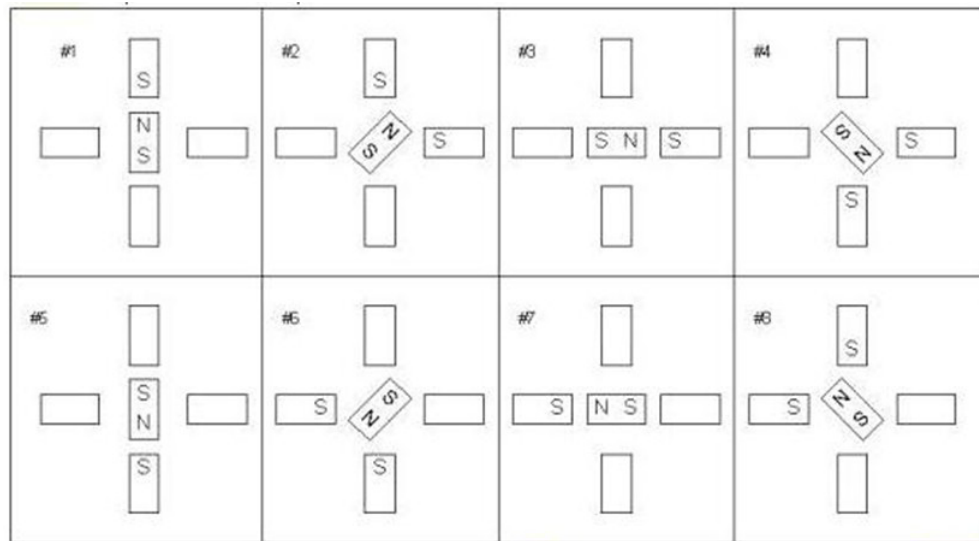
Normalmente para este tipo de motor, seu rotor tem a forma similar ao de uma engrenagem, cujo número de dentes varia de acordo com seu modelo ou especificação. Quando o estator gera o campo magnético em uma de suas bobinas, o rotor tenta se alinhar e se manter na posição de maior estabilidade. A posição de maior estabilidade é a posição que apresenta menor relutância entre o rotor e o estator recém magnetizado, ou seja, o rotor se alinha de maneira a formar o caminho de menor resistência para a passagem do campo magnético, sendo esta a menor distancia entre os dentes do estator e do rotor.

- **Motor de Ímã Permanente:**

O motor de passo de ímã permanente, possui um rotor sem dentes e imantado conforme mostra a figura 26. Com a presença de um ímã, o torque inicial do motor não é mais nulo.

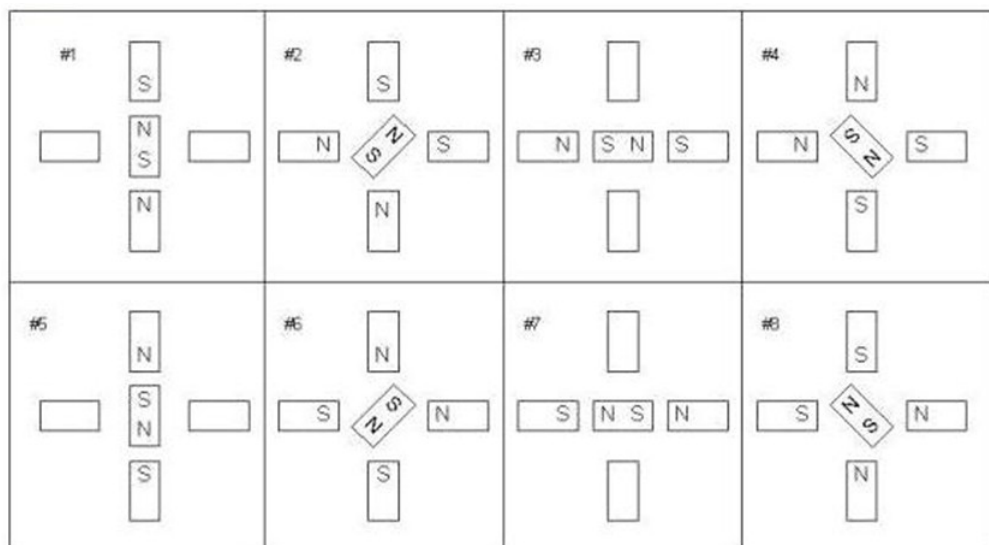
Com a interação entre os campos magnéticos do ímã e o campo gerado pela bobina,

Figura 23 – Acionamento Unipolar em meio passo.



Fonte: (CAMARGO, 2007)

Figura 24 – Acionamento Bipolar em meio passo.



Fonte: (CAMARGO, 2007)

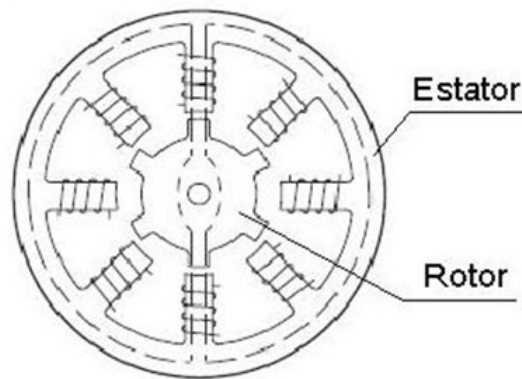
o torque eletromagnético gerado por esse motor consequentemente é maior que o motor de relutância variável.

- **Motor Híbrido:**

O motor híbrido por sua vez, possui características conjuntas dos dois modelos anteriores. Este modelo, representado pela figura 27, possui rotor dentado e magnetizado.

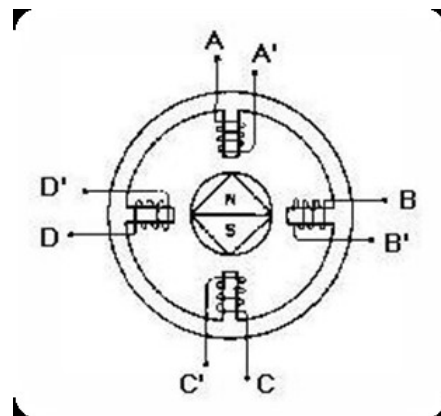
A mistura dessas características, permite também a mistura das vantagens dos outros dois modelos, ou seja, apresentam maior capacidade de torque, e uma melhor precisão

Figura 25 – Motor de relutância variável.



Fonte: (CAMARGO, 2007)

Figura 26 – Motor de Ímã Permanente.



Fonte: (CAMARGO, 2007)

de passo.

3.4.4 Perfil Torque vs. Velocidade

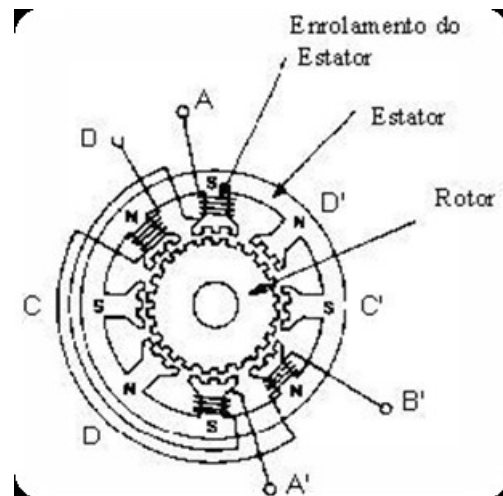
Motores de passo possuem características inerentes à sua arquitetura e acionamento. Pode-se dizer que sua identidade pode ser traçada pela curva de torque vs. velocidade.

Este tipo de curva fornece informações a respeito das cargas máxima que o motor suporta nas diferentes faixas de velocidades úteis. A partir desta curva pode-se determinar se o motor é adequado para o sistema, e estipular as rampas de aceleração, desaceleração mais adequadas para o sistema.

Dentre as informações mais importantes, há 4 tipos de torques que devem estar explícitos na curva de torque e/ou no *datasheet* do motor:

- **Holding Torque:** Pertence a uma das características únicas do motor, sendo definida pela capacidade de manter o eixo fixado numa posição controlada. O *Holding Torque*

Figura 27 – Motor de Passo Híbrido.



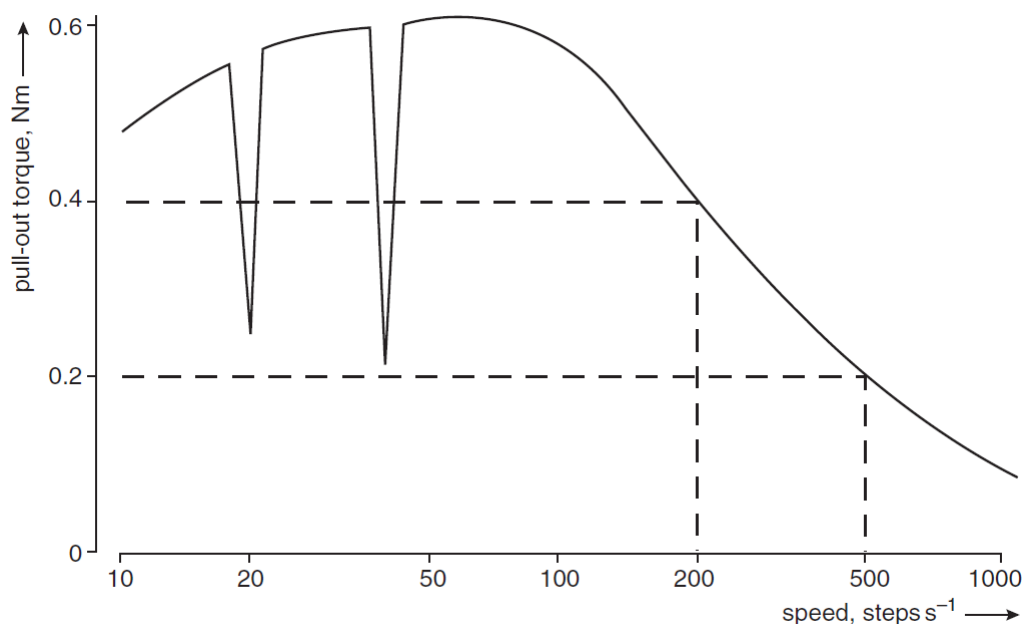
Fonte: (CAMARGO, 2007)

advém do acionamento direto das bobinas (sem chaveamento), causando a atração magnética entre o ímã do rotor e a bobina, fixando o eixo. Muitos fabricantes de motores, identificam essa característica como torque estático.

- **Detent Torque:** Caracterizado pela atração magnética natural do ímã do rotor e o restante do material ferromagnético do motor. Este torque natural, faz com que o eixo do motor tenha uma pequena resistência mecânica, mesmo quando o motor está desligado. Esta característica não existe no motor de relutância variável, por não apresentar ímãs internos.
- **Pull-In Torque:** É a curva que indica a faixa de valor de carga máxima, no qual o motor consegue partir diretamente sem perder nenhum passo. Em outras palavras, a curva indica a carga máxima no qual o motor não requer aceleração/desaceleração para operar. Quaisquer valores de carga abaixo desta curva definem a região de *start-stop* do motor, que nada mais é do que a região onde o motor pode ser acionado sem auxílio de uma rampa de aceleração.
- **Pull-Out Torque:** Também conhecido como torque dinâmico (do inglês *Dynamic Torque*), a curva de *Pull-Out Torque* indica os valores de carga máxima em que o motor suporta girar sem perda de passo ou travamento do eixo.

Segundo Acarnley (2007), as características de torque dos motores de passo podem ser separadas em diferentes regiões devido à forma como a corrente e a tensão são estabelecidas nas bobinas e no aço do estator, e também devido ao tempo de magnetização e saturação magnética destes. Ainda assim, os motores de passo apresentam uma curva de *Pull-Out Torque* característica (figura 28), cuja obtenção é objetivo parcial deste trabalho.

Figura 28 – Curva de *Pull-Out Torque* característica dos motores de passo.



Fonte: (ACARNLEY, 2007)

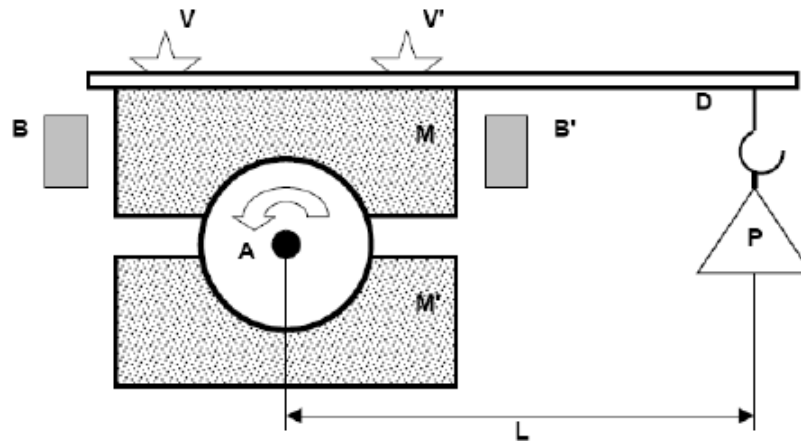
3.5 Freio de Prony

Gaspard Riche de Prony nasceu em 1755 e faleceu em 1839. Frequentou o curso de Engenharia da École de Ponts e Chaussées. Durante a sua vida estudou e desenvolveu vários métodos ligados à Mecânica das Estruturas. Publicou um livro sobre A Nova Arquitetura Hidráulica. Atingiu grande fama - sendo considerado a personificação da arte do engenheiro – tendo aconselhado Napoleão Bonaparte em várias e grandes Obras de Construção. Inventou o freio em 1821 como um instrumento capaz de “medir o efeito dinâmico das máquinas de rotação” (BRUNETTI, 2013).

O Freio de Prony é constituído de duas peças de madeira M e M', apertados por parafusos V e V' e fixados ao eixo A da máquina, no qual será feita a medida da força, conforme ilustrado na figura 29. Para a medição do torque, acopla-se as peças M e M' sobre o eixo, de maneira que estas duas peças encostem no eixo, mas não apliquem nenhuma força sobre este. Assim, ao adicionar P ao sistema, a força peso de P faz com que o conjunto M+D+P torne-se uma alavanca que aplica uma força de frenagem sobre o eixo A. O peso P controlado é suspenso na barra D a uma distância conhecida L do centro do eixo do motor.

Para um dinamômetro que possui força de frenagem constante, pode-se calcular de forma mais simples e rápida a potência que o motor está fornecendo. Cria-se uma constante que, quando multiplicada pela carga resultante na balança e pela rotação de trabalho, resultará no valor da potência do motor (BRUNETTI, 2013).

Figura 29 – Freio de prony com marcações.



Fonte: (NAVARRO DIEGO; SALATA, 2015)

O torque mecânico no eixo do motor será dado pela equação 3.2.

$$\tau = F_{atr}r \quad (3.2)$$

onde τ é o torque aplicado em sua extremidade, r é o raio do tambor e F_{atr} é a força de atrito. Da mesma maneira, a haste D aplica uma força de frenagem no tambor do motor, resultando na força de atrito que contrapõe o torque do motor, representada pela equação 3.3.

$$F_{atr} = PL \quad (3.3)$$

Pode-se então dizer que a força aplicada pelos pesos P são proporcionais ao torque do motor, descritas pela equação 3.4.

$$\tau = PL \quad (3.4)$$

E a potência eletro-mecânica do motor será dada pela equação 3.5.

$$W = \omega\tau \quad (3.5)$$

Dessa maneira torna-se possível relacionar a força controlada pelo peso P aplicada na extremidade da haste, com a força total fornecida pelo motor.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos os métodos e materiais empregados para o desenvolvimento da proposta de trabalho. A metodologia foi estudada e realizada de maneira a possibilitar a comparação entre outros tipos de sistema, além de facilitar sua reprodução futura.

4.1 Implementação de um sistema de controle de tensão x velocidade

Partindo dos protótipos experimentais desenvolvidos por Freitas (2014) e por Santos (2019), um sistema de acionamento para que a rosca do cabeçote seja movimentada se faz necessário, o qual deve ser capaz de manter a velocidade da rosca constante quando em processamento, evitando assim, que hajam variações no fluxo de saída de material. Ainda, o motor a ser tratado futuramente neste capítulo, deve ser capaz de suprir a necessidade de torque e atuar em relativamente ampla faixa operacional (RAUWENDAAL, 2014).

Além disso, para os polímeros a serem extrudados neste sistema durante seu transporte pela rosca, devem ser aquecidos à temperaturas próximas de suas temperaturas de fusão, de maneira gradual até atingirem a zona de compressão onde já devem estar fundidos e livres de bolhas de ar para ejetados pelo bico do sistema extrusor (??). Com isto, é também abordado neste capítulo a utilização de ferramentas e instrumentos de controle e sensoramento de temperatura, e comunicação com o usuário.

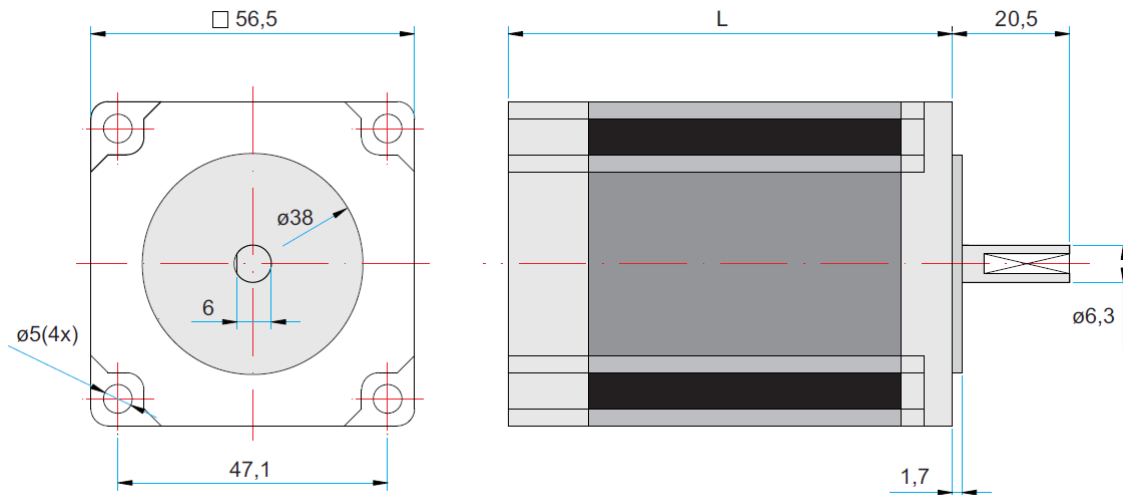
4.2 Seleção do motor

Conforme o protótipo de Santos (2019), para o mini cabeçote de extrusão, o motor deve ser capaz de fornecer 20 N.m diretamente em seu eixo e que seja pequeno o suficiente para não sobrecarregar o sistema mecanicamente (Não existe comercialmente nenhum motor capaz de fornecer toda essa força, sendo pequeno e leve o bastante para o sistema mecânico). Dessa forma, buscou-se opções comerciais que, se unidos ao sistema de redução descrito (SANTOS, 2019) atenderiam a todas as exigências do projeto.

Foi selecionado, então, o motor de passo *KTC-HT23-401*, produzido pela Kalatec (), que, conforme especificação do fabricante, fornece ao menos 1.86 N.m de torque estático (figura 31a), pesa cerca de 1 kg e possui tamanho adequado para caber dentro da impressora (figuras 31b e 30).

Para a seleção de motor para as aplicações visadas, foram levantados dados de outros fabricantes almejando identificar a capacidade de torque nas faixas operacionais almejadas. Observou-se que a curva de torque do motor NEMA23 Neomotion (figura 32)

Figura 30 – Desenho com dimensões do motor kalatec.



Fonte: Adaptado de ([KALATEC](#),)

apresentou perfil muito diferente do KTC-HT23-401, necessitando, então, que os dados fornecidos fossem analisados.

Para então corroborar que os dados fornecidos correspondem aos reais do motor, foram realizados pequenos testes de performance no motor. O motor de passo foi configurado para operar em modo bipolar-paralelo, como exposto no *datasheet* do fabricante.

Para averiguar a veracidade dos dados e para melhorar em relação a sua aplicação foram realizados teste de Back-EMF e teste de torque:

4.2.1 Counterelectromotive Force [Back-EMF]

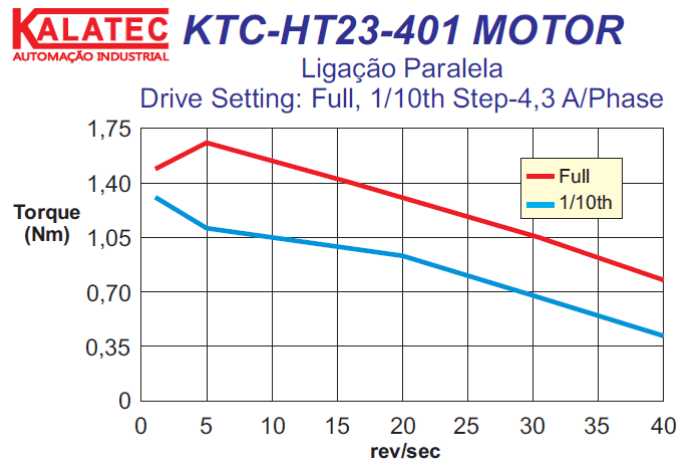
O mais simples dos testes, refere-se a uma característica do motor de passo no qual o fabricante não fornece nenhuma informação a respeito: O *Counterelectromotive Force*, também chamado de Back-EMF, é uma tensão gerada num circuito indutivo resultante de uma corrente alternada ou pulsante. A polaridade desta tensão é a todo instante oposta à tensão aplicada no circuito ([GRAF, 1999](#)).

O teste proposto, consiste na aplicação de rotação por uma fonte externa no eixo do motor testado, e medir a tensão gerada pelo motor em seus terminais. Com isso é possível determinar a constante de Back-EMF, com valor descrito em V/rpm .

Quando o motor é acionado, essa constante descreve a indução magnética gerada contra o campo magnético da bobina do estator, causada pelos imãs do rotor durante o movimento inercial e imediatamente após o desligamento da bobina do estator.

Esse fenômeno faz com que seja gerada uma pequena perda de tensão nos terminais das bobinas quando o estator tenta induzir o giro do motor de forma contínua. De maneira

Figura 31 – Informações contidas no *Datasheet* do fabricante.



(a) Gráfico fornecido pelo fabricante

MODELO	LIGAÇÃO DO MOTOR 1=SÉRIE 2=PARALELO 3=UNIOLAR	COMPRIMENTO "L" (mm)	MINIMO TORQUE ESTÁTICO (N.m)	FIOS	STEP (ÂNGULO)	VOLTS	AMPS	OHMS	mH	ROTOR INÉRCIA (g.cm ²)	MOTOR PESO (Kg)
KTC-HT23-394	1	40,6	0,54	8	1,8	4,0	1,41	2,8	5,6	120	0,45
	2					2,0	2,38	0,7	1,4		
	3					2,8	2,00	1,4	1,4		
KTC-HT23-397	1	59	1,25	8	1,8	5,1	1,41	3,6	10,0	300	0,69
	2					2,5	2,38	0,9	2,5		
	3		0,88			3,6	2,00	1,8	2,5		
KTC-HT23-400	1	76	1,86	8	1,8	6,4	1,41	4,5	14,4	480	1,00
	2					3,2	2,38	1,1	3,6		
	3		1,32			4,5	2,00	2,3	3,6		
KTC-HT23-401	1	76	1,86	8	1,8	4,2	2,12	2,0	6,4	480	1,00
	2					2,1	4,24	0,5	1,6		
	3		1,32			3,0	3,00	1,0	1,6		

(b) Dados fornecidos pelo fabricante

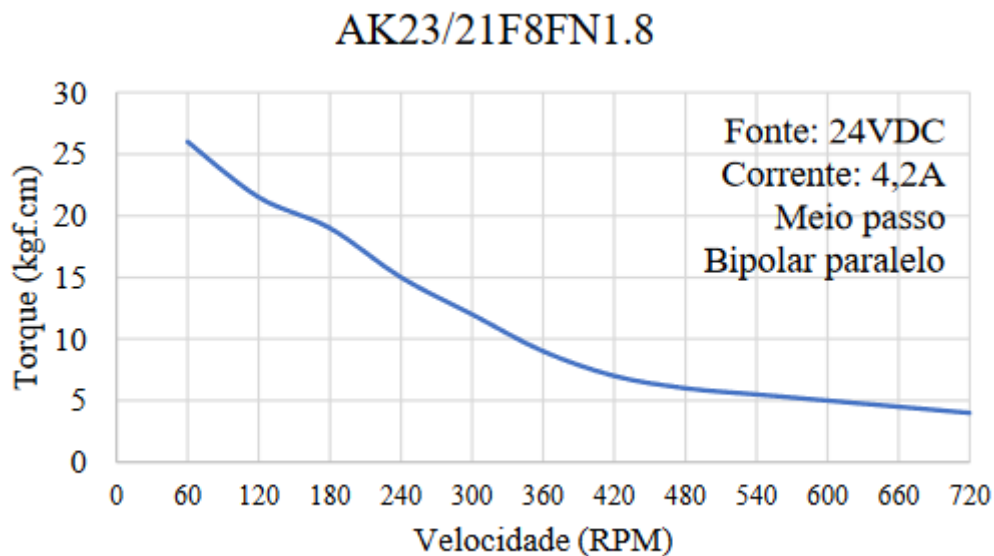
Fonte: Adaptado de (KALATEC,)

geral, entende-se que a constante de Back-EMF significa um valor de perda de tensão no motor que precisa ser compensando de acordo com a velocidade desses motores, até o ponto em que não há tensão total suficiente para gerar movimento e o motor perca velocidade, ou perca seu sincronismo.

Para o presente estudo, foi utilizado um motor NEMA17, modelo US17HS4401, como fonte de rotação externa em relação ao KTC-HT23-401. Os motores tiveram seus eixos conectados por uma bucha e alojamento para alinhamento e redução de vibração, respectivamente (figura 33).

As peças de alinhamento foram confeccionadas em impressão 3D utilizando-se filamento de ABS (Acrilonitrila butadieno estireno) azul, e seguindo as dimensões dos motores conforme o *Datasheet*.

Figura 32 – Curva de torque do modelo AK23/21F8FN1.8, fabricado pela Neomotion.



Fonte: Adaptado de (GRUPO..., 2012)

4.2.2 Perfil de Torque & Freio de Prony

O levantamento da curva de torque é aplicada para avaliação das características eletromecânicas. Ou seja, é utilizado para verificar se o motor é adequado à aplicação almejada e a qualidade das informações presentes na documentação.

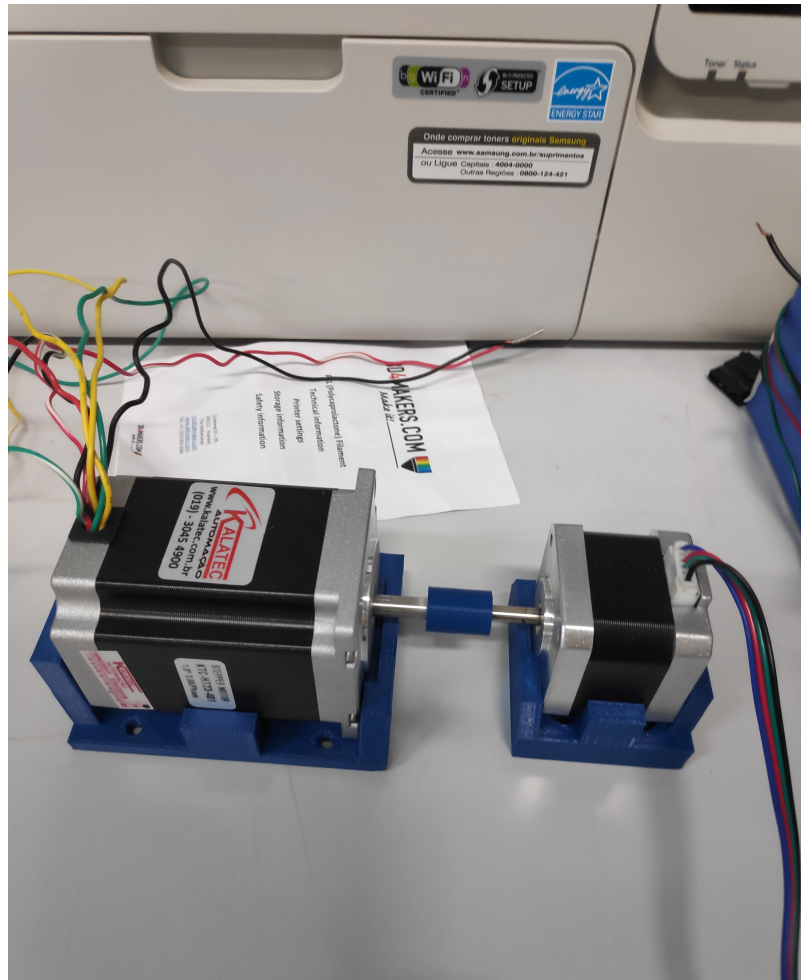
Visando manter um baixo custo e simultaneamente confiabilidade para o teste, optou-se pelo emprego do freio de Prony, um dos primeiros dinamômetros criados na história, com uma lógica de funcionamento simples e de fácil construção. O sistema confeccionado pode ser observado na figura 34.

O sistema é composto por quatro peças principais: Duas hastes (M e M') que compõem o freio de pronny (vide figura 29), o tambor acoplado ao eixo do motor e a uma base para suporte e fixação de todos os componentes para este experimento.

Brunetti (2013) explica o funcionamento do freio de pronny para motores de combustão interna. Entretanto, devido ao modo de funcionamento peculiar do motor de passo, a execução do teste para se obter a curva de torque procederá de maneira que apenas o valor de pullout torque será obtido, sendo este valor o mais importante para o estudo.

Desta forma, o motor é acionado à uma velocidade constante no sentido de rotação contrário ao da força aplicada pela haste do freio, como é amostrado na figura 29. O peso P é adicionado lentamente até que o motor perca sincronia de rotação e o tambor pare de girar. O valor do peso P é então anotado e o processo é repetido para uma nova velocidade de rotação.

Figura 33 – Motores com eixos conectados por bucha de ABS para teste de Back-EMF.



Fonte: Autoria própria.

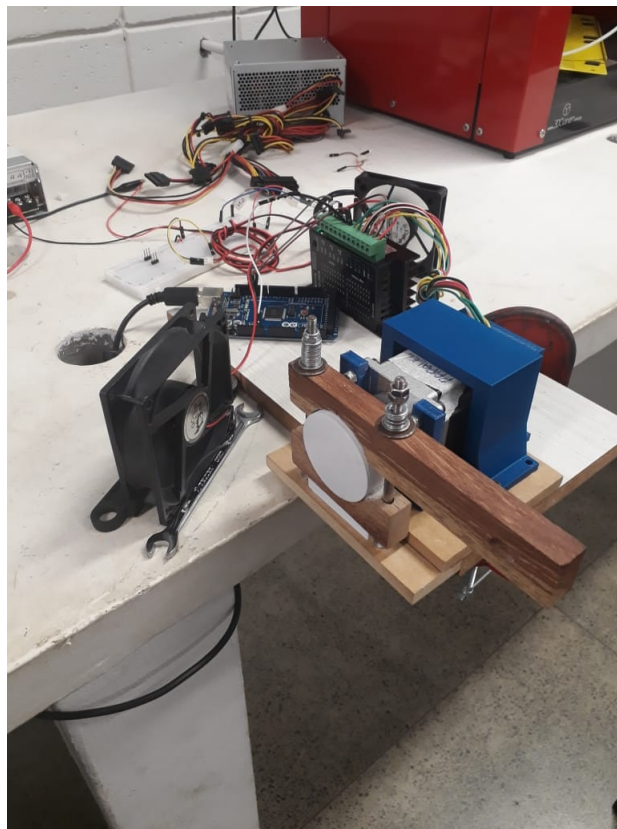
O teste foi realizado para a faixa de velocidades compreendida entre 100-300rpm ao incremento de 50rpm por teste, considerando o valor de rotação crítica da rosca do cabeçote conforme analisado por Santos (2019), e uma última leitura à 650rpm considerando a velocidade crítica da rosca do cabeçote analisado por Justino Netto (2018).

4.3 Drivers Wotion WD2404 e Pololu DRV8825

Assim como o motor foi escolhido para melhor adequar-se ao cabeçote, o *Driver 4A WD-2404* fabricado pela *Wotion* (figura 36), foi escolhido para realizar o acionamento e controle do motor NEMA23, como orientação do fabricante.

Semelhantemente, para controle dos motores de passo que realizam a movimentação dos eixos da impressora, o tutorial da RepRap (2004) sugere que sejam utilizados os drivers DRV8825 fabricados pela *Pololu* (figura 37).

Figura 34 – *Setup* de bancada para levantamento da curva de torque do motor.



Fonte: Autoria própria.

4.4 Microcontrolador Mega 2560

Adicionalmente, para o sistema de acionamento e monitoramento foi optado pela utilização de um microcontrolador Mega 2560, amplamente aplicado no segmento de manufatura aditiva, além de apresentar funções para utilização semelhante à como é utilizado na FAB@Home ([FAB@HOME...](#), 2006), para melhor comparação e possível adaptação.

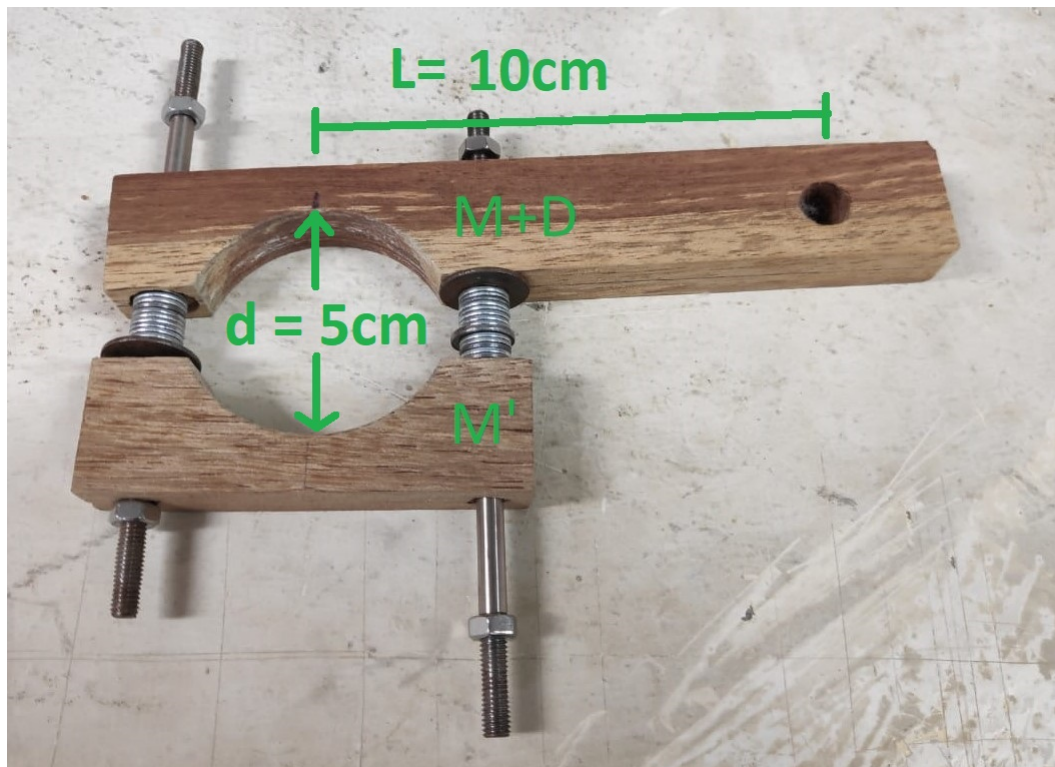
A placa microcontroladora Mega 2560, é uma placa de prototipagem eletrônica, baseada em, e compatível com a plataforma Arduino [2005](#), sendo idêntico em estrutura de hardware (visto que a Arduino possui hardware livre), linguagem de programação e condições de operação.

4.5 Encoder Incremental Digital 9SS28

Para certificar de que o motor selecionado e seus controladores estão operando conforme esperado, foi utilizado o encoder incremental digital 9SS28.

Mostrado pela figura [38](#), este encoder utiliza-se de um emissor e um receptor infravermelho embutidos orientados um frente ao outro, indicando duas possibilidades de

Figura 35 – Peças do freio de prony confeccionado, com dimensões para cálculo de força resultante.

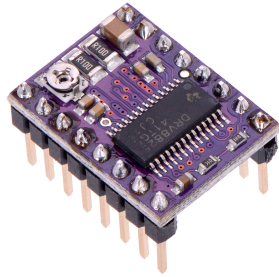


Fonte: Autoria própria.

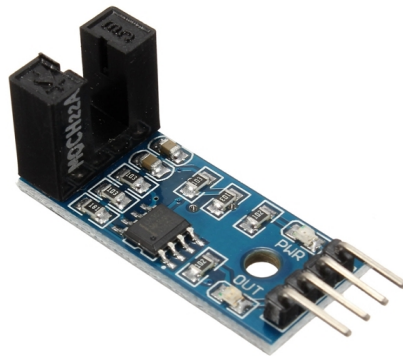
Figura 36 – *Driver* modelo WD2404 da Wotiom.



Fonte: (WOTIOM, 2020)

Figura 37 – *Driver* Pololu DRV8825.

Fonte: ([ELECTRONICS](#), 2020)

Figura 38 – Sensor de Velocidade *Encoder* 9SS28.

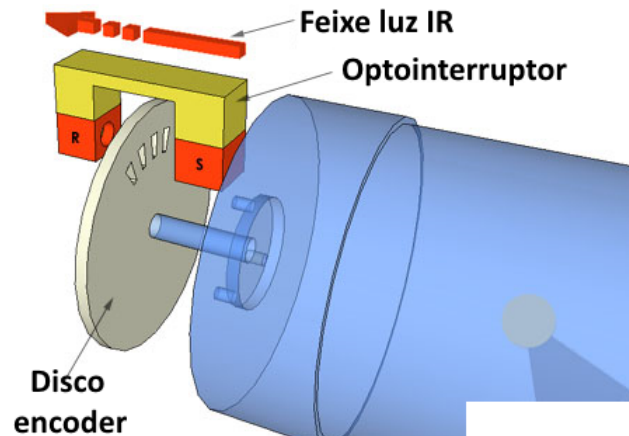
Fonte: ([FILIPEFLOP](#), 2020)

leitura do sensor. Uma das possibilidades é a configuração natural do sensor, no qual o receptor indica presença do laser infravermelho (indicado pelo nível lógico 1 em sua saída), e sua segunda possibilidade é quando coloca-se qualquer objeto opaco para obstruir o laser do emissor, causando a perda de sinal pelo receptor (indicando nível lógico 0 em sua saída).

Conhecendo-se a lógica de funcionamento do encoder, e utilizando-se de uma roda furada como a da figura 39, é possível determinar a velocidade de rotação diretamente do eixo do motor, para averiguar se a velocidade real do motor é condizente com o *input* de velocidade determinado pelo microcontrolador.

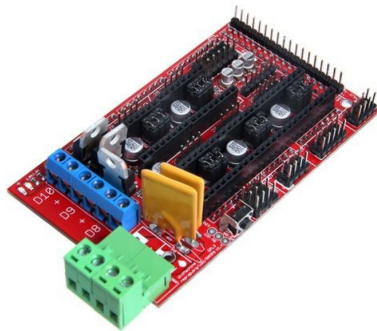
O funcionamento deste método, vide figura 39, baseia-se no alinhamento dos furos da roda com o laser infravermelho do emissor. Conforme o eixo é rotacionado, os furos da roda alinham-se com sensor, permitindo passagem do laser, que indicará nível lógico 1. Sendo assim, quando o furo da roda estiver desalinhado, a parede do furo bloqueará a passagem do laser, indicando o nível lógico 0.

Figura 39 – Lógica de funcionamento do encoder incremental.



Fonte: (CIA., 2020)

Figura 40 – (a)RAMPS 1.4; (b)Logo da Marlin Firmware



(a)



(b)

Fonte: (a) Adaptado de Santos 2019

Conhecido o número de furos na roda, sabe-se consequentemente, o número de pulsações (mudança de nível lógico de 0 para 1) por volta do eixo. Utilizando-se um osciloscópio então, a velocidade do eixo é calculada através do tempo levado para o encoder registrar n pulsações (correspondente ao número de furos da roda).

4.6 RAMPS 1.4 & Marlin

A "RepRap Arduino Mega Pololu Shield"(figura 40a) é uma placa auxiliar para Arduino Mega (??) desenvolvida com o objetivo de ser um módulo de interface entre motores, *displays*, *drivers*, *coolers* e entre outras partes necessárias para uma impressora 3D. O microcontrolador conectado a esta placa portanto, será o conjunto responsável pelo funcionamento principal e geral da impressora 3D.

O *software* utilizado, que interpreta, recebe e envia informações do computador

para a placa da impressora é fornecido pelo *Marlin Firmware* (figura 40b). O Marlin é um *firmware Open-Source* desenvolvido para trabalhar em conjunto com as placas de prototipagem da RepRap, geralmente empregado em máquinas de extrusão.

Este conjunto Arduino + RAMPS + Marlin é o mais indicado para utilização em sistemas de manufatura aditiva, por já possuir as conexões eletrônicas necessárias para todos os componentes do sistema e já possuir uma roina computacional preparada.

Para este projeto, as devidas modificações foram feitas no código para que este possa operar também com o cabeçote de extrusão proposto por Santos (2019) da forma mais eficiente possível.

4.6.1 Repetier-Host

O Repetier-Host é um software gratuito para impressoras 3D, desenvolvido em 2011 pela Hot-World GmbH & Co. KG, na Alemanha (REPETIER-HOST, 2011).

Este software foi desenvolvido para ser compatível com diversos modelos de impressoras 3D, e será utilizado como ferramenta de comunicação e interface entre a impressora e o computador para o estudo proposto.

O Repetier possui um *Slicer* integrado, suportado pela Slic3r (2011), uma ferramenta código-aberto que realiza a conversão do desenho CAD para o código G-CODE.

4.6.2 Controle e Sensoriamento de Temperatura

Dentre as diversas funções embutidas na RAMPS 1.4 e no Marlin, uma delas é o controle de temperatura do cartucho de aquecimento para o cabeçote e da mesa de deposição. Função fundamental para operação de qualquer impressora 3D.

A RAMPS juntamente com o Marlin já possuem o controle de temperatura desenvolvido e pronto para uso, através de um controlador PID, bastando apenas calibração fina através da configuração de coeficiente de aquecimento do sensor e do cartucho de aquecimento.

Os sensores de temperatura utilizados são os termistores "NTC3950 100K", com coeficiente de temperatura negativo e com tolerância de até 3% nas maiores faixas de temperatura, região onde ocorrem as maiores variações de resistividade do sensor. São necessários ao menos 2 destes sensores, onde farão as leituras de temperatura do bico extrusor proposto por Santos (2019), e da mesa aquecida. O sensor pode ser observado na figura 41a.

Os aquecedores utilizados são cartuchos cerâmicos de 40W e 12V fabricados para bicos de extrusão de impressoras 3D, e uma placa com circuito resistivo de 144W e 12V para a mesa de aquecimento da impressora. O cartucho de aquecimento e a placa da mesa de aquecimento podem ser observados nas figuras 41b e 41c respectivamente.

Figura 41 – (a)Termistor NTC3950 100K; (b)Cartucho de Aquecimento 40W; (c)Placa de Aquecimento Heater Bed RepRap



(a)



(b)

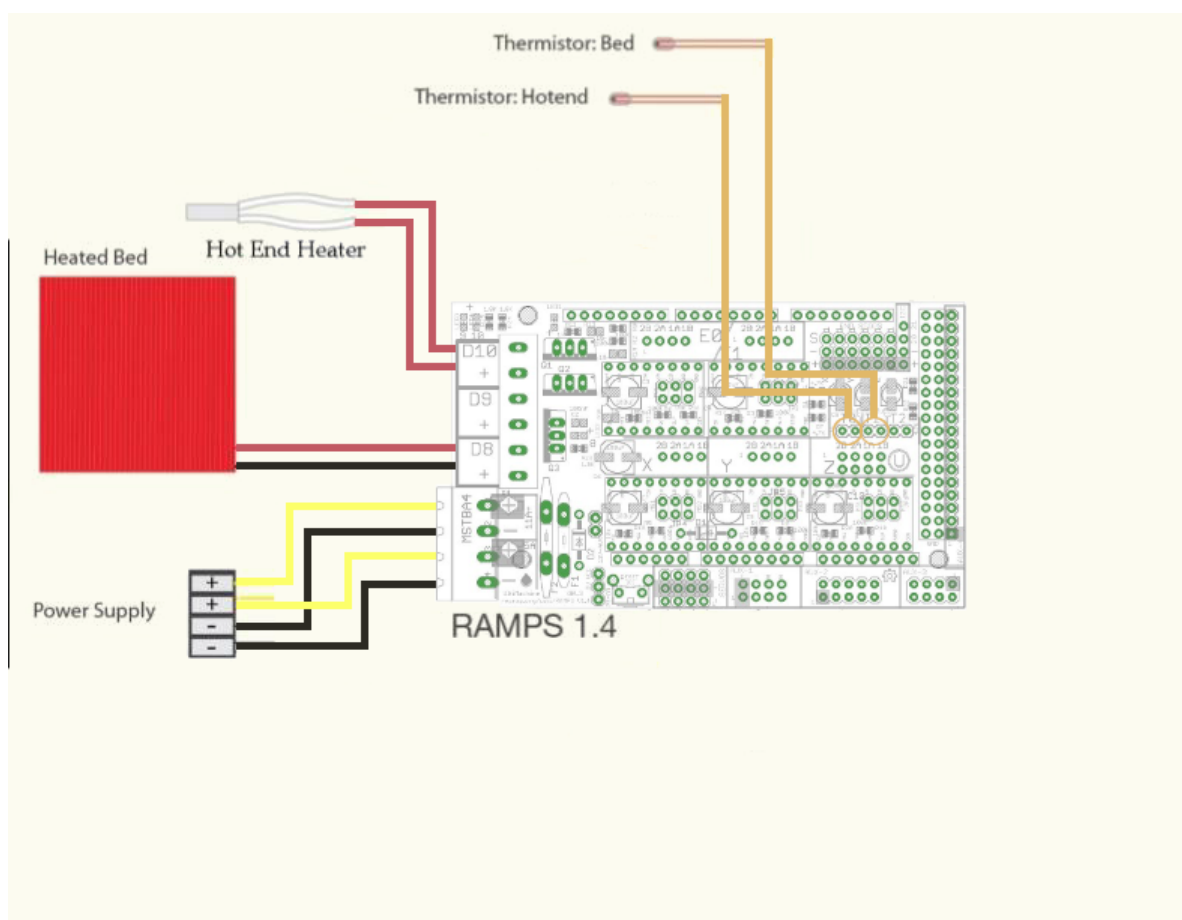


(c)

Fonte: (a)Adaptado de ([SANTOS, 2019](#))
(b)Adaptado de ([SANTOS, 2019](#))
(c)Adaptado de ([REPRAP, 2020a](#))

O esquema de ligação dos componentes na RAMPS 1.4. podem ser encontrados na figura 42, conforme tutorial de conexões para a RAMPS ([REPRAP, 2020b](#)).

Figura 42 – Esquema de ligações da RAMPS para os componentes do sistema de aquecimento.



Fonte: Adaptado de ([REPRAP, 2020b](#))

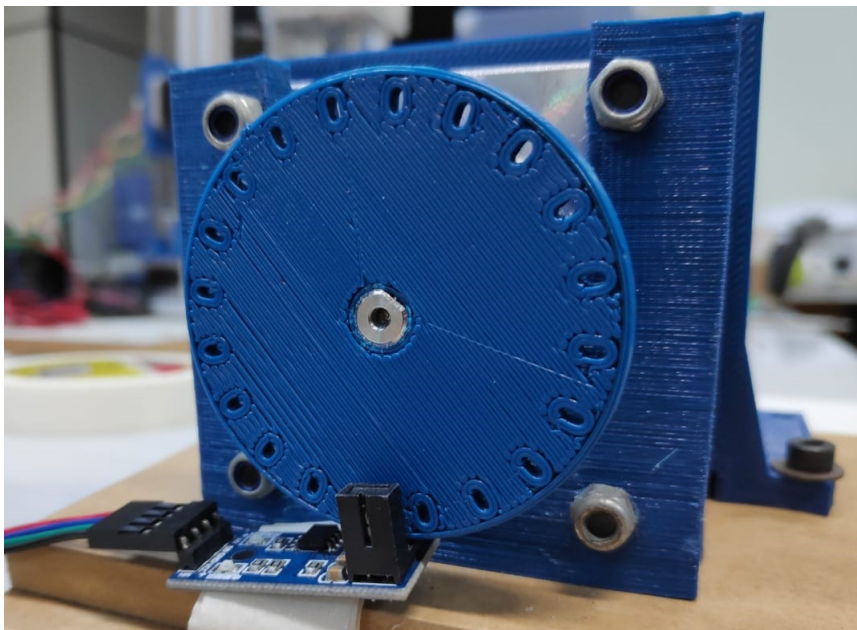
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são descritos os resultados e análises feitas a partir dos métodos aplicados experimentalmente durante a execução deste projeto, e dos estudos realizados previamente para fundamentar os experimentos.

5.1 Acionamento do motor

Antes de qualquer um dos experimentos pudessem ser realizado com certo grau de confiabilidade, primeiramente foi necessário garantir o funcionamento adequado do motor. Visto isso, foram feitas diversas leituras comparando os comandos realizados pelo arduino em contraste com a velocidade real no eixo do motor. A figura 43 mostra a configuração experimental montada para esta verificação.

Figura 43 – *Setup* de bancada para verificação de acionamento do motor.

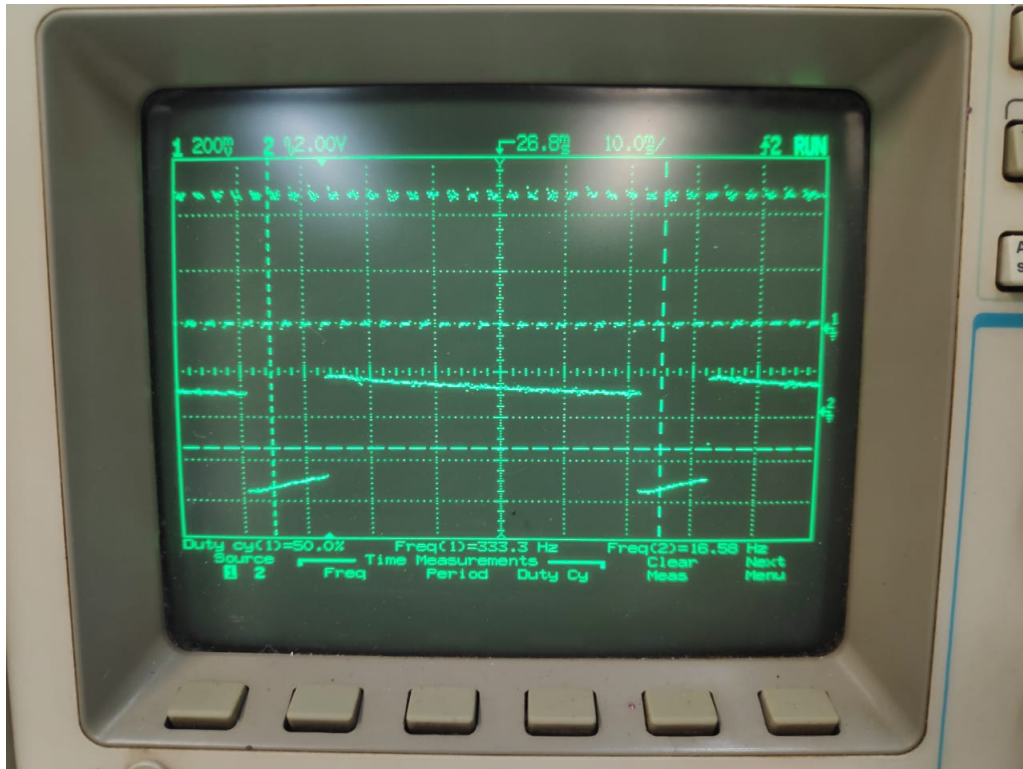


Fonte: Autoria própria.

As pontas de prova do osciloscópio foram conectadas no circuito de forma a captar o sinal de comando do microcontrolador para o driver, e a captar o sinal de saída do encoder, conforme figura 44.

A partir dos resultados amostrados na figura 44, para calcular a velocidade do motor através do sinal de *input* gerado pelo controlador (canto superior) considera-se cada borda de subida (*Rising Edge*) como comando de passo para o motor, e o período entre bordas de subida como o tempo entre cada passo do motor. Dessa forma, tem-se

Figura 44 – Osciloscópio aquisitando sinais de pwm(superior) e do encoder(inferior).



Fonte: Autoria própria.

diretamente o valor em passos por segundo (pps) como o equivalente da frequência do sinal obtido no osciloscópio.

Como os motores de passo são capazes de operar em diferentes configurações de micropasso (1/2, 1/4 e etc.), a quantidade de passos por segundo resultará em diferentes velocidades angulares do motor. Consequentemente, para se obter a velocidade do motor em rotações por segundo (rps), o valor de pps é dividido pela quantidade de passos por volta p configurados no driver. Posteriormente, para obter este valor em rpm, basta multiplicar o valor em rps por 60.

Para melhor descrever esta lógica, podemos utilizar a equação 5.1 para calcular a velocidade de entrada gerada pelo pwm do controlador.

$$\omega = \frac{f_{in}}{p} * 60 \quad (5.1)$$

Onde ω é velocidade calculada em rpm, f_{in} é a frequência do sinal obtido em Hz, e p é configuração de passos por volta do motor.

Uma vez conhecida a velocidade de entrada do driver, calcula-se a velocidade de saída do eixo do motor, obtida em forma de sinal digital através do encoder. Para calcular a velocidade de saída do encoder, começa-se com o número n de furos presentes na roda

furada. Como já explicitado na seção 4.5, o número de furos definirá uma quantidade fixa e equivalente de pulsos gerados pelo encoder por volta do eixo. Dessa forma, a cada n pulsos lidos, tem-se uma rotação completa. Conhecendo então o tempo decorrido para ler as n pulsações do encoder, obtém-se o valor de rotação do eixo em rps. Analogamente à lógica do sinal de entrada, basta multiplicar esse valor por 60, para tê-lo em rpm. A lógica para o sinal de saída do encoder, pode ser descrita em linguagem matemática através da equação 5.2.

$$\omega = \frac{f_{out}}{n} * 60 \quad (5.2)$$

Onde ω é a velocidade de saída calculada sob o eixo, f_{out} é a frequência do sinal digital captado pelo encoder e n é o número de furos da roda.

A partir das equações 5.1 e 5.2 e do resultado obtido na figura 44, é possível verificar a frequência de 333,33 Hz para o sinal de entrada, com o motor configurado à meio passo (400 passos por volta), resultando na velocidade de entrada de 50rpm; e frequência de 16,56 Hz para o sinal de saída do encoder, para uma roda com 20 furos (vide figura 43), resultando em velocidade de saída de 50rpm.

Conclui-se, então, que, de fato, as velocidades obtidas experimentalmente são iguais e que o motor está rotacionando de acordo com a velocidade para a qual ele foi configurado. O código utilizado para realização deste e dos demais testes que envolvem a utilização do motor de passo estudado encontra-se no anexo A

5.2 KTC-HT23-401 Kalatec Nema 23

Uma vez adequadamente calibrado o funcionamento do motor de passo, prosseguiu-se para o levantamento de dados e análise dos resultados.

5.2.1 Back-EMF

A figura 46 ilustra o setup montado em bancada para realização do teste de Back-EMF.

O motor NEMA23 foi configurado no modo bipolar paralelo para manter conformidade com os demais testes e com tensão medida entre os terminais da bobina A, conforme especificado no datasheet do fabricante.

Para o motor NEMA 17 apenas a geração de rotação a uma velocidade controlada é pertinente neste experimento. Desta maneira, apenas foi especificado que este operou em passo completo, para controle de velocidade aplicado no motor testado.

Os dados obtidos para o teste de BEMF são apresentados na tabela 1:

Figura 45 – *Setup* de bancada pra teste back EMF.

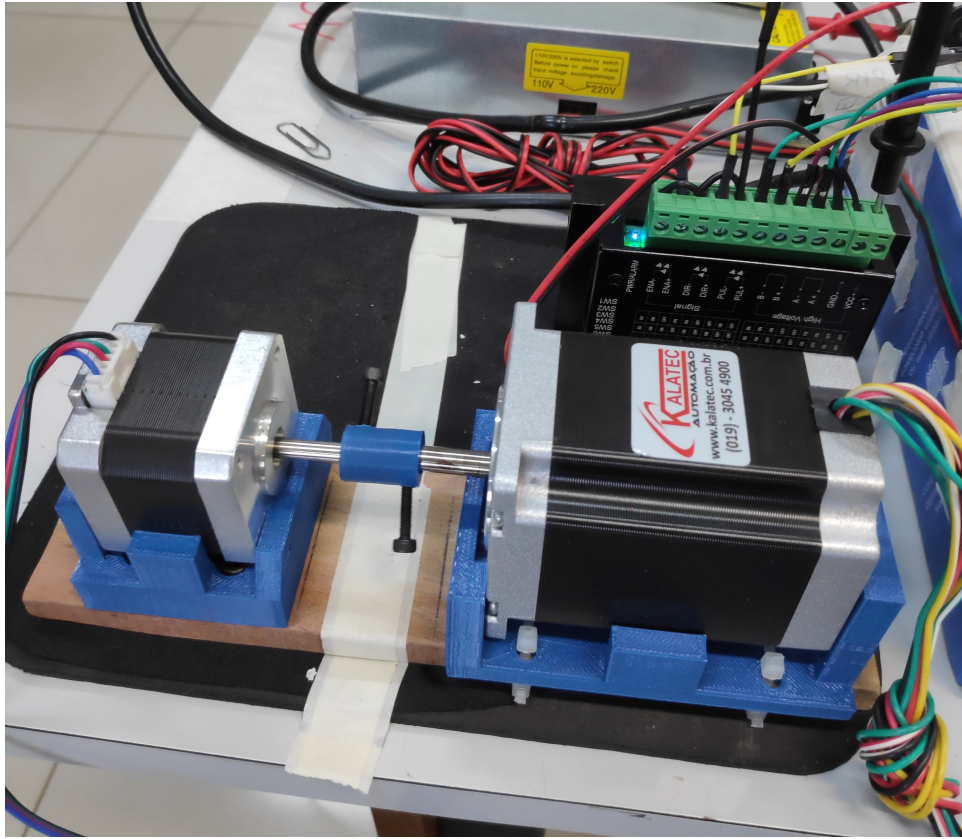


Figura 46 – **Fonte:** Autoria própria.

A partir desses dados é possível traçar uma curva de tensão gerada pela velocidade, e, com isso, calcular a constante elétrica deste motor, descrita pela inclinação da reta da figura 47 ($K_v = 0.028904 \text{ V/rpm}$).

Este resultado auxilia no entendimento de que o motor deste estudo, com 24V de tensão máxima na entrada de seu *driver* será capaz de girar até no máximo aproximadamente 830rpm sem nenhuma forma de controle adicional.

Caso seja exigida maior velocidade para processar o material polimérico, sabe-se que o *Driver* escolhido para este projeto aproveita da inércia natural do rotor para manter sua rotação e que este faz uma pequena injeção de corrente nas bobinas do motor de maneira a contrapor o *Back-EMF* gerado nas bobinas que não estão sendo utilizadas para gerar torque útil.

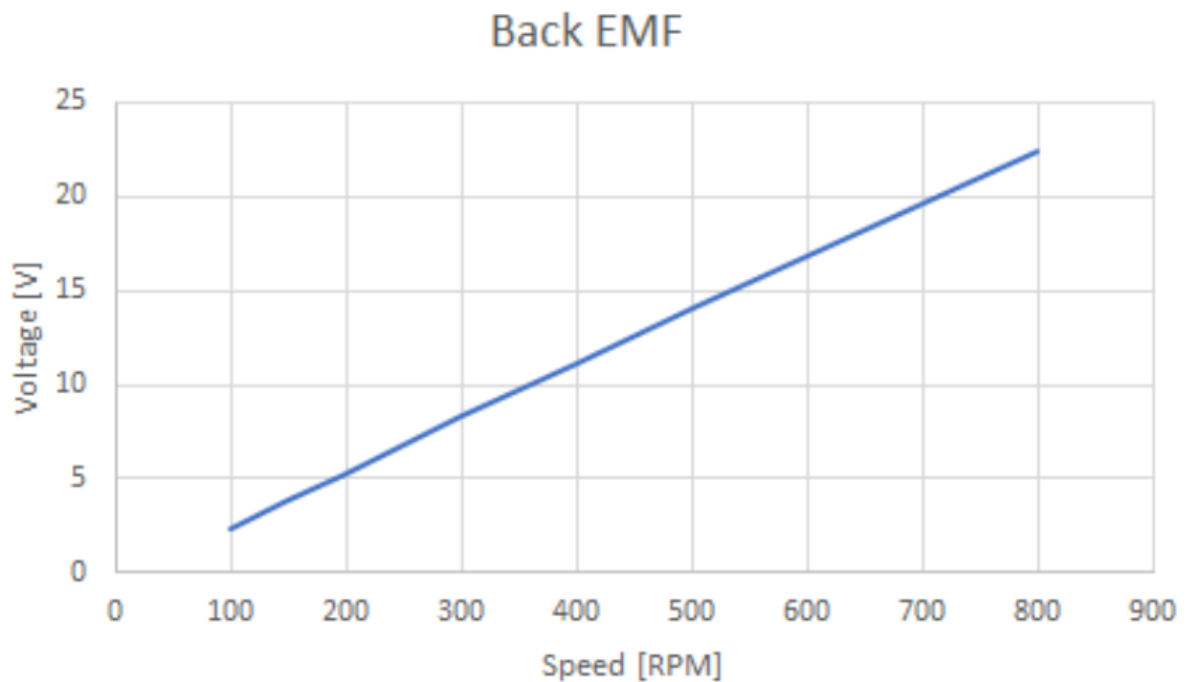
Vale ressaltar que esta técnica de controle permite ao *Driver* e ao motor atingir maiores velocidades, ao custo de um torque máximo menor. Isso se deve ao fato de que, ao injetar corrente nas outras bobinas do estator do motor para compensar o *Back-EMF*, o *Driver* estaria ao mesmo tempo aplicando pequenos torques contrários ao movimento do motor e, conseqüentemente resultando em torque total menor do motor. Como estudado por Freitas (2014), para este motor não será necessário tal técnica visto que as faixas

Tabela 1 – Resultados do teste de Back-EMF.

Motor Speed [RPM]	Generated Voltage [V_{rms}]
100	2,4
150	3,9
200	5,3
250	6,8
300	8,3
350	9,7
400	11,1
500	14
600	16,8
700	19,6
800	22,4

Fonte: Autoria própria

Figura 47 – Curva de Back EMF plotada.



Fonte: Autoria própria

de velocidades necessárias para processar a maioria dos materiais estudados por Santos (SANTOS, 2019) enquadrar-se na gama de velocidade que o *Driver* é capaz de acionar sem despendar de seu torque total máximo.

Adicionalmente, ressalta-se que a tensão de 24V foi utilizada não somente para permitir melhor comparação com os motores fabricados pela *NeoMotiom*, mas pelo fato de que uma menor tensão de alimentação no *Driver* faria com que a velocidade máxima de

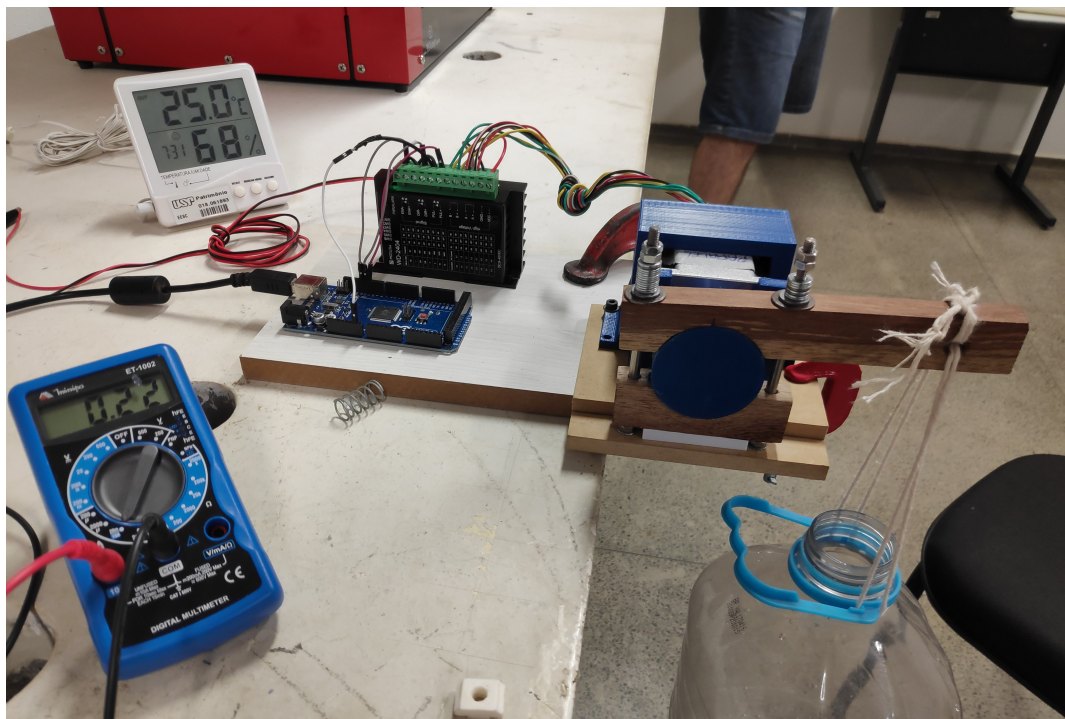
rotação diminuísse para aproximadamente 415rpm fazendo com que a corrente necessária para o motor fornecer o mesmo torque em seu eixo aumentasse consideravelmente, possibilitando alcance de correntes superiores aos valores máximos permitidos pelo driver e travamento do eixo.

5.2.2 Freio de Prony e Curva de Torque Experimental

Para possibilidade de cálculo do torque de frenagem total aplicado sobre o motor, é necessário conhecer as dimensões do freio de prony. Para isso, sabe-se que, conforme mostrado na figura 35, a medida L do centro do eixo até o ponto de aplicação de força peso é igual a 100 mm. A peça superior (M) deste freio foi confeccionado de maneira a alinhar o ponto de aplicação de carga com o ponto de contato da peça com o tambor do motor, dessa maneira, resta considerar apenas o raio do tambor como braço de alavanca para a força de frenagem aplicada sobre o motor.

Para uma aplicação contínua de carga e pela sua densidade unitária, foi decidido utilizar água como peso para aplicar sobre o braço do freio. Para isso então, foi acoplado ao braço do freio uma garrafa plástica de peso fixo (32 g), onde seria depositada água, de maneira a gerar força peso sobre o braço e aplicar força de frenagem sobre o motor, conforme mostrado na figura 48.

Figura 48 – *Setup* do freio para levantamento da curva de torque com carga aplicada sobre o braço.



Fonte: Autoria própria.

Durante execução do teste, as velocidades foram calibradas e a carga foi aplicada

lenta e gradativamente até perda de sincronia nos passos do motor. Uma vez atingido isto, o peso da água total na garrafa foi medido (o peso da garrafa foi excluído desta medida), e a força peso total aplicada foi calculada. Conhecendo-se o valor da distância L do ponto de aplicação da carga até o ponto de contato do freio, e o valor do raio r (25 mm) do tambor, é possível calcular o torque fornecido pelo motor como mostrado nas equações 3.2 e 3.3. As medidas realizadas durante o teste, e o torque calculado encontram-se na tabela 2.

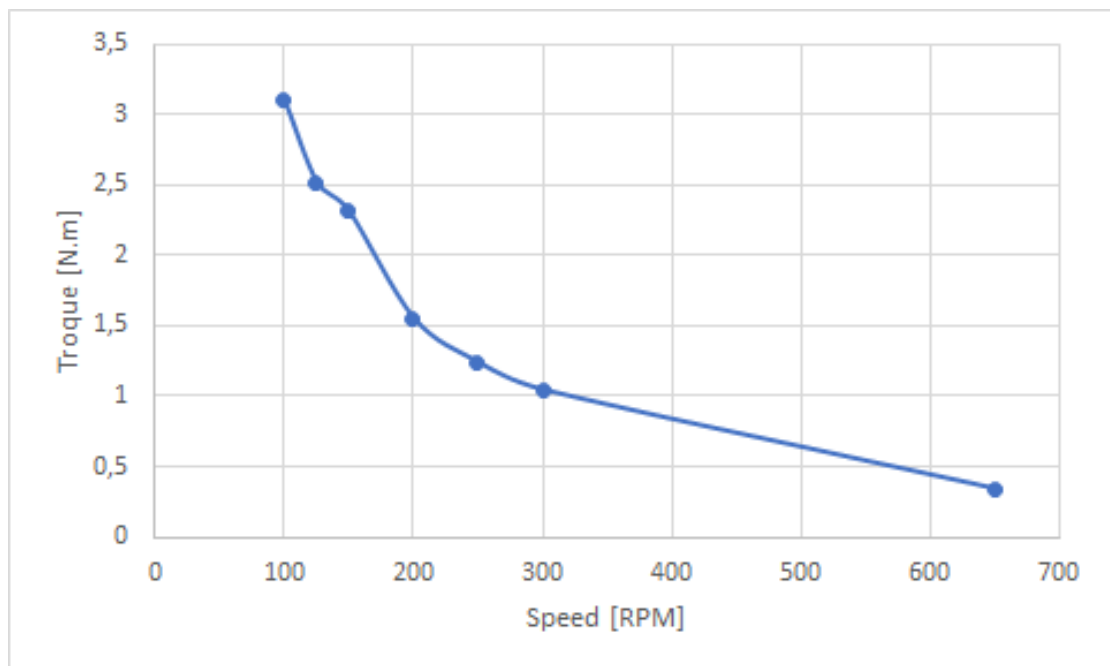
Tabela 2 – Valores obtidos no teste de torque.

Velocidade [RPM]	Peso [g]	Torque [N.m]
650	386,4	0,34
300	1183,1	1,04
250	1404,2	1,24
200	1757,2	1,55
150	2616,1	2,31
125	2852	2,52
100	3515,2	3,10

Fonte: Autoria Própria.

A partir dos valores de torque obtidos experimentalmente, plotou-se a curva de torque em função da rotação da figura 49.

Figura 49 – Gráfico com curva de torque em função da velocidade de rotação.

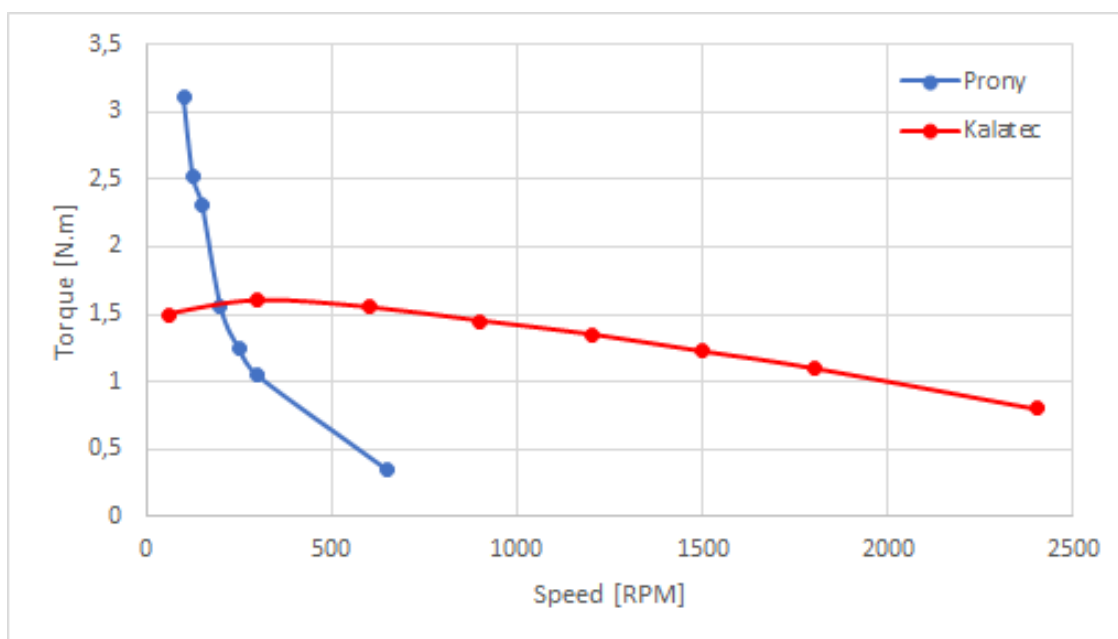


Fonte: Autoria própria.

A princípio observa-se a similaridade da curva obtida com o perfil esperado da figura 28 para as faixas de velocidade mais altas. Para evidenciamento das diferenças

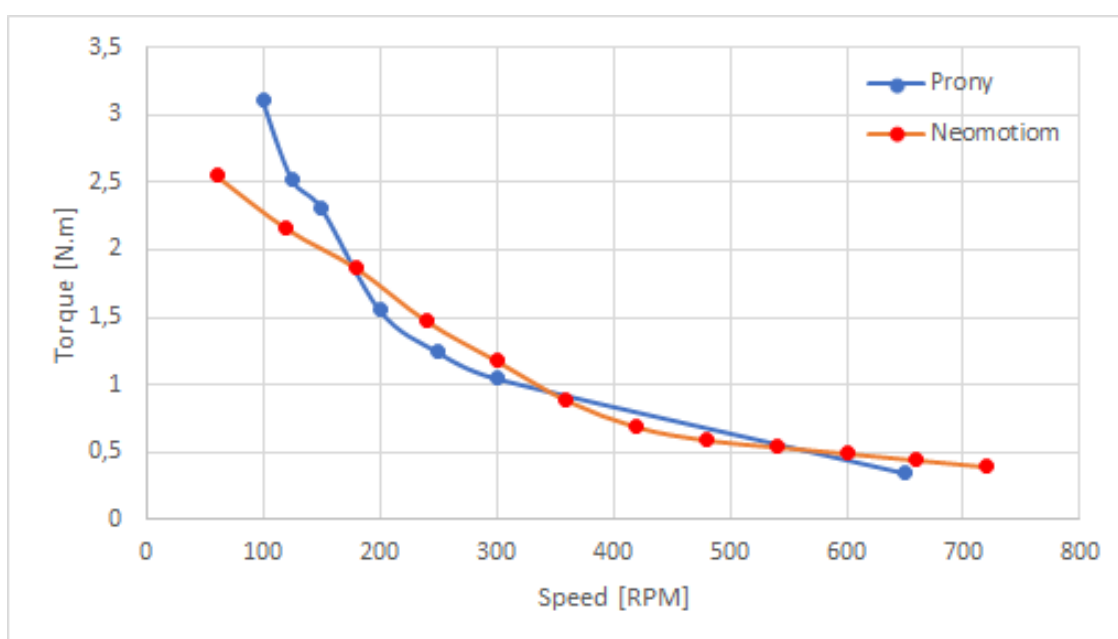
entre os valores fornecidos pelo fabricante e os valores obtidos experimentalmente, foram extraídos visualmente os valores das curvas de torque dos *Datasheets* da Kalatec (figura 31) e da Neomotion (figura 32), e colocados em contraste com a curva obtida no experimento (figuras 50 e 51 respectivamente).

Figura 50 – Gráfico com contraste de curvas teste vs kalatec.



Fonte: Autoria própria.

Figura 51 – Gráfico com contraste de curvas teste vs NeoMotion.



Fonte: Autoria própria.

Apesar da curva apresentar um perfil esperado observa-se grande discrepância entre a obtida e a fornecida pelo fabricante do motor. Além disso, observa-se uma maior similaridade com a curva fornecida por outro fabricante, salientando, ainda mais as incertezas nas informações contidas no *Datasheet* fornecido pela Kalatec.

Devido ao sigilo do fabricante frente aos seus métodos para obtenção das informações do motor testado, não é possível determinar se o método empregado é dito como válido. No entanto, visto que há similaridade com as informações de outro modelo (de outro fabricante), motor este, que possui maior capacidade de torque, tamanho e peso, supõe-se que o método empregado neste estudo é suficientemente confiável.

Destaca-se, também, que a partir dos resultados obtidos experimentalmente, tornou-se possível concluir de que o motor proposto para o sistema do cabeçote é adequado para o sistema de extrusão e que possui torque suficiente até para velocidades fora da faixa de aplicação.

5.3 Aquecimento e controle de temperatura

Com a utilização do conjunto RAMPS, Marlin e Repetier, simplificou-se bastante a montagem de um setup de bancada para confirmação experimental do funcionamento do sistema de controle de temperatura embutido na RAMPS.

Para averiguação do funcionamento do controle de temperatura, configurou-se o Marlin e a RAMPS para utilização de apenas um bico extrusor e uma mesa aquecida que operam simultaneamente. Para isso, o Marlin oferece informações detalhadas sobre quais variáveis devem ser alteradas para cada tipo de configuração desejada e para cada limite que o sistema deve ter ou suportar.

Vale ressaltar que, por questões de segurança, o sistema de aquecimento é inicialmente e por padrão desativado, requerendo obrigatoriamente alteração em seu código e variáveis para funcionamento completo de qualquer sistema de impressão que utilizar o *Marlin firmware*. Consequentemente, neste estudo serão descritas as variáveis que foram alteradas para que o *Firmware* entre em conformidade com o sistema descrito por Santos (2019).

- EXTRUDERS : Variável que define o número de bicos extrusores que o sistema terá. Mantido em seu valor padrão, igual à 1.
- TEMP_SENSOR_0 : Variável que aciona o primeiro sensor de temperatura que deve ser acoplado ao bico extrusor. Valor alterado de 0 para 1.
- TEMP_SENSOR_BED : Variável que aciona o sensor de temperatura que deve ser acoplado à mesa de deposição aquecida. Valor alterado de 0 para 1.

- TEMP_RESIDENCY_TIME : Variável que define janela de tempo, em segundos, para o sistema atingir e estabilizar temperatura para o valor alvo. Mantido valor padrão, igual à 10 segundos.
- TEMP_HYSTERESIS : Variável que define a tolerância à variação de temperatura do sistema. Mantido em valor padrão de $\pm 3^{\circ}\text{C}$.
- THERMAL_PROTECTION_HOTENDS : Variável que ativa as proteções do sistema de controle de temperatura, relaciona aos bicos extrusores. Desativada para possibilitar testes com sistema de impressão incompleto. Valor alterado de 1 para 0.
- THERMAL_PROTECTION_BED : Variável que ativa as proteções do sistema de controle de temperatura, relaciona à mesa aquecida. Desativada para possibilitar testes com sistema de impressão incompleto. Valor alterado de 1 para 0.

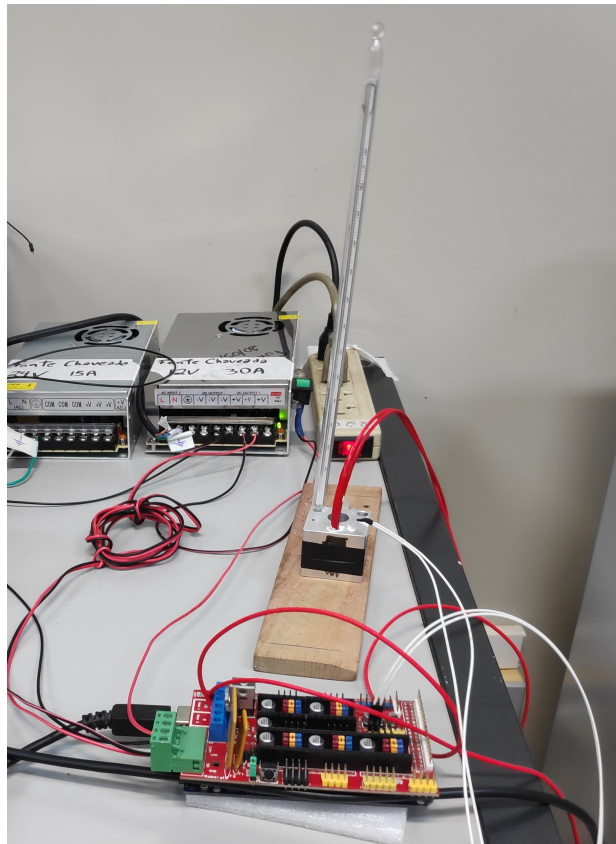
Uma vez setadas estas variáveis, o programa foi transferido para a placa de controle, o hardware foi ligado (figura 52) e comunicação com o Repetier estabelecida. O cartucho de aquecimento foi acoplado à um bloco de alumínio maciço, com pasta térmica preenchendo os espaço entre os dois componentes para melhor transferência de calor, e de maneira semelhante o sensor de temperatura foi acoplado em posição adjacente do cartucho de aquecimento.

Após configuração do hardware e montagem do setup em bancada, o funcionamento do sistema foi testado e monitorado. A figura 53 evidencia o funcionamento do cartucho de aquecimento com temperatura alvo de 100°C e com sua curva de aquecimento (rosa) ativamente elevando-se e com 100% de funcionamento amostrado pelos gráficos inferiores "Output Extruder".

A figura 54 também, evidencia o funcionamento da mesa de aquecimento com temperatura alvo de 50°C e amostragem de seu funcionamento representado pela curva em azul e pelo gráfico inferior "Output Bed".

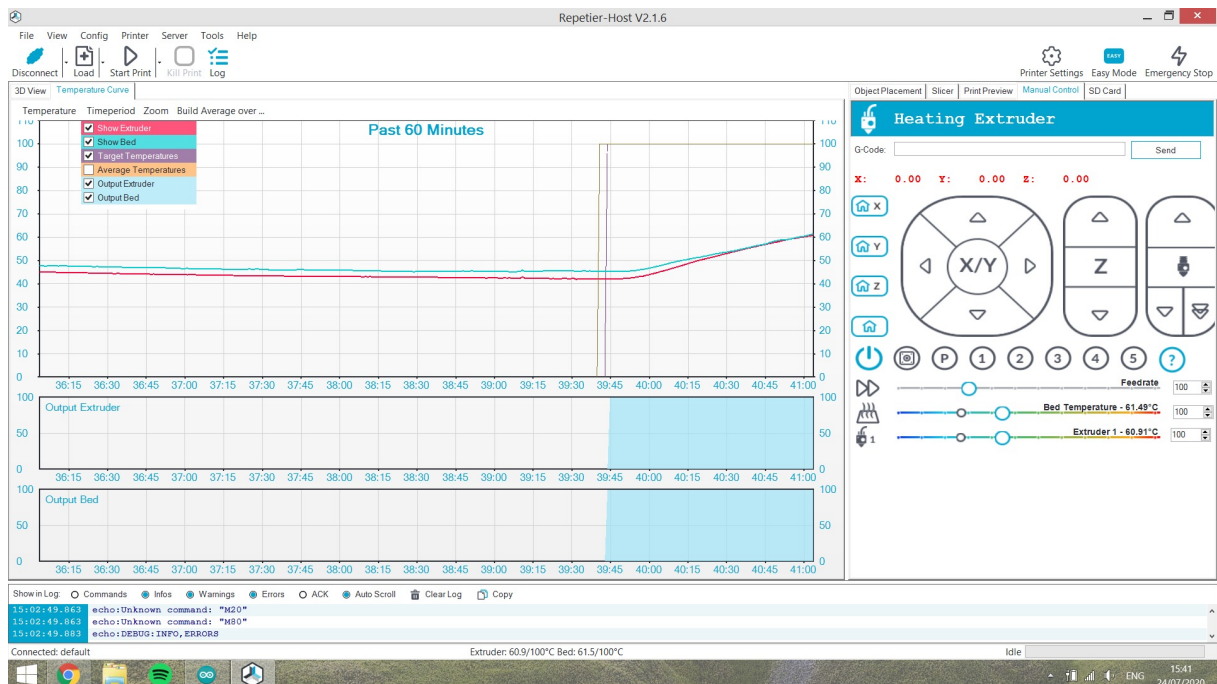
Para certificar de que o sistema de monitoramento também estava funcionando apropriadamente, foram utilizados externamente dois termômetros, um de mercúrio (com pasta térmica em sua ponta) e um infra-vermelho. Desta maneira, caso o sensor apontasse uma temperatura diferente da real, essa diferença poderia ser facilmente detectada e corrigida a calibração dos sensores via *software*.

Figura 52 – *Setup* de bancada para medição de temperatura.



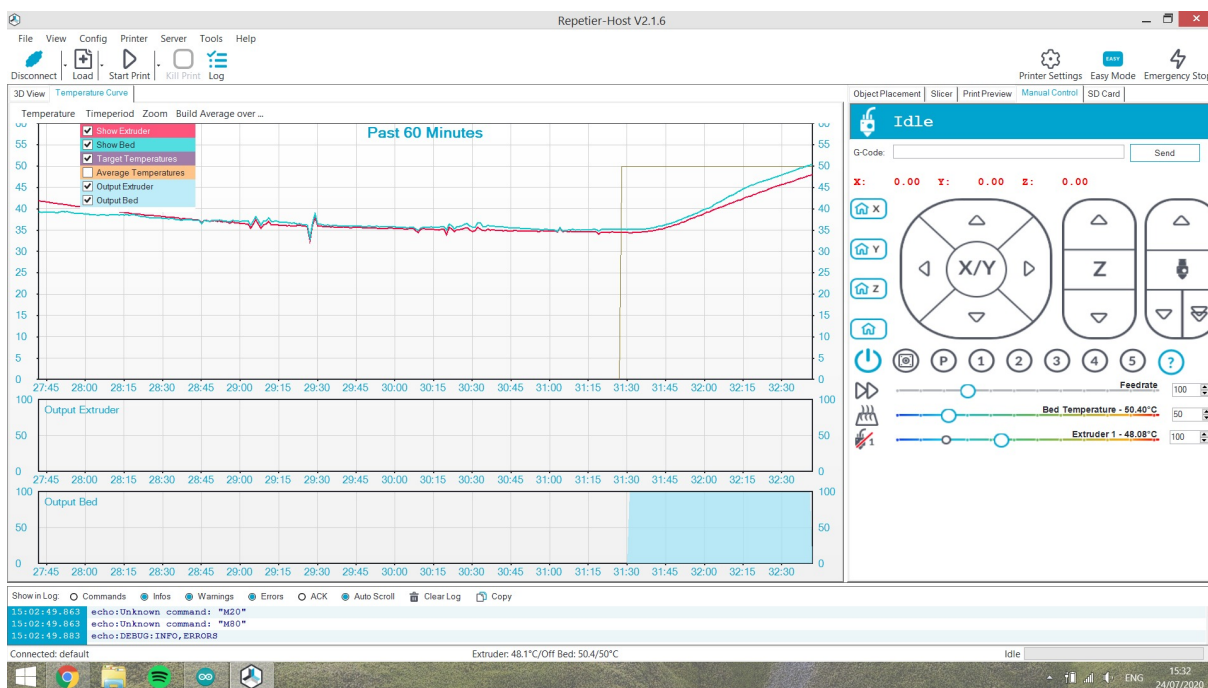
Fonte: Autoria própria.

Figura 53 – Monitoramento de funcionamento do sistema aquecimento pelo Repetier.



Fonte: Autoria própria.

Figura 54 – Monitoramento de funcionamento do sistema de controle de temperatura pelo Repetier.



Fonte: Autoria própria.

6 CONCLUSÃO

Esta seção foi fragmentada em 3 partes de maneira a organizar as discussões a cerca deste trabalho, separando-as em conclusões tiradas a partir dos resultados obtidos experimentalmente, descrição das dificuldades encontradas durante a execução dos experimentos, e discussões sobre possibilidades de trabalhos futuros, correlatos com este.

6.1 Conclusões sobre o projeto

Neste trabalho foram conduzidos estudos e experimentos para identificação de parâmetros eletromecânicos para o sistema de acionamento de um cabeçote adaptado baseado em extrusão por monorosca, dentre os quais foram analisados a capacidade de torque do motor que realizará a movimentação do cabeçote, e a capacidade de aquecimento do sistema de controle da impressora para liquefação do material durante o processo de extrusão.

O teste de Back-EMF permitiu obter-se informações acerca do motor e do sistema de acionamento as quais não foram fornecidas por nenhum dos fabricantes de motores de passo encontrados. A constante obtida nesse teste, permitiu visualização de que a utilização de 12V possivelmente não fosse suficiente para movimentar o sistema mecânico quando este estivesse com aplicação de cargas próximas de seu limite. Dado isso, a utilização de uma fonte de 24V permitiu melhor comparação com os dados fornecidos pelo fabricante, assim como, aumentou a faixa de velocidades de operação na qual o motor pode ser acionado elevando a velocidade máxima (ausente de técnicas de *Field Weakening*) do motor de 415rpm para 830rpm.

Dentre os possíveis métodos para obtenção da curva de torque do motor estudado, optou-se pelo freio de prony devido à sua simplicidade conceitual e baixo custo de confecção. Apesar deste método oferecer baixa precisão, alto erro e constante manutenção, seus resultados têm confiabilidade suficiente para possibilitar a conclusão de que o motor estudado tem capacidade de torque suficiente para adequar-se ao sistema de extrusão desenvolvido por Santos (2019) e Freitas (2014).

Suplementarmente, a calibração do sistema de controle e monitoramento de temperatura deu-se por satisfatório uma vez que constatou-se seu funcionamento e averiguado que o sistema possui capacidade de aquecimento acima das temperaturas necessárias para processar os materiais pretendidos.

6.2 Dificuldades encontradas

Durante a execução dos experimentos foram encontradas diversas situações inesperadas e dificuldades, dentre as quais são dignas de menção:

- O freio de prony que devido ao fato de ser um sistema baseado em atrito, deve ter constante ventilação, não pode ser composto inteiramente de peças de material inflamável e não pode ser utilizado continuamente por longos períodos de teste. Durante os experimentos executados em laboratório, deparou-se com situações de criação de fumaça e pequenas chamas quando utilizado um tambor de madeira, e derretimento do material quando utilizado um tambor de material polimérico, devido ao atrito prolongado durante a execução dos testes de torque no motor.
- Utilização de diferentes tensões por parte dos sistemas que devem ser unificados posteriormente: O sistema de acionamento do motor do cabeçote utiliza 24V, enquanto o sistema de aquecimento, controle de temperatura e movimentação utiliza 12V (requerimento para utilização da RAMPS), tornando necessário a separação do teste em duas bancadas com diferentes tensões e utilização de duas fontes chaveadas com diferentes tensões elétricas em suas respectivas saídas.
- Utilização de um driver específico para acionamento do motor responsável pela movimentação do cabeçote. Inicialmente pretendia-se usar o driver DRV8825, assim como é utilizado nos sistema de movimentação das impressoras RepRap. No entanto, devido à maior necessidade de corrente requerida pelo motor, para fornecer torque suficiente para o cabeçote, foi necessário selecionar um driver com maior capacidade de corrente, sendo assim, o driver WD2404 foi escolhido para suprir essa necessidade.
- Utilização de pinagem e implementação de sinal de PWM do microcontrolador que fosse independente de interrupções programadas no código do controlador, e permitisse alteração de frequência. Para simultaneidade entre o acionamento do motor (através do sinal PWM) e comunicação serial com o computador do usuário, foi necessária a utilização de uma biblioteca aberta, desenvolvida por Sam Knight (2017) que mantém o sinal de PWM ativo em alguns pinos específicos do controlador, enquanto este executa outras instruções concomitantemente, permitindo alteração de sua frequência, sem impactar na qualidade do sinal ou no tempo de resposta das outras rotinas programadas.

6.3 Trabalhos Futuros

Embasado neste estudo sugere-se novos trabalhos com foco em:

- Estudos voltados para a utilização de sistemas auxiliares apoiados em lógica *Master-Slave* para utilização de múltiplos cabeçotes, ou utilização de cabeçotes com múltiplos motores; e união dos sistemas de controle para apenas um controlador interfaceando todas as plataformas.
- Uma vez finalizada a montagem do cabeçote, sugere-se um projeto de controle de saída de filamento para aplicações de impressão 3D, uma vez que o sistema atual prevê saída contínua de material do bico extrusor.
- Estudo e projeto para desenvolvimento de um *Slot* e *kit* para fácil alteração do sistema de cabeçote baseado em monorosca para o sistema de extrusão de filamento comum, e vice-e-versa.
- Reprodução e adaptação deste trabalho para sistemas de extrusão baseados em dupla-rosca.

REFERÊNCIAS

- 3DPARTS.CO.UK. *3Dparts - How It Works*. 2020. <<http://www.3dparts.co.uk/how-it-works/>>. Acesso em: 7 Nov. 2020.
- ACARNLEY, P. **Stepping Motors: a guide to theory and practice**. [S.l.]: Institute of Engineering and Technology, 2007. (IET Control Engineering Series 63).
- AGARWALA, M. K. et al. Structural quality of parts processed by fused deposition. **Rapid prototyping journal**, MCB UP Ltd, 1996.
- AHN, S.-H. et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling abs. **Rapid prototyping journal**, MCB UP Ltd, 2002.
- ALAFAGHANI, A. et al. Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: A design-for-manufacturing approach. **Procedia Manufacturing**, v. 10, p. 791 – 803, 2017. ISSN 2351-9789. 45th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 45, LA, USA. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917302615>>.
- ARDUINO. 2005. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>.
- BALANI, S. et al. Influence of printing parameters on the stability of deposited beads in fused filament fabrication of poly(lactic) acid. **Additive Manufacturing**, v. 25, p. 112 – 121, 2019. ISSN 2214-8604. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860418302884>>.
- BECKER, L. et al. Instrumentação de moldes, sensores e simulação de temperatura no processo de injeção de termoplásticos junior. 2013.
- BELLINI, A. **Fused deposition of ceramics: a comprehensive experimental, analytical and computational study of material behavior, fabrication process and equipment design**. 2002. Tese (Doutorado) — Drexel University Philadelphia, PA, 2002.
- BELLINI, A.; SHOR, L.; GUCERI, S. I. New developments in fused deposition modeling of ceramics. **Rapid Prototyping Journal**, Emerald Group Publishing Limited, 2005.
- BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**. [S.l.]: Blucher, 2013.
- CAMARGO, T. A. B. da S. Desenvolvimento de kit didático para ensino de teoria de motores de passo. 2007.
- CHaidas, D. et al. The impact of temperature changing on surface roughness of FFF process. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, IOP Publishing, v. 161, p. 012033, nov 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1757-899x/161/1/012033>>.
- CHENG, X. M. et al. The design of screw extrusion mechanism based on melted extrusion modeling. In: TRANS TECH PUBL. **Applied Mechanics and Materials**. [S.l.], 2011. v. 44, p. 1455–1459.

CHIARONI, A.; SILVEIRA, Z. Experimental and numerical evaluation of the temperature profile of a modular extrusion head applied to an experimental 3d printer. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 103, n. 9-12, p. 4385–4398, 2019.

CIA., A. e. **Como medir a rotação de um motor com o sensor de velocidade LM393 - Arduino e Cia.** 2020. Acesso em: 7 Nov. 2020. Disponível em: <https://www.arduinoecia.com.br/sensor-de-velocidade-lm393-arduino>.

COSTA, S.; DUARTE, F.; COVAS, J. Thermal conditions affecting heat transfer in fdm/ffe: a contribution towards the numerical modelling of the process. **Virtual and Physical Prototyping**, Taylor Francis, v. 10, n. 1, p. 35–46, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17452759.2014.984042>.

CROCCOLO, D.; AGOSTINIS, M. D.; OLMÍ, G. Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of abs-m30. **Computational Materials Science**, Elsevier, v. 79, p. 506–518, 2013.

CUNHA, D. A. L. V. d. et al. Fabrication and characterization of scaffolds of poly (ϵ -caprolactone)/biosilicate® biocomposites prepared by generative manufacturing process. **International Journal of Biomaterials**, Hindawi, v. 2019, 2019.

DÁVILA, J. et al. Fabrication of pcl/ β -tcp scaffolds by 3d mini-screw extrusion printing. **Journal of Applied Polymer Science**, Wiley Online Library, v. 133, n. 15, 2016.

DOMINGO-ESPIN, M. et al. Influence of building parameters on the dynamic mechanical properties of polycarbonate fused deposition modeling parts. **3D Printing and Additive Manufacturing**, Mary Ann Liebert, Inc. 140 Huguenot Street, 3rd Floor New Rochelle, NY 10801 USA, v. 1, n. 2, p. 70–77, 2014.

ELECTRONICS, P. R. . **DRV8825 Stepper Motor Driver Carrier, High Current.** 2020. Acesso em: 7 Nov. 2020. Disponível em: <https://www.pololu.com/product/2133>.

FAB@HOME Project. 2006. Disponível em: <https://www.fabathome.net/>.

FILIPEFLOP. **Sensor de Velocidade Encoder - FilipeFlop Componentes Eletrônicos.** 2020. Acesso em: 7 Nov. 2020. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/produto/sensor-de-velocidade-encoder/>.

FOGGIATTO, J. A. et al. Utilização do processo de modelagem por fusão e deposição (fdm) na fabricação rápida de insertos para injeção de termoplásticos. Florianópolis, SC, 2005.

FREITAS, M. S. de. Projeto conceitual e preliminar de uma rosca de extrusão para uma impressora 3-d de pequeno porte. 2012.

FREITAS, M. S. de. **Análise paramétrica e validação experimental de um cabeçote de extrusão baseado em rosca, para impressão 3-D.** 2014. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2014.

GALANTUCCI, L. et al. Analysis of dimensional performance for a 3d open-source printer based on fused deposition modeling technique. **Procedia CIRP**, v. 28, p. 82 – 87, 2015. ISSN 2212-8271. 3rd CIRP Global Web Conference - Production Engineering Research. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115002760>.

GAO, W. et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. **Computer-Aided Design**, Elsevier, v. 69, p. 65–89, 2015.

GARG, A.; TAI, K.; SAVALANI, M. State-of-the-art in empirical modelling of rapid prototyping processes. **Rapid Prototyping Journal**, Emerald Group Publishing Limited, 2014.

GIBSON, I. **Additive Manufacturing Technologies**. [S.l.]: Springer Science+Business Media, 2015.

GILMER, E. L. et al. Model analysis of feedstock behavior in fused filament fabrication: Enabling rapid materials screening. **Polymer**, v. 152, p. 51 – 61, 2018. ISSN 0032-3861. SI: Advanced Polymers for 3DPrinting/Additive Manufacturing. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386117311369>>.

GRAF, R. F. **Modern Dictionary of Electronics**. [S.l.]: Newnes, 1999.

GRUPO Neoyama - Neomotion. 2012. Disponível em: <<https://neomotion.com.br/motor-de-passo/>>.

HALIM, K. A.; FARRELL, J. B.; KENNEDY, J. E. Optimisation of a twin screw extrusion process for enhanced short-term mechanical properties of polyamide 11 nanocomposites using design of experiment (doe) approach. In: **Conference paper, June**. [S.l.: s.n.], 2012.

HOSSAIN, M. S. et al. Improving tensile mechanical properties of fdm-manufactured specimens via modifying build parameters. In: **International Solid Freeform Fabrication Symposium: An Additive Manufacturing Conference. Austin, TX**. [S.l.: s.n.], 2013. v. 2013, p. 380–392.

INFORÇATTI, P. Adaptação e construção de uma máquina para prototipagem rápida de projeto aberto para fins de pesquisa. **Faculdade Independente do Nordeste-FAINOR. Vitória da Conquista. Brasil**, p. 57, 2007.

JONES, R. et al. Reprap—the replicating rapid prototyper. **Robotica**, Cambridge University Press, v. 29, n. 1, p. 177–191, 2011.

KALATEC.

MALONE, E.; LIPSON, H. Fab@ home: the personal desktop fabricator kit. **Rapid Prototyping Journal**, Emerald Group Publishing Limited, 2007.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes**. [S.l.]: Artliber Ed., 2005.

NAVARRO DIEGO; SALATA, G. R. G. Influência do aumento da porcentagem de álcool na gasolina e angulação de trabalho no motor briggs e stratton. CEFET-RJ, 2015.

NETTO, J. M. J.; SILVEIRA, Z. d. C. Design of an innovative three-dimensional print head based on twin-screw extrusion. **Journal of Mechanical Design**, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 140, n. 12, 2018.

NETTO, P. I. **Estudo da viabilidade técnica e projeto de um mini-cabecote de extrusão com rosca para impressoras tridimensionais portáteis**. 2013. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2013.

ONWUBOLU, G. C.; RAYEGANI, F. Characterization and optimization of mechanical properties of abs parts manufactured by the fused deposition modelling process. **International Journal of Manufacturing Engineering**, Hindawi, v. 2014, 2014.

PENG, A.; XIAO, X.; YUE, R. Process parameter optimization for fused deposition modeling using response surface methodology combined with fuzzy inference system. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 73, n. 1-4, p. 87–100, 2014.

PWM.H - Forum Arduino. 2017. Original Forum post:
<https://forum.arduino.cc/index.php?topic=117425.0>. Disponível em:
<<https://github.com/terryjmyers/PWM>>.

RAGAERT, K. et al. Design and thermoregulation of a new microextrusion dispense head for 3d-plotting of thermally sensitive thermoplastics. **Polymer Engineering & Science**, Wiley Online Library, v. 53, n. 2, p. 273–282, 2013.

RAUWENDAAL, C. **Polymer extrusion**. [S.l.]: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2014.

REITZ, E. et al. Residence time modeling of hot melt extrusion processes. **European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics**, Elsevier, v. 85, n. 3, p. 1200–1205, 2013.

REPETIER-HOST. 2011. Disponível em: <<https://www.repetier.com/>>.

REPRAP. 2004. Disponível em: <https://reprap.org/wiki/RepRap_Options>.

REPRAP. **PCB Heatbed - RepRap**. 2020. Acesso em: 7 Nov. 2020. Disponível em: <https://reprap.org/wiki/PCB_Heatbed>.

_____. **RAMPS 1.4 Assembly Guide 3D Printer Czar**. 2020. Acesso em: 9 Nov. 2020. Disponível em: <https://www.reprap.org/mediawiki/images/0/06/RAMPS_dossier.pdf>.

SANTANA, L.; ALVES, J. L.; NETTO, A. d. C. S. A study of parametric calibration for low cost 3d printing: Seeking improvement in dimensional quality. **Materials & Design**, Elsevier, v. 135, p. 159–172, 2017.

SANTOS, L. E. F. Influência de parâmetros de processo 3d nas propriedades físicas de corpos de prova gerados por técnica aditiva utilizando cabeçote de extrusão por rosca. p. 122, 2019. Manuscrito de qualificação (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SIDAMBE, A. T. Biocompatibility of advanced manufactured titanium implants—a review. **Materials**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 12, p. 8168–8188, 2014.

SILVEIRA, Z. d. C. et al. Design development and functional validation of an interchangeable head based on mini screw extrusion applied in an experimental desktop 3-d printer. **International Journal of Rapid Manufacturing**, Inderscience Publishers Ltd, v. 4, n. 1, p. 49–65, 2014.

SLIC3R - Open source 3D printing toolbox. 2011. Disponível em: <<https://slic3r.org/>>.

- SOOD, A. K.; OHDAR, R.; MAHAPATRA, S. S. Improving dimensional accuracy of fused deposition modelling processed part using grey taguchi method. **Materials & Design**, Elsevier, v. 30, n. 10, p. 4243–4252, 2009.
- SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. **Materials & Design**, Elsevier, v. 31, n. 1, p. 287–295, 2010.
- SPOERK, M.; HOLZER, C.; GONZALEZ-GUTIERREZ, J. Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 137, n. 12, p. 48545, 2020. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.48545>>.
- STANDARD, A. Iso/astm 52900: 2015 additive manufacturing-general principles-terminology. **ASTM F2792-10e1**, 2015.
- THOMPSON, M. K. et al. Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. **CIRP annals**, Elsevier, v. 65, n. 2, p. 737–760, 2016.
- TURNER, B. N.; STRONG, R.; GOLD, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. process design and modeling. **Rapid Prototyping Journal**, Emerald Group Publishing Limited, 2014.
- TYMRAK, B.; KREIGER, M.; PEARCE, J. M. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-d printers under realistic environmental conditions. **Materials & Design**, Elsevier, v. 58, p. 242–246, 2014.
- VALKENAERS, H. et al. A novel approach to additive manufacturing: screw extrusion 3d-printing. In: RESEARCH PUBLISHING; SINGAPORE. **Proceedings of the 10th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture**. [S.l.], 2013. p. 235–238.
- VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. [S.l.]: Editora Blucher, 2017.
- VOLPATO, N. et al. Experimental analysis of an extrusion system for additive manufacturing based on polymer pellets. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 81, n. 9-12, p. 1519–1531, 2015.
- WHITE, J. L.; POTENTE, H. **Screw extrusion**. [S.l.]: Hanser, Carl, 2012.
- WOHLERS, T. et al. **Wohlers Report 2017 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report**. [S.l.]: Wohlers Associates, 2017.
- WOTIOM. **Driver Para Motor de Passo 4A WD-2404**. 2020. Acesso em: 7 Nov. 2020. Disponível em: <<https://www.wotiom.com/produto/driver-para-motor-de-passo-4a-wd-2404/>>.
- ZUILICHEM, D. V.; JAGER, T.; STOLP, W. Residence time distributions in extrusion cooking. part ii: Single-screw extruders processing maize and soya. **Journal of food engineering**, Elsevier, v. 7, n. 3, p. 197–210, 1988.

Apêndices

APÊNDICE A – CÓDIGO DE ACIONAMENTO DO MOTOR NEMA23

```

1 #include "PWM.h"

3 // Portas para Stepper Motor
  int DIR = 12;
5 int STEP = 11;
  int EN = 13;
7
  // Variaveis globais auxiliares
9 int32_t freq = 0;
  float aux = 0; //
11 float rpm = 200; //
  String cmd_string;
13 int HORARIO = HIGH;
  int ANTI_HORARIO = LOW;
15
  void ramp(int32_t freq)
17 {
    if(aux < freq) //Acelera o
19 {
      for(int32_t i=aux ; i<=freq ; i+=6.66)
21 {
        SetPinFrequencySafe(STEP,i);
23 pwmWrite(STEP,128);
        Serial.print("RPM = ");
25 Serial.println(i*60/400);
        delay(200); //Alterar este valor para alterar tempo de
          acelera o (maior = mais devagar)
27 }
      }
29 if(aux > freq) //Desacelera o
    {
31 for(int32_t i = aux ; i>=freq ; i-=6.66)
      {
33 SetPinFrequencySafe(STEP,i);
        pwmWrite(STEP,128);
35 Serial.print("RPM = ");
        Serial.println(i*60/400);

```

```
37     delay(10); //Alterar este valor para alterar tempo de
        accelera o (maior = mais devagar)
    }
39 }
    aux = freq;
41 }

43 void setup() {

45     InitTimersSafe();

47     //SET das portas do Driver DRV8825
    pinMode(EN,OUTPUT);
49     pinMode(DIR,OUTPUT);
    pinMode(STEP,OUTPUT);
51
    //Definindo os niveis logicos das portas do Driver
53     digitalWrite(EN,LOW);

55     digitalWrite(DIR, ANTI_HORARIO); //Dire o do motor:
        HORARIO ou ANTI_HORARIO, mudar este valor nesta linha de
        c digo

57     Serial.begin(9600);
    Serial.println("Inicializando...");
59
    // for(freq=0 ; freq<=1 ; freq+=1) //Descomentar para fazer o
        motor j come ar rodando //tamb m alterar valor inicial da
        variavel "freq"
61 // {
    //     SetPinFrequencySafe(STEP,freq);
63 //     pwmWrite(STEP,128);
    //     delay(5);
65 // }

67     Serial.println("Pronto.");
}

69
void loop() {
71     // Verifica e aguarda algum input na Serial
    if(Serial.available() > 0)
73     {
```

```
cmd_string = Serial.readString();
75
if(cmd_string.toInt() > 0)
77 {
    //Reativa o motor caso voce j tenha digitado 0 antes
79    digitalWrite(EN,LOW);
    // Convers o de valor RPM para frequenica para o Driver
81    freq = cmd_string.toFloat()*400/60;

    // Rotina de rampa de acelera o ou desacelera o do
83    motor
        ramp(freq);
85    }
    if(cmd_string.toInt() == 0)
87    {
        // Convers o de valor RPM para frequenica para o Driver
89        freq = cmd_string.toFloat()*400/60;

        // Rotina de rampa de acelera o ou desacelera o do
91        motor
            ramp(freq);
93

        //Caso digite 0 ele para o motor em seguida
95        digitalWrite(EN, HIGH);
    }
97 }

99 rpm = freq*60/400 + 1;
    cmd_string = ' ';
101
// SetPinFrequencySafe(STEP,freq);
103 // pwmWrite(STEP,128);

105 Serial.print("RPM_Motor = ");
    Serial.println(rpm);
107
    delay(5);
109 }
```

Listing A.1 – Código Arduino de acionamento do motor. **Fonte:** Autoria Própria.