

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA - CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEMec**

GABRIEL CIOFFI CARDINAL

**SISTEMA MECATRÔNICO PARA IDENTIFICAÇÃO
AUTOMÁTICA DE FILAMENTO POLIMÉRICO UTILIZADO
EM PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA
(IMPRESSÃO 3D)**



São Carlos - SP
2022

GABRIEL CIOFFI CARDINAL

**SISTEMA MECATRÔNICO PARA IDENTIFICAÇÃO
AUTOMÁTICA DE FILAMENTO POLIMÉRICO UTILIZADO
EM PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA
(IMPRESSÃO 3D)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Vidal Aroca

Co-orientador: MSc. Marcos Tan Endo

São Carlos - SP

2022

FOLHA DE APROVAÇÃO

Resultado da avaliação da defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Gabriel Cioffi Cardinal**, intitulado “**Sistema mecatrônico para identificação automática de filamento polimérico utilizado em processo de manufatura aditiva (Impressão 3D)**” defendido junto ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos na presente data.

Resultado:

Prof. Dr. Rafael Vidal Aroca (orientador)
DC / UFSCar

Prof. Dr. Luis Antônio Oliveira Araújo
DEMec / UFSCar

MSc. Marcos Tan Endo
DEMec / UFSCar

Profa. Dra. Marcia Cristina Branciforti
SMM / USP

São Carlos, 23 de março de 2022

Dedico este trabalho a minha
família e minha namorada, agradeço-os por todo o
apoio e carinho durante essa jornada.

Agradecimentos

Agradeço a minha mãe Vânia, a meu pai Narciso e a minha avó Floripes por todo o apoio e criação que me possibilitaram ter acesso à educação, amor e a possibilidade de me tornar uma pessoa melhor a cada dia.

A minha namorada, Lohanna, que sempre esteve ao meu lado durante toda a graduação, apoiando em momentos difíceis e de superação.

Aos meus amigos, Juan Wesley, Rafael Faria, Rodrigo Jun e Lucas Brilhante por toda a amizade, apoio, trabalhos em conjunto e parceria durante esses 5 anos de graduação, a qual foi extremamente mais proveitosa graças a vocês, pessoas que quero próximas por toda a vida.

Ao Técnico Administrativo, Marcos Tan Endo, por toda a ajuda e orientação durante minhas duas Iniciações Científicas e na elaboração do presente trabalho.

À Profa. Dra. Marcia Cristina Branciforti, pela ajuda e disposição no desenvolvimento de pesquisas e na elaboração de uma patente durante minha graduação.

Ao Prof. Dr. Rafael Vidal Aroca, por ter me dado todas as oportunidades que tive durante a graduação. Minha primeira e segunda Iniciações Científicas, envolvimento em projetos de extensão e orientação em todos os aspectos. As oportunidades e portas que se abriram em minha vida profissional, bem como minha formação, eu devo a você. Gostaria de agradecer também a todos os professores, técnicos e funcionários da UFSCar que me possibilitaram concluir minha graduação.

*" Se você quer ser bem sucedido,
precisa ter dedicação total,
buscar seu último limite e dar o
melhor de si. "*

Ayrton Senna da Silva

Resumo

O desenvolvimento tecnológico e o aprimoramento dos processos de fabricação permitiram o surgimento de novas técnicas de manufatura ao decorrer do tempo. A impressão 3D tornou-se uma maneira prática e acessível para fabricação de peças, produtos e componentes, sejam eles mecânicos ou estruturais. Essa tecnologia é cada vez mais comum, tanto em ambientes industriais como particulares, devido a sua versatilidade e fácil interação com o método. No entanto, na manufatura aditiva, é necessário possuir o conhecimento do material que está sendo utilizado, já que a configuração de impressoras do tipo FDM (*Fused Deposition Modeling*) para determinado polímero impacta diretamente no funcionamento adequado da máquina e na qualidade da peça fabricada. No presente trabalho, foi realizada a construção de um protótipo de baixo custo capaz de diferenciar filamentos de Poliacido Láctico (PLA) e Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) através da medição indireta de uma propriedade mecânica intrínseca dos materiais: a dureza. Tal procedimento foi realizado por meio de um sistema, acionado por um servo motor atrelado a um mecanismo quatro barras, capaz de medir a diferença na profundidade de penetração de uma ponta metálica nos filamentos, através da interação de um ímã com sensor de efeito Hall. Foi possível identificar ambos os filamentos a partir da diferenciação da dureza, sendo que os resultados se mostraram alinhados às referências disponibilizadas pelo fabricante de filamentos de PLA e ABS.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. Impressão 3D. Identificação automática de material.

Abstract

Technological development and the improvement of manufacturing processes allowed the emergence of new manufacturing techniques over time. 3D printing has become a practical and affordable way to manufacture parts, products and components, whether mechanical or structural. This technology is increasingly common, both in industrial and private environments, due to its versatility and easy interaction with the method. However, in additive manufacturing, it is necessary to know the material that is being used, since the configuration of FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printers for a given polymer directly impacts the proper functioning and quality of the manufactured part. In the present work, the construction of a low-cost prototype capable of differentiating Polylactic Acid (PLA) and Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) filaments was carried out through the indirect measurement of an intrinsic mechanical property of the materials, the hardness. This procedure was possible by building a system, driven by a servo motor linked to a four-bar mechanism, capable of measuring the difference in the penetration depth of a metallic tip in the filaments, through the interaction of a magnet with a Hall effect sensor. It was possible to identify both filaments from the differentiation of hardness, and the results were in line with the references provided by the manufacturer of PLA and ABS filaments.

Keywords: Additive manufacturing. 3D Printing. Automatic Material identification.

Lista de Figuras

Figura 1 - Ilustração dos componentes básicos de uma impressora 3D do tipo FDM	13
Figura 2 - Filamentos de PLA e ABS utilizados em Impressoras 3D do tipo FDM	14
Figura 3 - Ilustração do sistema de monitoramento proposto	18
Figura 4 - Montagem do acelerômetro no sistema	18
Figura 5 - Sistema de monitoramento de imagem	19
Figura 6 - Peças fabricadas: a) Processo interrompido; b) Processo retomado	20
Figura 7 - Sistema de medição de dureza proposto	20
Figura 8 - Fluxograma descritivo das etapas de diferenciação dos polímeros	22
Figura 9 - Durômetro a ser utilizado para as medições	23
Figura 10 - Ensaio de dureza realizado	24
Figura 11 - Sistema proposto para medição indireta de dureza	25
Figura 12 - Sistema proposto para medição indireta de dureza (vista frontal)	25
Figura 13 - Impressora 3D Sethi AiP A3 utilizada para a manufatura das peças	27
Figura 14 - Representação em 2D do mecanismo biela manivela adotado	28
Figura 15 - Diagrama esquemático do circuito de acionamento e medição	30
Figura 16 - Valores de dureza medidos nos corpos de prova de ABS e PLA	31
Figura 17 - Elo a ser fixado no servo motor	32
Figura 18 - Barra intermediária com distância entre os furos L2	33
Figura 19 - Barra deslizante com suporte + ímãs + ponta metálica	33
Figura 20 - Guia linear, suportes do sensor de efeito Hall e guia do filamento	34
Figura 21 - Parafusos de encadernação utilizados como pinos	35
Figura 22 - Servo Motor, base de fixação, abraçadeira e parafusos	35
Figura 23 - Montagem do mecanismo proposto pela Figura 11 e Figura 12	38
Figura 24 - Ampliação da região de medição do campo magnético	38
Figura 25 - Visão geral do sistema de medição montado	39
Figura 26 - Posição inicial do sistema de medição	40
Figura 27 - Posição final do sistema de medição	40
Figura 28 - Medições captadas no Monitor Serial da IDE do ARDUINO	41
Figura 29 - Procedimento de medição da relação entre distância do sensor ao ímã e leitura do pino analógico	42

Figura 30 - Relação entre leitura do pino analógico e distância entre ímã e sensor Hall	43
Figura B.1 - Desenho técnico do Elo ligado ao servo motor	50
Figura B.2 - Desenho técnico da barra intermediária	50
Figura B.3 - Desenho técnico da guia linear	51
Figura B.4 - Desenho técnico da barra deslizante	51
Figura B.5 - Desenho técnico do suporte dos ímãs	52
Figura B.6 - Desenho técnico do suporte do sensor Hall	52
Figura B.7 - Desenho técnico da guia do filamento	53
Figura B.8 - Desenho técnico da guia da abraçadeira do servo motor	53
Figura B.9 - Desenho técnico do suporte do servo motor	54

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros básicos de impressão utilizados nos corpos de prova	23
Tabela 2 - Parâmetros básicos de impressão utilizados nos componentes do sistema	26
Tabela 3 - Resumo das dimensões do mecanismo quatro barras	36
Tabela 4 - Resumo do posicionamento estimado do sistema	37
Tabela 5 - Resultados das medições indiretas de dureza	41
Tabela 6 - Resultados das medições de distância entre ímã e sensor Hall	42

Sumário

1. Introdução	12
1.1. Objetivos.....	15
2. Revisão Bibliográfica	16
3. Materiais e Métodos.....	22
3.1. Medição de Dureza de Corpos de Prova.....	23
3.2. Elaboração do Sistema de Aferição de Dureza.....	24
3.3. Modelagem do Mecanismo Quatro Barras	27
3.4. Elaboração do Circuito de Acionamento e Medição	29
4. Resultados e Discussão.....	31
4.1. Comparação de Dureza de Corpos de Prova	31
4.2. Manufatura dos Componentes do Sistema de Aferição Indireta de Dureza	32
4.3. Cálculo do Posicionamento dos Componentes.....	36
4.4. Montagem do Sistema em Bancada.....	37
4.5. Medição Indireta da Dureza dos Filamentos	39
4.6. Estimativa da Diferença de Profundidade de Penetração nos Filamentos.....	42
5. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Posteriores.....	46
Referências.....	47
Apêndice A – Código Utilizado na IDE do ARDUINO.....	49
Apêndice B – Desenho Técnico dos Componentes Fabricados.....	51

1. Introdução

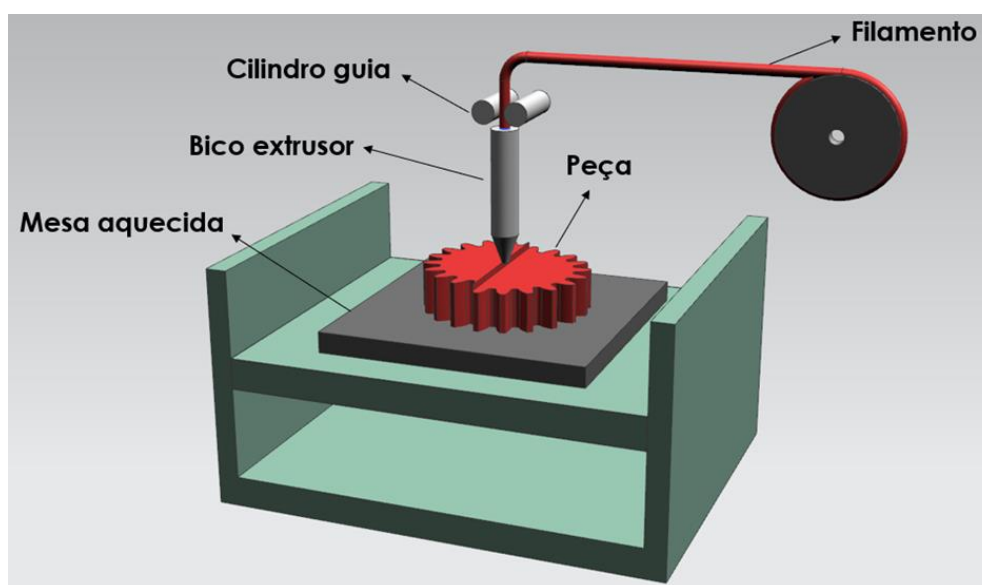
Os processos de fabricação em Engenharia podem ser classificados de acordo com os seus princípios fundamentais: a manufatura subtrativa consiste na remoção do material da peça a ser fabricada com o objetivo de atingir-se formato e dimensões predeterminados, na qual destacam-se os processos de usinagem convencionais, tais como torneamento, fresamento, furação, etc. A manufatura aditiva, usualmente definida como impressão 3D, utiliza o conceito de adição de material de maneira subsequente, camada por camada, a partir de um modelo elaborado utilizando um software CAD (*Computer Aided Design*) (RODRIGUES, 2017).

Devido à evolução da tecnologia que a compõe e a conseqüente redução de custos, especialistas afirmam que a impressão 3D pode ter maior impacto socioeconômico que a Internet (KLARMANN, 2015). Tal crescimento fomenta o fenômeno de democratização ao acesso à tecnologia, no qual mais pessoas passarão a utilizar a manufatura aditiva em suas vidas. Nesse sentido, estimativas indicam que 50% das residências devem possuir uma impressora 3D até 2030 (KRASSENSTEIN, 2014).

Atualmente, existem diversas técnicas empregadas para a realização de impressão 3D, sendo uma das mais populares a de extrusão de filamento polimérico, a qual possui duas denominações possíveis: FDM (*Fused Deposition Modeling*) ou FFF (*Free Form Fabrication*). A primeira remete ao termo que tem seu nome registrado e protegido, o qual é mais comumente utilizado no âmbito científico e industrial. Já a sigla FFF advém da designação pela comunidade de software livre, que utiliza o termo para referir-se a impressoras de código aberto, as quais obtiveram sua popularização graças à expiração recente das primeiras patentes relacionadas à manufatura aditiva (BAUMANN E ROLLER, 2016) e a conseqüente redução dos custos de compra e utilização da tecnologia.

O princípio de funcionamento de uma impressora FDM pode ser observado, de maneira ilustrativa, na Figura 1: um sistema traciona o filamento do material, disponível em um rolo alimentador, através de engrenagens guias para dentro de um bico extrusor, que aquecido à alta temperatura, funde o material e o deposita, camada à camada, na plataforma de construção (mesa aquecida). A sucessão de camadas dá forma à peça desejada.

Figura 1 – Ilustração dos componentes básicos de uma impressora 3D do tipo FDM



Fonte: Autor (2021)

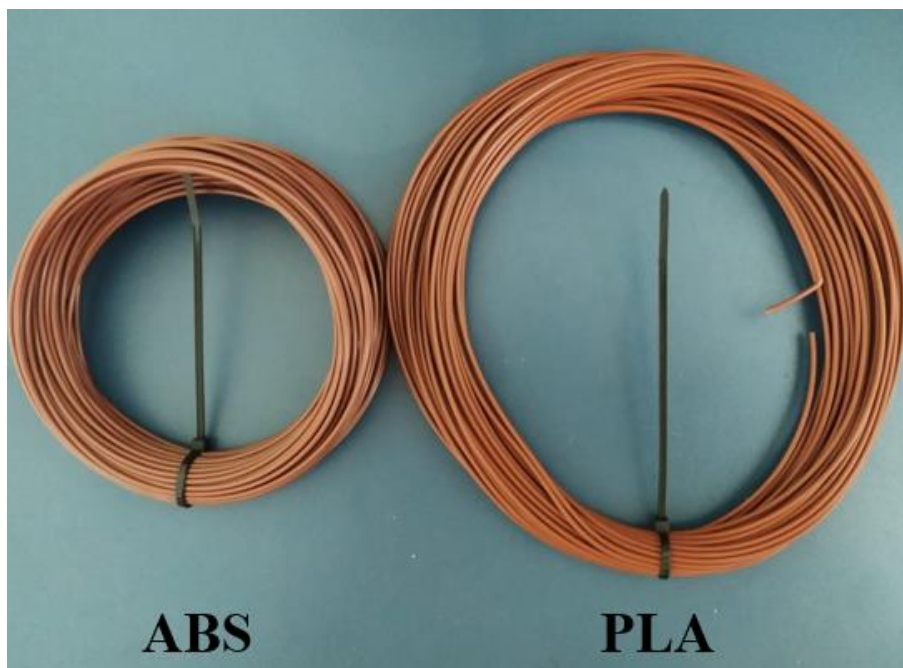
Em algumas impressoras, a extrusora pode vir separada do fusor (bico extrusor da Figura 2). Essa separação permite maior rapidez aos movimentos do bico e à velocidade de impressão, uma vez que há menos peso sob o mecanismo que realiza as movimentações nas direções X, Y e Z.

Nas impressoras FFF de baixo custo, é comum que ocorram diversos tipos de problemas, como o entupimento do bico de extrusão e falha no nivelamento da plataforma de construção, que normalmente é feito por um processo manual. Outro problema comum é a quebra ou término do filamento de material que abastece a extrusora, além do controle impreciso na velocidade de tracionamento do filamento, que pode fornecer material excessivo ou em falta, causando falha na impressão da peça. Outro problema, ainda, se refere à adesão da peça impressa à plataforma de construção. Se a adesão não for adequada e a peça não se fixar na plataforma, a impressão toda é perdida, porém se a adesão for intensa, a peça pode ser danificada ao ser removida após o término do processo. Estes problemas foram documentados e discutidos por Rao et al. (2015). Além disso, há levantamentos que indicam que as taxas de falhas podem ser de até 70% em operações que envolvem manufatura aditiva (GRUNEWALD, 2014).

Entre os insumos poliméricos utilizados na impressão 3D, destacam-se o PLA (Poliácido Láctico) e o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), os quais são amplamente aplicados na manufatura aditiva (BESKO, BILYK e SIEBEN, 2017), uma vez que apresentam

boas características mecânicas e preço acessível. Tais polímeros são aplicados em forma de filamento e exigem diferentes parâmetros de impressão, tais como: temperatura da extrusora, velocidade de extrusão, temperatura da mesa aquecida, etc. Tais configurações dependem essencialmente do conhecimento do usuário, uma vez que são feitas de maneira manual na preparação da peça a ser impressa. Todavia, os filamentos são idênticos visualmente (Figura 2), o que pode levar usuários leigos a confundirem-se no momento do estabelecimento da impressão.

Figura 2 – Filamentos de PLA e ABS utilizados em Impressoras 3D do tipo FDM



Fonte: Autor (2022)

A fim de reduzir as falhas decorrentes da configuração inadequada das impressoras 3D em função dos materiais, a identificação prévia e correta do polímero seria uma opção barata e efetiva para aumento da confiabilidade do processo e tornar o uso mais acessível. Nesse sentido, podem-se utilizar propriedades mecânicas em comum dos insumos, as quais permitiriam a diferenciação. No entanto, tais propriedades devem ser analisadas na forma primitiva do material, ou seja, a partir dos filamentos. Farbman e McCoy (2016) e Shimano et al. (2019) conduziram estudos que evidenciaram a influência dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas de peças fabricadas através de manufatura aditiva. Logo, deve-se evitar comparar os polímeros na forma de peça, uma vez que nem sempre as características de impressão são idênticas a ambos.

Portanto, deve-se escolher uma propriedade comum, fácil de medir e que apresente valores distintos no PLA e no ABS. A dureza mostra-se efetiva para tal, uma vez que apresenta distinção considerável de magnitude para esses polímeros, cerca de R110 para o ABS e R90 para o PLA, ambos na escala Rockwell (FARBMAN e MCCOY, 2016).

No entanto, na fabricação de filamentos para impressão 3D, são utilizados aditivos para facilitar o processo de manufatura, os quais podem alterar as propriedades mecânicas dos materiais. De acordo com a fabricante de polímeros para impressão, 3DLAB, o ABS apresenta dureza equivalente à 74 [Shore D] e o PLA 85 [Shore D], ambos em forma de filamento e medidos de acordo com a norma ASTM D2240. Ou seja, os aditivos fazem com que o PLA tenha uma dureza maior que a do ABS, diferentemente de quando analisamos os materiais em sua forma pura.

1.1. Objetivos

O objetivo principal do presente projeto é a elaboração de um protótipo de bancada capaz de identificar e diferenciar dois dos principais filamentos poliméricos utilizados em processo de manufatura aditiva, PLA e ABS, por meio da aplicação de componentes eletromecânicos e sensores de baixo custo na medição indireta da dureza dos polímeros.

O objetivo geral contempla uma série de objetivos específicos, listados a seguir:

- Realizar ensaios e experimentos para verificar a diferença na dureza do ABS e PLA;
- Analisar os resultados dos experimentos;
- Aplicar conhecimentos da área de Engenharia Mecânica no projeto e construção do protótipo;
- Relacionar dados obtidos através da literatura com experimentos práticos.

2. Revisão Bibliográfica

O crescimento da comunidade de usuários das impressoras 3D em todo o mundo pode ser evidenciado pela aderência desse tipo de manufatura em diversos tipos de indústria. Na área da saúde, Giannopoulos et al. (2016) dissertaram sobre a utilização de manufatura aditiva para identificação de doenças cardiovasculares. O conceito se baseia em utilizar o mapeamento por imagem e digitalização para criação do modelo, que é combinado a um *software* e *hardware* de impressão 3D, possibilitando a reprodução do órgão do paciente em tamanho real e com riqueza de detalhes. A partir do protótipo, é possível identificar doenças cardiovasculares complexas, além de planejar e simular de maneira mais assertiva a possível intervenção cirúrgica, aumentando também o engajamento do paciente no entendimento de suas próprias comorbidades.

Na indústria farmacêutica, Chen et al. (2016) sumarizaram as três grandes áreas de aplicação da impressão 3D como alavanca de evolução do setor. A primeira se refere ao controle de absorção de drogas pelo organismo dos usuários. Pílulas com formatos comerciais comuns apresentam uma taxa de dissolução proporcional à área de contato com o suco gástrico de pacientes, sendo que muitos remédios têm efeito otimizado com uma taxa metabólica mais lenta, impossível de se conseguir com formatos convencionais. A partir da impressão 3D, é possível recriar geometrias complexas e mais eficientes para absorção, impossíveis de serem atingidas com formatos redondos e ovais. A segunda grande área se refere à manufatura de equipamentos farmacêuticos, tais como *dispensers* de drogas controlados. A terceira, abrange a criação de modelos celulares para testes prévios de fármacos, sem a necessidade de culturas celulares complexas e testes antecipados em seres vivos.

Outra grande aplicação da manufatura aditiva que promete revolucionar um dos maiores mercados de consumo mundiais é a produção de comida. Nachal et al. (2019) detalham o processo de impressão 3D de alimentos, onde é possível estabelecer uma relação direta com o modo convencional (utilização de polímeros). Os parâmetros de impressão e variáveis que impactam no resultado final são os mesmos, tais como: velocidade de extrusão, temperatura, tipo de pós processamento do produto final, etc. Tal associação reforça a importância da garantia e do monitoramento dos parâmetros durante o processo.

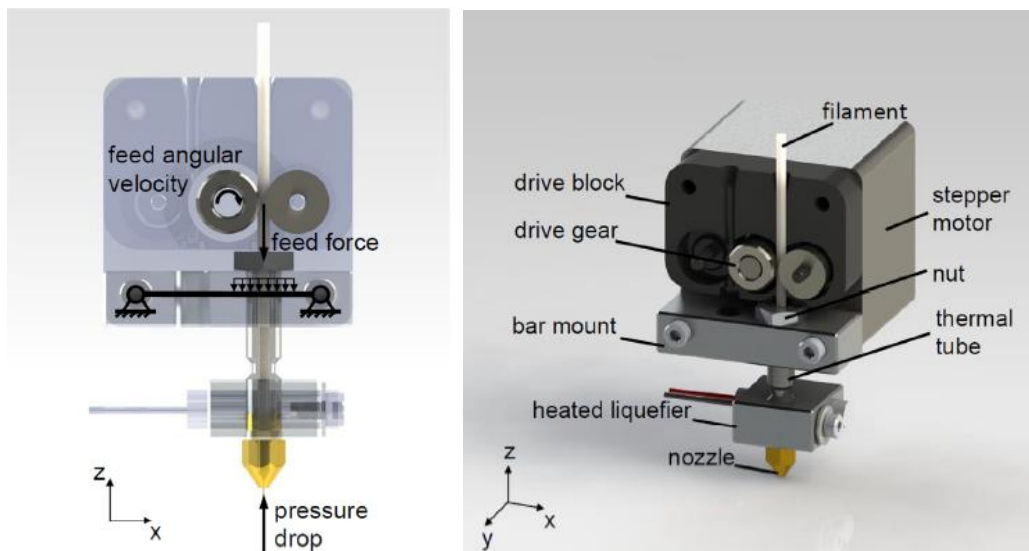
O crescimento na implementação da impressão 3D nas mais diversas áreas reforça o impacto da tecnologia e diz muito sobre o futuro da Indústria 4.0. Um relatório de mercado,

considerando o efeito da Covid-19, prevê que a manufatura aditiva terá um impacto econômico de \$34,8 bilhões até o ano de 2026 com uma taxa de crescimento anual de 22,5% entre 2021 e 2026 (MARKETS AND MARKETS, 2021). Em adição, Wittbrodt et al. (2013) realizaram uma análise de ciclo de vida econômico deste tipo de tecnologia, além de constatar o exponencial crescimento de usuários, foi concluído que o uso dessas impressoras 3D abertas é economicamente viável, além disso a projeção econômico-social das mesmas revela que seu futuro uso em residências viria a gerar grande economia de capital, uma vez que pessoas poderiam imprimir produtos comerciais em suas próprias casas como meio de revolução de mercado, uma vez que empresas iriam comercializar modelos virtuais em 3D para serem comprados e impressos pelos próprios usuários, ao invés de venderem o produto já manufaturado.

Comparada a métodos de fabricação tradicionais que utilizam polímeros, a manufatura aditiva exige maior controle e atenção para que sejam atingidas propriedades e qualidade desejadas ao produto final. Ahn et al. (2022) mostraram que peças impressas utilizando impressão do tipo FFF apresentam problemas de resistência mecânica quando comparadas a peças feitas através de injeção plástica, quando é utilizado ABS. Tal fato deve-se às propriedades anisotrópicas dos produtos fabricados, os quais são provenientes de deposições sucessivas de camadas.

Nesse sentido, visando reduzir erros e falhas que venham a impactar a qualidade do produto final proveniente de processo de manufatura aditiva, o monitoramento inteligente, indicadores de manutenção preditiva e correto estabelecimento dos parâmetros de impressão são essenciais no controle da fabricação. O entupimento do bico de extrusão é um dos problemas mais comuns na impressão 3D e que pode causar desalinhamentos geométricos entre as camadas, além de ser um erro crítico quanto à integridade do equipamento, podendo danificar outros componentes se não for reparado (KIM et al., 2015). Para implementar uma metodologia de manutenção preditiva, Tlegenov, Hong e Lu (2018) criaram um sistema de monitoramento da condição do bico de extrusão a partir da medição das vibrações provenientes de uma barra biapoiada, instalada no curso do filamento e antes do bico de extrusão, através de um acelerômetro. A Figura 3 ilustra o sistema proposto.

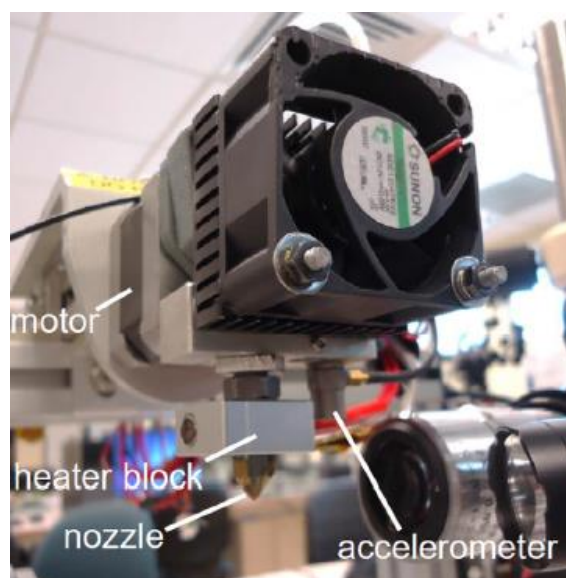
Figura 3 – Ilustração do sistema de monitoramento proposto



Fonte: Tlegenov, Hong e Lu (2018)

A partir da redução da temperatura de extrusão do filamento, feita propositalmente para aumentar a força de avanço, um acelerômetro foi colocado abaixo da barra, a fim de medir a vibração do sistema. Quanto maior a intensidade vibracional, maior era o indicativo da possibilidade de entupimento do bico de extrusão, sendo possível prever o momento correto de troca ou limpeza. A Figura 4 ilustra o posicionamento do acelerômetro no sistema real construído.

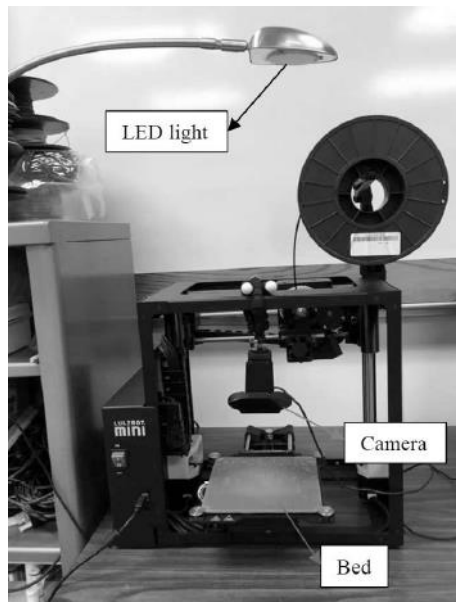
Figura 4 – Montagem do acelerômetro no sistema



Fonte: Tlegenov, Hong e Lu (2018)

Outra metodologia eficaz na prevenção de falhas e desperdício de material na manufatura aditiva se refere ao monitoramento de etapas chave do processo de impressão. Delli e Chang (2018) elaboraram um sistema capaz de monitorar a fabricação de peças com uma impressora 3D a partir do processamento inteligente de imagens. A partir delas, foi utilizado *Machine Learning* para identificar possíveis erros na manufatura, fazendo com que fosse possível interromper o processo e evitar desperdícios de material ou danos à máquina. O sistema utilizado pode ser observado na Figura 5, o qual consiste em uma impressora 3D equipada com uma câmera e uma luz de LED (*Light Emitter Diode*) para auxílio na captação das imagens.

Figura 5 – Sistema de monitoramento de imagem

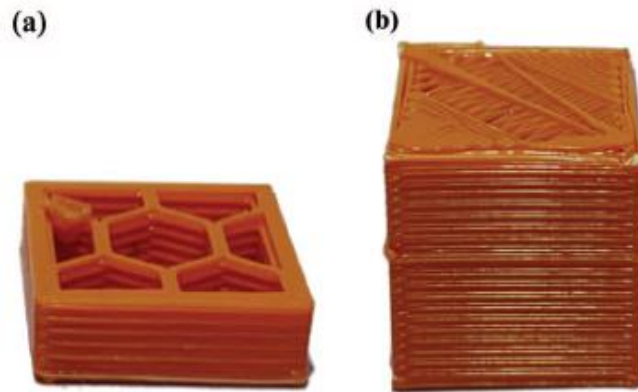


Fonte: Delli e Chang (2018)

Um dos problemas recorrentes na impressão 3D está relacionado à queda de energia durante a manufatura. Impressoras FDM de baixo custo não possuem um sistema que retome a impressão do momento em que foi interrompida, fazendo com que o produto e o material tenham que ser descartados. Em processos que levam horas para serem concluídos, isso pode vir a ser um problema grave na produção. Nesse sentido, Parsekian et al. (2020) desenvolveram um sistema capaz de retomar a fabricação da peça caso ocorra uma queda de energia. Para tal, foi utilizada uma placa *Raspberry PI* para realizar o armazenamento dos dados que indicam em qual linha do *G-Code* o processo foi interrompido, sendo assim é possível dar continuidade à impressão, sem que todo o material seja descartado. A Figura 6 ilustra um exemplo

comparativo entre duas peças simples, uma com o processo interrompido na queda de energia e outra utilizando o sistema proposto.

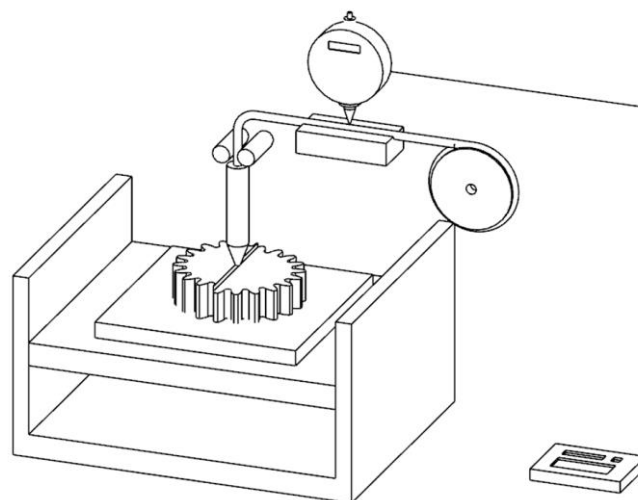
Figura 6 - Peças fabricadas: a) Processo interrompido; b) Processo retomado



Fonte: Parsekian et al. (2020)

Uma possível solução para erros decorrentes da má configuração dos parâmetros de impressão de acordo com o polímero utilizado seria a identificação prévia do insumo e a configuração automática das variáveis a partir disso. Aroca et al. (2021) propuseram um sistema para ajuste automático de máquinas de manufatura aditiva através da identificação do material utilizado. Uma das metodologias propostas consiste na utilização de um durômetro para realizar a diferenciação dos materiais poliméricos através da medição direta da dureza, uma propriedade intrínseca, dos insumos. A Figura 7 ilustra de maneira lúdica o mecanismo proposto.

Figura 7 – Sistema de medição de dureza proposto



Fonte: Aroca et al. (2021)

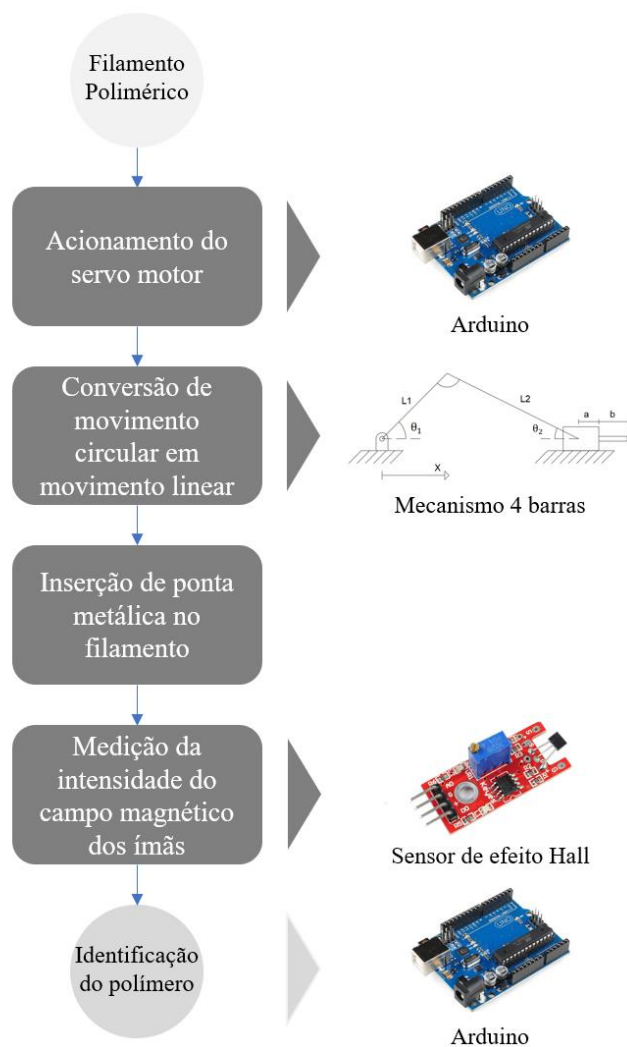
O sistema é composto por uma base de medição, por onde passa o filamento polimérico, acoplada a um durômetro, o qual é ligado a uma placa de aquisição de dados capaz de alterar o *G-Code* e, conseqüentemente, os parâmetros de impressão antes do início da manufatura de acordo com material identificado. Tal possibilidade, além de outras, foi incluída em um pedido de patente, que contempla este trabalho.

3. Materiais e Métodos

A metodologia empregada no projeto baseia-se na verificação prévia das hipóteses de diferença de dureza dos polímeros utilizados e na modelagem teórica do mecanismo. A sua construção e calibração serão tidos como resultados esperados do presente Trabalho de Conclusão de Curso.

A Figura 8 ilustra um fluxograma que descreve as etapas previstas para diferenciação dos filamentos poliméricos de PLA e ABS através do mecanismo proposto.

Figura 8 – Fluxograma descritivo das etapas de diferenciação dos polímeros



Fonte: Autor (2022)

3.1. Medição de Dureza de Corpos de Prova

A fim de verificar a viabilidade da elaboração do sistema, primeiramente será necessária a validação da diferença entre a dureza observada entre os insumos de impressão 3D (ABS e PLA). Para tal, serão impressos corpos de prova quadrados (20 mm x 20 mm x 20 mm) utilizando os mesmos parâmetros básicos de impressão (Tabela 1), com exceção da temperatura de extrusão, que por motivos de diferença de ponto de fusão dos filamentos, não pode ser configurada para um mesmo valor em ambos os polímeros. Para o PLA será utilizado um valor de 190 °C e para o ABS 230 °C.

Tabela 1 – Parâmetros básicos de impressão utilizados nos corpos de prova

Parâmetro de Impressão 3D	Valor
Velocidade de Extrusão	40 mm/s
Altura de camada	0,2 mm
Temperatura da mesa de Impressão	70 °C
Método de adesão à mesa	Brim

Fonte: Autor (2022)

Após impressos, os corpos de prova serão submetidos a um ensaio manual de dureza do tipo Shore A, no qual será utilizado o durômetro MTK-1040 da MetroTokyo. Serão realizadas 10 medições em cada corpo de prova. A Figura 9 ilustra o durômetro a ser utilizado e a Figura 10 um exemplo de corpo de prova sendo submetido a um ensaio de dureza.

Figura 9 - Durômetro a ser utilizado para as medições



Fonte: Autor (2020)

Figura 10 - Ensaio de dureza realizado



Fonte: Autor (2020)

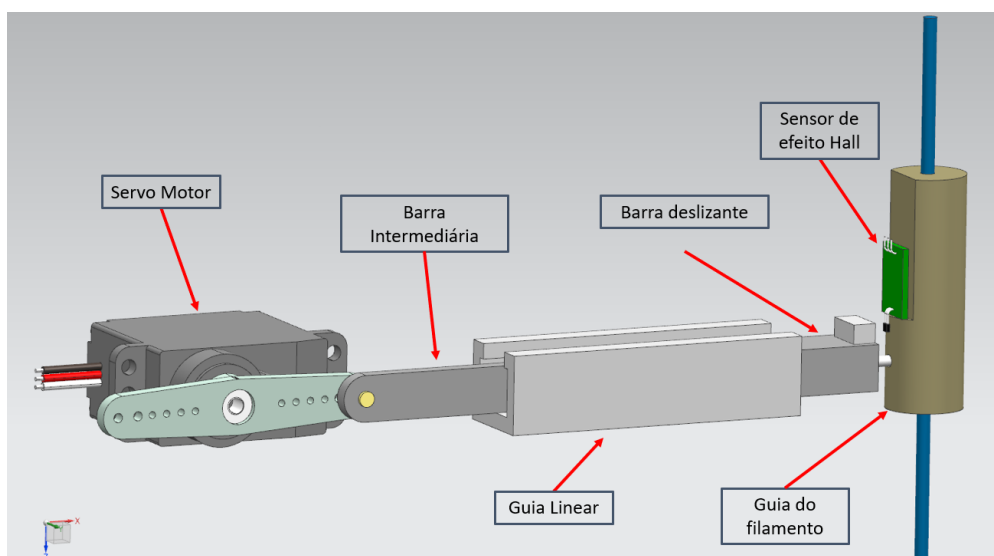
Ressalta-se, aqui, o agradecimento à Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) e à Prof. Dra. Marcia Cristina Branciforti pela disponibilização do durômetro para as medições.

3.2. Elaboração do Sistema de Aferição de Dureza

A fim de diferenciar os dois principais insumos de impressão 3D por meio de uma propriedade mecânica intrínseca dos materiais, a dureza, propõe-se um sistema simples e de baixo custo que seria capaz de exercer tal função.

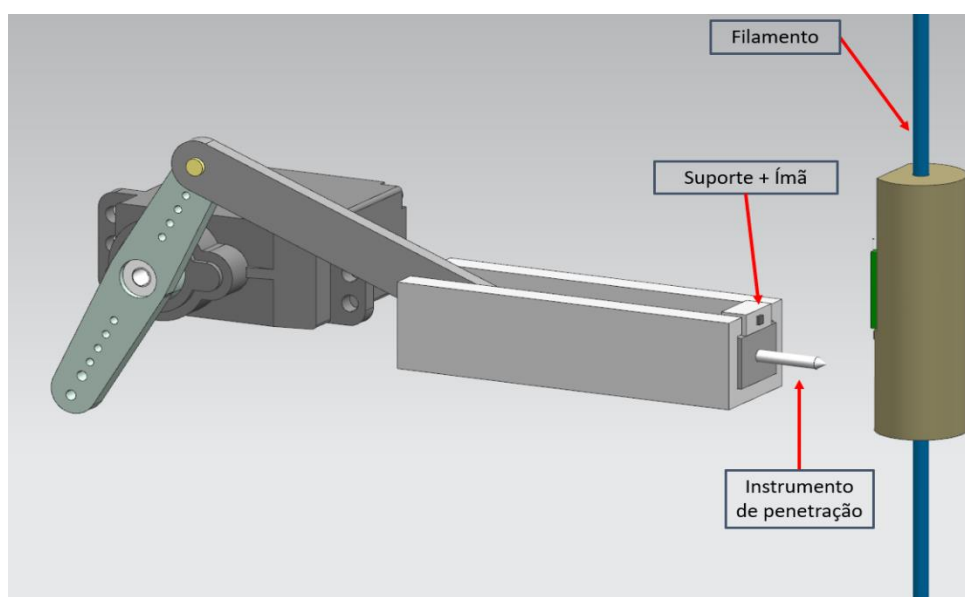
O mecanismo não avalia diretamente a dureza do material, mas sim de maneira indireta. A Figura 11 e a Figura 12 ilustram de maneira indicativa o sistema de modo geral, bem como os componentes que o fazem parte do mecanismo.

Figura 11 - Sistema proposto para medição indireta de dureza



Fonte: Autor (2021)

Figura 12 - Sistema proposto para medição indireta de dureza (vista frontal)



Fonte: Autor (2021)

O funcionamento do mecanismo ilustrado consiste na seguinte sequência:

- O servo motor é acionado com sentido horário de giro e ângulo pré-determinado;
- O movimento do servo faz com que a barra intermediária movimente o elo final pela guia linear no sentido do filamento;

- O instrumento de penetração (ponta metálica) é pressionado contra o filamento por 5 segundos;
- O sensor de efeito Hall mede a interação do campo magnético criado pelo ímã;
- O servo motor é acionado novamente com sentido anti-horário de giro para a posição inicial, encerrando o ciclo de medição.

Experimentalmente, pode-se comprovar que existe uma relação proporcional entre a distância do ímã e o sensor de efeito Hall com a intensidade do campo magnético medida por esse. Nesse sentido, se o material for mais duro, a ponta metálica irá penetrar menos no filamento, fazendo com que a distância entre sensor e ímã seja maior comparada a um material de dureza inferior.

Tal distância pode ser estimada determinando-se a relação de proporcionalidade entre ela e a intensidade do campo magnético. Tendo-se as distâncias de penetração para diferentes materiais, é possível diferenciá-los pela propriedade mecânica de dureza.

Todos os dados lidos pelos sensores serão obtidos e tratados através de uma placa do tipo ARDUINO, sendo que a guia linear, guia do filamento, barra intermediária e o suporte do ímã serão impressos utilizando PLA branco, com diâmetro de 1,75 mm. Os parâmetros básicos de impressão de todos os componentes podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros básicos de impressão utilizados nos componentes do sistema

Parâmetro de Impressão 3D	Valor
Velocidade de Extrusão	25 mm/s
Altura de camada	0,1 mm
Temperatura da mesa de Impressão	65 °C
Método de adesão à mesa	Brim

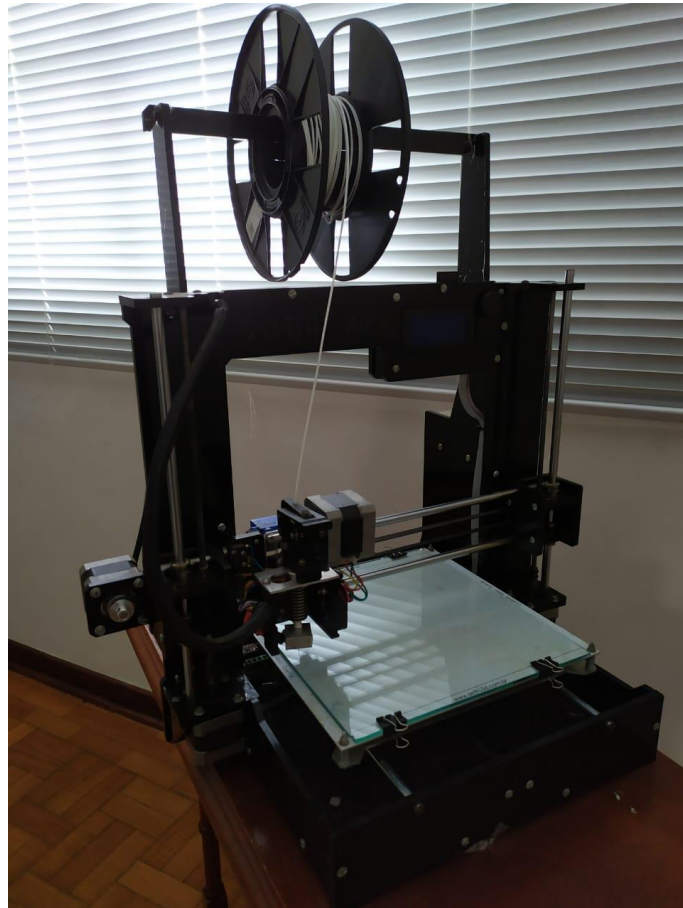
Fonte: Autor (2022)

Devido à intenção de medir-se a diferença entre os campos magnéticos gerados pela interação do sistema com os filamentos de PLA e ABS, suportada pelo deslizamento da barra na guia linear, é necessário reduzir ao máximo o atrito entre as peças. Portanto, a utilização de 0,1 mm para a altura de camada garante uma maior resolução aos componentes, reduzindo a

fricção no contato. A menor velocidade de extrusão justifica-se pelo tamanho pequeno e compacto do mecanismo como um todo, garantindo uma maior qualidade de impressão.

Todos os componentes manufaturados por impressão 3D foram feitos utilizando uma impressora da empresa Sethi, modelo AiP A3 (Figura 13).

Figura 13 - Impressora 3D Sethi AiP A3 utilizada para a manufatura das peças

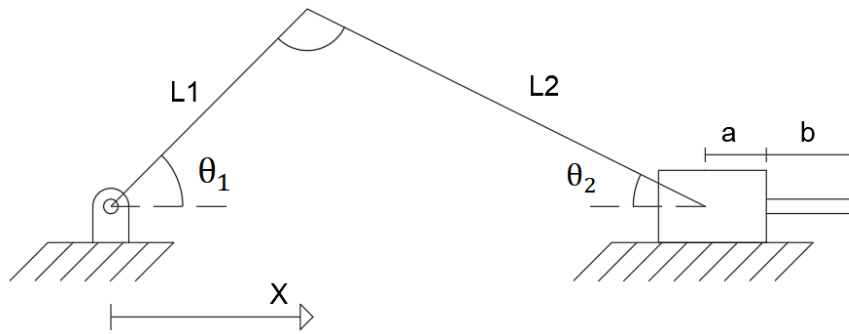


Fonte: Autor (2022)

3.3. Modelagem do Mecanismo Quatro Barras

No contexto da Engenharia Mecânica, o mecanismo quatro barras é uma solução muito utilizada para conversão de movimento circular em movimento linear. O sistema apresentado anteriormente trata-se de um quatro barras conhecido como “mecanismo biela-manivela” (Figura 14).

Figura 14 - Representação em 2D do mecanismo biela manivela adotado



Fonte: Autor (2021)

Para que seja possível conhecer a posição de cada componente do sistema, é necessário fazer a modelagem do mecanismo 4 barras. Os parâmetros utilizados para a modelagem, de acordo com a Figura 14, são:

- $L1$: comprimento do primeiro elo (servo motor), em mm (milímetros);
- $L2$: comprimento do segundo elo (barra intermediária), em mm;
- a : distância entre a junta de fixação e o início da ponta metálica, em mm;
- b : comprimento da ponta metálica, em mm;
- θ_1 : ângulo entre o primeiro elo e o eixo horizontal, em graus;
- θ_2 : ângulo entre o segundo elo e o eixo horizontal, em graus.

É de interesse saber qual a posição em x da ponta da agulha, para que sejam dimensionados os componentes utilizados. Para tal, deve-se encontrar as projeções, x_1 e x_2 dos elos de comprimento $L1$ e $L2$ no eixo horizontal, como mostrado nas Equações 1 e 2, respectivamente.

$$x_1 = L1 \cdot \cos \theta_1 \quad (1)$$

$$x_2 = L2 \cdot \cos \theta_2 \quad (2)$$

Portanto, a soma das Equações 1 e 2 dará a posição horizontal (X , em mm) da conexão do segundo elo com a guia linear, como pode ser observado na Equação 3.

$$X = L1 \cdot \cos \theta_1 + L2 \cdot \cos \theta_2 \quad (3)$$

Por fim, para obter-se a posição horizontal da ponta da agulha (P , em mm), basta somar o resultado da Equação 3 com a distância entre a junta de fixação e o início da ponta metálica (a) e o comprimento da ponta metálica (b). Tal descrição pode ser observada na Equação 4.

$$P = X + a + b \quad (4)$$

Para obter-se a relação entre os ângulos, analisa-se a projeção vertical do primeiro e do segundo elo. Pelo fato de ambos estarem interligados, tal projeção deve possuir o mesmo valor (Equação 5), ou seja:

$$L1 \cdot \text{sen } \theta_1 - L2 \cdot \text{sen } \theta_2 = 0 \quad (5)$$

Isolando o ângulo θ_2 na Equação 5, obtém-se a Equação 6.

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1} \left(\frac{L1 \cdot \text{sen } \theta_1}{L2} \right) \quad (6)$$

A partir do equacionamento realizado, será possível dimensionar o protótipo previamente para sua construção. A manufatura de todos os componentes será realizada através de impressão 3D, com exceção do servo motor e da ponta metálica. Os demais dados e resultados são obtidos de maneira experimental.

3.4. Elaboração do Circuito de Acionamento e Medição

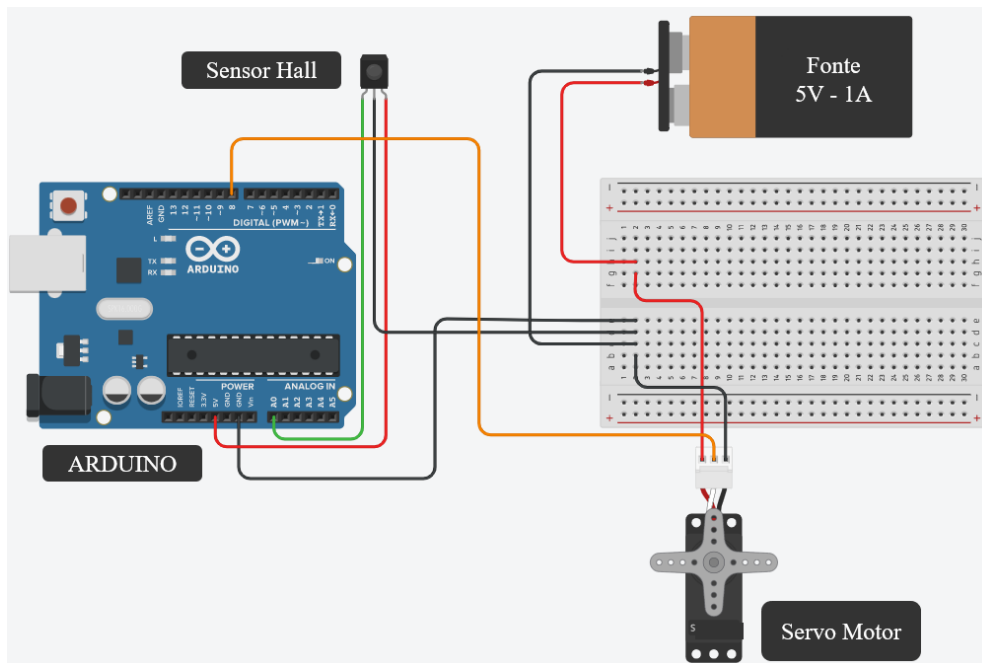
Para que seja possível realizar a movimentação do mecanismo quatro barras, será utilizado um controlador ARDUINO MEGA 2560. Para a alimentação do servo motor, modelo MG966R, faz-se necessária a utilização de uma fonte com tensão de 5 Volts (V) e corrente de 1 Ampère (A), uma vez que o servo receberá a carga da força de reação gerada pelo filamento polimérico, podendo consumir até 0,9 A de corrente, ao passo que o ARDUINO suporta uma corrente máxima total de 0,5 A quando ligado à porta USB do computador, tal como proposto.

A medição do campo magnético gerada por ímãs de neodímio, com 2 mm de diâmetro e 3 mm de espessura, será realizada por um sensor de efeito Hall linear, modelo KY-024. Em

relação ao instrumento de penetração, será utilizada uma ponta seca retirada de um compasso convencional.

O diagrama esquemático do circuito elétrico de acionamento e medição do sistema pode ser observado na Figura 15.

Figura 15: Diagrama esquemático do circuito de acionamento e medição



Fonte: Autor (2022)

Será utilizada uma protoboard para auxiliar na integração dos polos negativos (fios pretos) e positivos (fios vermelhos) da fonte de alimentação, servo motor, sensor hall e ARDUINO. O pino analógico do sensor será ligado à porta A0 do controlador, ao passo que o pino digital do servo motor será ligado na porta 8.

A lógica do acionamento do sistema e leitura é construída através da programação do controlador através da IDE (*Integrated Development Environment*) do ARDUINO. O código comentado pode ser encontrado no Apêndice A.

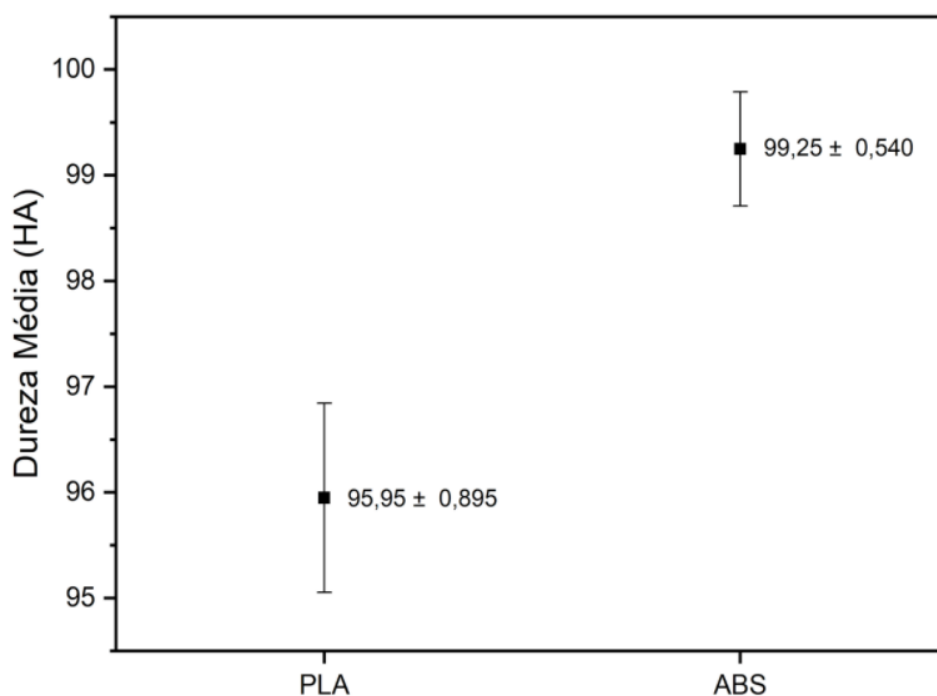
4. Resultados e Discussão

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos através da aplicação da metodologia proposta na construção do sistema de identificação dos filamentos de ABS e PLA. São descritos, primeiramente, os resultados da medição de dureza dos corpos de prova. Em seguida, a manufatura e construção do mecanismo. Por fim, são apresentadas as medições obtidas e a consequente diferenciação dos insumos de impressão 3D.

4.1. Comparação de Dureza de Corpos de Prova

Após empregada a metodologia de medição de dureza proposta nos corpos de prova de PLA e ABS, foi possível obter os resultados representados pelo gráfico da Figura 16.

Figura 16 – Valores de dureza medidos nos corpos de prova de ABS e PLA



Fonte: Autor (2021)

O diagrama mostra que existe uma diferença no valor de dureza medida para os filamentos. Enquanto o PLA teve dureza média (HA) de $95,95 \pm 0,895$ o ABS apresentou valores de $99,25 \pm 0,540$. Tal constatação é alinhada com a diferença apontada por Farbman e McCoy (2016), onde o ABS mostrou-se mais duro que o PLA na forma pura, porém divergente da informação fornecida pelo fabricante 3DLAB na forma de filamento.

4.2. Manufatura dos Componentes do Sistema de Aferição Indireta de Dureza

Após constatada a diferença de valores de dureza entre os filamentos de PLA e ABS, mostra-se viável a medição indireta da propriedade para identifica-los. Para tal, foram manufaturados em impressora 3D os componentes das Figuras 11 e 12, cujos desenhos técnicos podem ser verificados no Apêndice B.

A Figura 17 ilustra o primeiro elo a ser fixado no servo motor, o qual foi fabricado tendo comprimento total de 40 mm. O furo maior possui diâmetro de 6 mm, e os menores (ligados ao servo motor), 1,5 mm de diâmetro.

Figura 17 – Elo a ser fixado no servo motor



Fonte: Autor (2022)

A Figura 18 apresenta a barra intermediária que liga o servo motor à barra deslizante. O comprimento total é de 45 mm. Os furos possuem diâmetro de 6 mm e a distância entre eles é de 35 mm, ou seja, a cota $L2$ (comprimento do segundo elo).

Figura 18 – Barra intermediária com distância entre os furos $L2$



Fonte: Autor (2022)

Para que seja possível realizar o movimento desejado, é necessária uma barra deslizante que será utilizada em conjunto com a guia linear. No momento de construção do sistema, verificou-se maior viabilidade em acoplar o suporte do ímã à barra e o sensor de efeito Hall à guia linear, ao invés do suporte de filamento. Essa mudança de projeto em relação ao planejado (Figuras 11 e 12) mostrou-se eficaz tanto na montagem quanto no desenvolvimento e manufatura. A ponta metálica proposta para penetrar os filamentos é uma ponta seca retirada de um compasso convencional, com comprimento de 13 mm. A Figura 19 ilustra a barra deslizante e o suporte dos ímãs, os quais são ligados à guia linear e permitem a realização do movimento desejado. A peça tem comprimento total de 56 mm, sendo que a distância entre a junta de fixação e o início da ponta metálica (a) é de 50 mm.

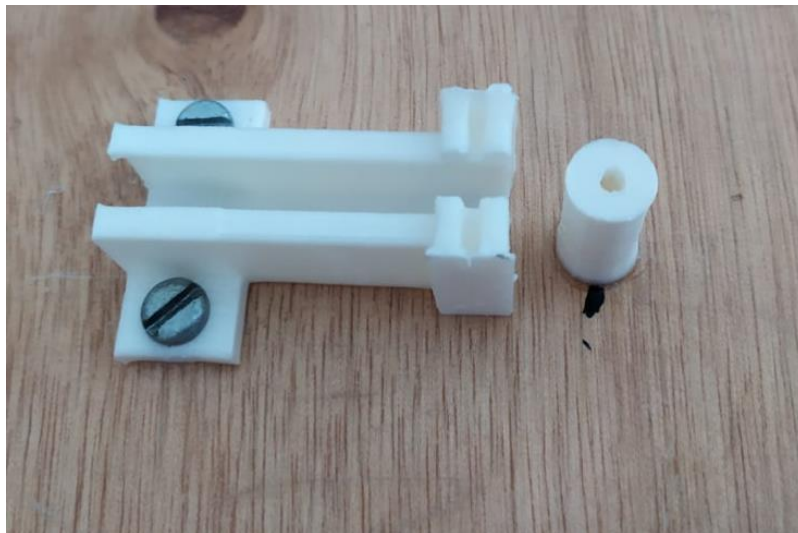
Figura 19 – Barra deslizante com suporte + ímãs + ponta metálica



Fonte: Autor (2022)

A guia linear que permite o deslizamento da barra deslizante. O componente possui comprimento total de 45 mm e contém 2 furos laterais de 4 mm, onde passam 2 parafusos M4 para fixação na base. Para fixar o sensor ao sistema, optou-se por imprimir dois pequenos suportes fixados à lateral guia, com uma abertura do meio de espessura 1,5 mm. Isso faz com que seja possível posicionar o sensor de efeito Hall no mecanismo através de um ajuste interferente, uma vez que esse possui uma espessura de 2 mm. Por fim, é necessário fabricar o suporte que fixará o filamento com a abertura alinhada ao movimento linear da ponta metálica, a peça tem altura de 20 mm, diâmetro de 10 mm, furo guia do filamento com diâmetro de 2,4 mm e abertura lateral para entrada da ponta metálica com diâmetro de 3 mm. A Figura 20 ilustra os componentes descritos.

Figura 20 – Guia linear, suportes do sensor de efeito Hall, guia do filamento e parafusos



Fonte: Autor (2022)

Para interligar as juntas rotativas, ou seja, o servo motor com a barra intermediária e essa última com a barra deslizante, foram utilizados parafusos para encadernação (Figura 21). Eles funcionam como pinos, mas que podem facilmente serem desmontados e possuem tamanhos dos mais variados. Para ligar o servo motor e a barra intermediária, foi usado um parafuso de diâmetro 5 mm e comprimento de 10 mm. Ao conectar a barra intermediária com a barra deslizante, foi utilizado o componente de diâmetro igual a 5 mm e comprimento de 14 mm.

Figura 21 – Parafusos de encadernação utilizados como pinos



Fonte: Autor (2022)

Por fim, com o objetivo de fixar o servo motor na bancada, foram impressas uma base e uma abraçadeira, que comportam dois parafusos M4 nas laterais para fixação na bancada, evitando movimentação relativa do componente em relação ao mecanismo quatro barras. O servo motor e as fixações descritas podem ser observados na Figura 22.

Figura 22 – Servo Motor, base de fixação, abraçadeira e parafusos



Fonte: Autor (2022)

4.3. Cálculo do Posicionamento dos Componentes

Após fabricadas as peças que irão compor o mecanismo, faz-se necessário o cálculo prévio do posicionamento na montagem para o correto funcionamento do sistema. Esse tipo de cálculo prévio à montagem e manufatura é conhecido como *Design For Assembly* (DFA). A Tabela 3 resume as dimensões dos elos do mecanismo quatro barras, tal como descrito na seção 3.3.

Tabela 3 – Resumo das dimensões do mecanismo quatro barras

Dimensão	Valor
$L1$	37 mm
$L2$	35 mm
a	50 mm
b	13 mm

Fonte: Autor (2022)

Aplicando um ângulo inicial de movimento (ponto metálica fora do filamento), θ_1 , no servo motor de 21° e substituindo os valores na Equação 6, tem-se a Equação 7.

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1} \left(\frac{37 \cdot \text{sen } 21}{35} \right) = 22,3^\circ \quad (7)$$

Logo, pode-se encontrar o valor da posição horizontal (X) da conexão do segundo elo com a guia linear substituindo os valores na Equação 3, obtendo-se a Equação 8.

$$X = 37 \cdot \cos 21 + 35 \cdot \cos 22,3 = 66,9 \text{ mm} \quad (8)$$

Portanto, é possível encontrar a posição inicial da ponta metálica substituindo o valor de X , a e b na Equação 4, obtendo-se a Equação 9.

$$P = 66,9 + 50 + 13 = 129,9 \text{ mm} \quad (9)$$

Repetindo-se o procedimento, é possível encontrar os mesmos posicionamentos para a posição final da ponta metálica, ou seja, quando essa está em contato direto com o filamento, tal como evidenciado pelas Equação 10, Equação 11 e Equação 12. Foi aplicado um ângulo da barra ligada ao servo motor (θ_1) de 10° .

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1} \left(\frac{37 \cdot \text{sen } 10}{35} \right) = 10,6^\circ \quad (10)$$

$$X = 37 \cdot \cos 10 + 35 \cdot \cos 10,6 = 70,8 \text{ mm} \quad (11)$$

$$P = 70,8 + 50 + 13 = 133,8 \text{ mm} \quad (12)$$

A Tabela 4 resume os parâmetros e posicionamentos estimados na posição inicial do sistema (ponta metálica fora do filamento) e posição final (ponta metálica em contato inicial com filamento).

Tabela 4 – Resumo do posicionamento estimado do sistema

Dimensão	Posição Inicial	Posição Final
θ_1	21°	10°
θ_2	$22,3^\circ$	$10,6^\circ$
X	66,9 mm	70,8 mm
P	129,9 mm	133,8 mm

Fonte: Autor (2022)

4.4. Montagem do Sistema em Bancada

Após manufaturados os componentes, faz-se necessária a correta montagem e posicionamento para o funcionamento do mecanismo. Para tal, foi utilizada uma tábua de madeira como bancada, servindo como base. A disposição das peças seguiu a lógica da Figura 11 e Figura 12, com a alteração da disposição do sensor Hall, suporte de ímã e formato da guia do filamento, como já explicado. A Figura 23 ilustra o mecanismo descrito.

Figura 23 – Montagem do mecanismo proposto pela Figura 11 e Figura 12

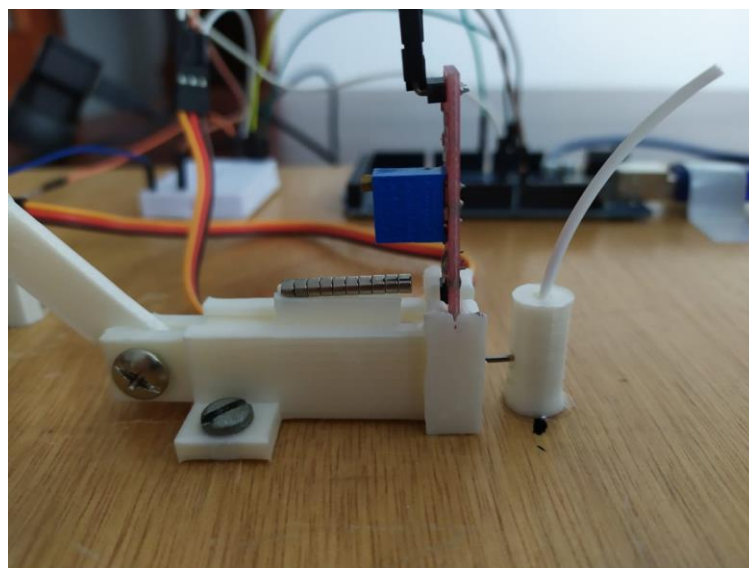


Fonte: Autor (2022)

Como fonte de energia, foi utilizado um carregador de celular convencional, que fornece uma tensão de 5 V e corrente de 1 A. Os polos positivos e negativos do fio foram soldados à *jumpers* comumente utilizados em aplicações com ARDUINO. Uma protoboard foi utilizada para centralizar a ligação do circuito elétrico, tal como demonstrado pela Figura 15.

O sensor de efeito Hall foi posicionado por ajuste interferente nos suportes laterais, logo à frente de 10 ímãs posicionados em série no suporte acima da barra deslizante. A guia do filamento foi fixada com cola do tipo Tek Bond, sem necessidade de parafusos, uma vez que o alinhamento da ponta metálica e a abertura lateral da guia foi garantido. A Figura 24 ilustra a disposição dos componentes mencionados.

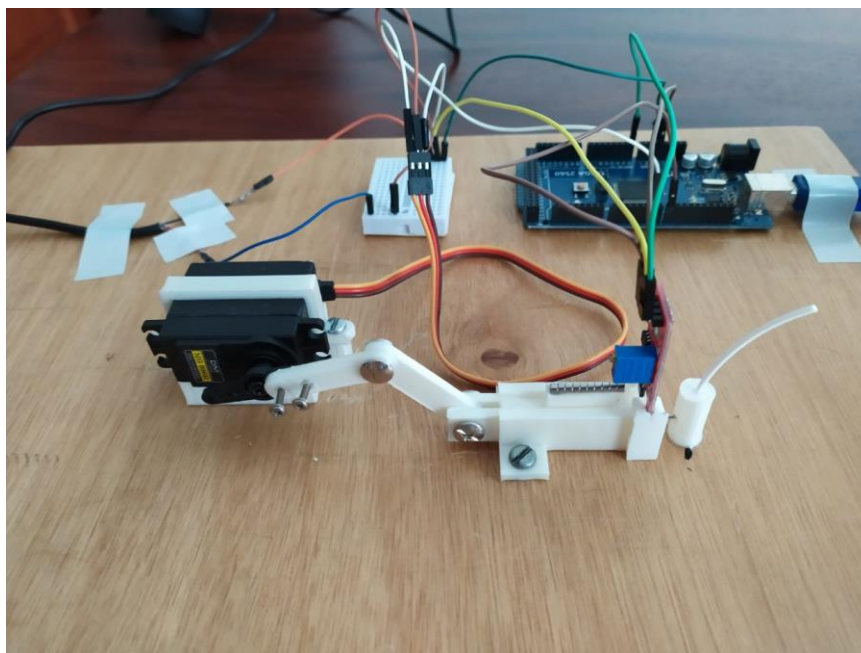
Figura 24 – Ampliação da região de medição do campo magnético



Fonte: Autor (2022)

A Figura 25 ilustra a montagem geral do sistema, mostrando todos os componentes.

Figura 25 – Visão geral do sistema de medição montado



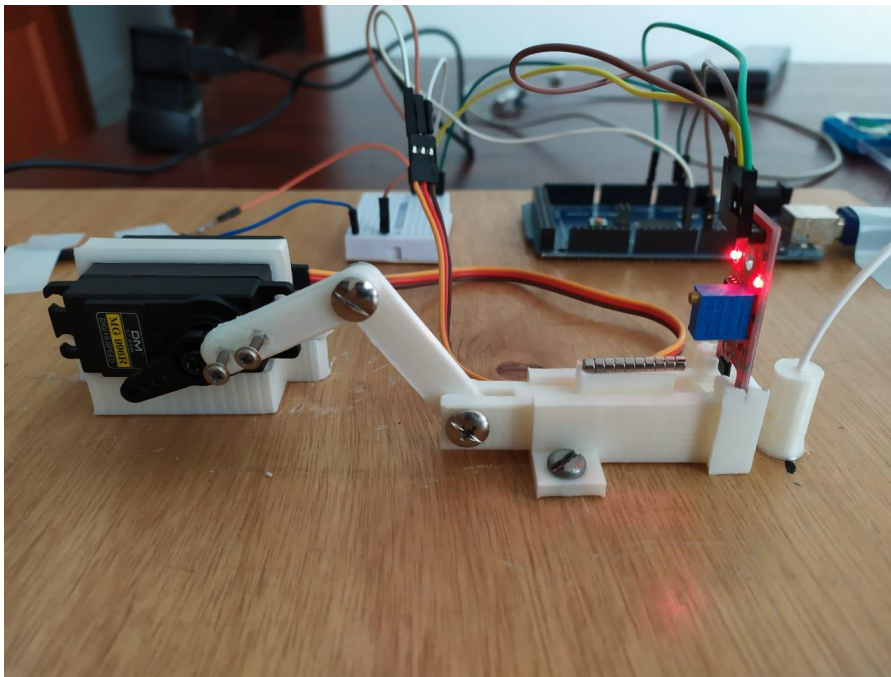
Fonte: Autor (2022)

4.5. Medição Indireta da Dureza dos Filamentos

Em posse do sistema montado e funcionando, foram colocadas uma amostra de PLA e ABS, ambas na cor branca e diâmetro de 1,75 mm, na guia do filamento. Os insumos utilizados são fabricados pela mesma empresa, 3D Fila, a fim de garantir uma comparação mais precisa e verificação da acurácia do mecanismo.

Ao ligar o ARDUINO ao computador e a fonte de energia à tomada, o posicionamento inicial do servo e, conseqüentemente, do ímã em relação ao sensor Hall são ilustrados na Figura 26, ou seja, antes da ponta metálica entrar em contato com o filamento.

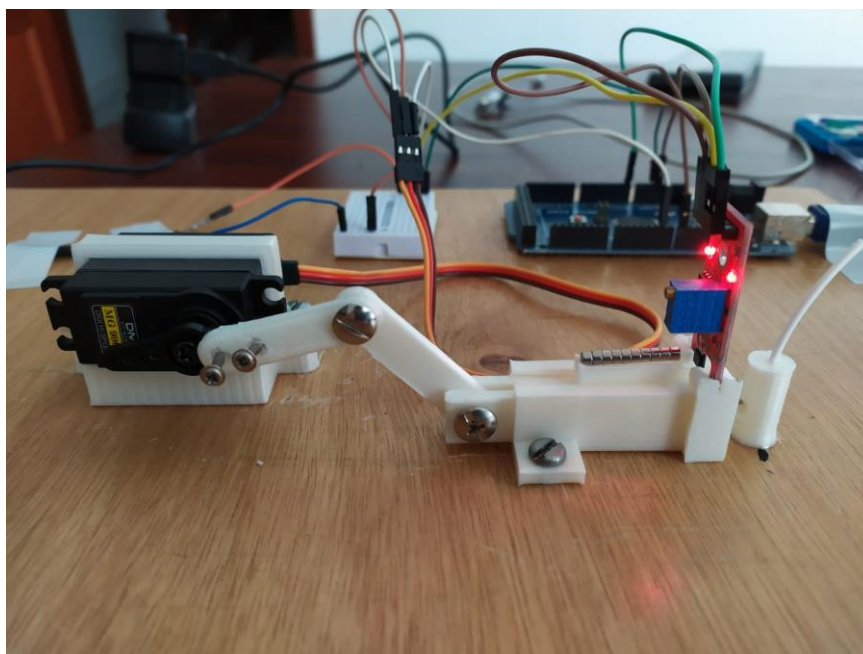
Figura 26 – Posição inicial do sistema de medição



Fonte: Autor (2022)

Na segunda fase da medição, o servo motor é configurado para avançar até o ângulo próximo de 180°, pressionando a ponta metálica contra o filamento e aproximando os ímãs do sensor Hall, tal como ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – Posição final do sistema de medição

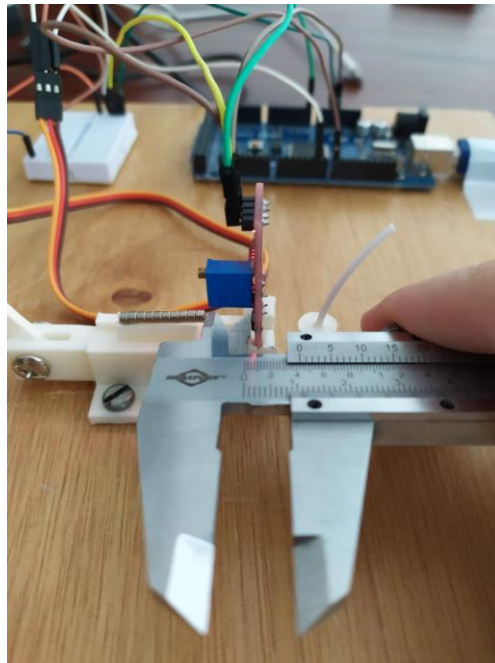


Fonte: Autor (2022)

4.6. Estimativa da Diferença de Profundidade de Penetração nos Filamentos

A fim de verificar o significado dos resultados obtidos, deve-se obter a relação entre a distância dos ímãs até o sensor Hall e o valor medido pelo pino analógico do ARDUINO, em Volts. Para tal, foram medidas, com o auxílio de um paquímetro com resolução de 0,02 mm, essas distâncias em diferentes posições para estabelecer uma curva aproximada que representa a resposta do sensor ao campo magnético, tal como ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – Procedimento de medição da relação entre distância do sensor ao ímã e leitura do pino analógico



Fonte: Autor (2022)

Realizadas as medições, foram obtidos os valores ilustrados na Tabela 6.

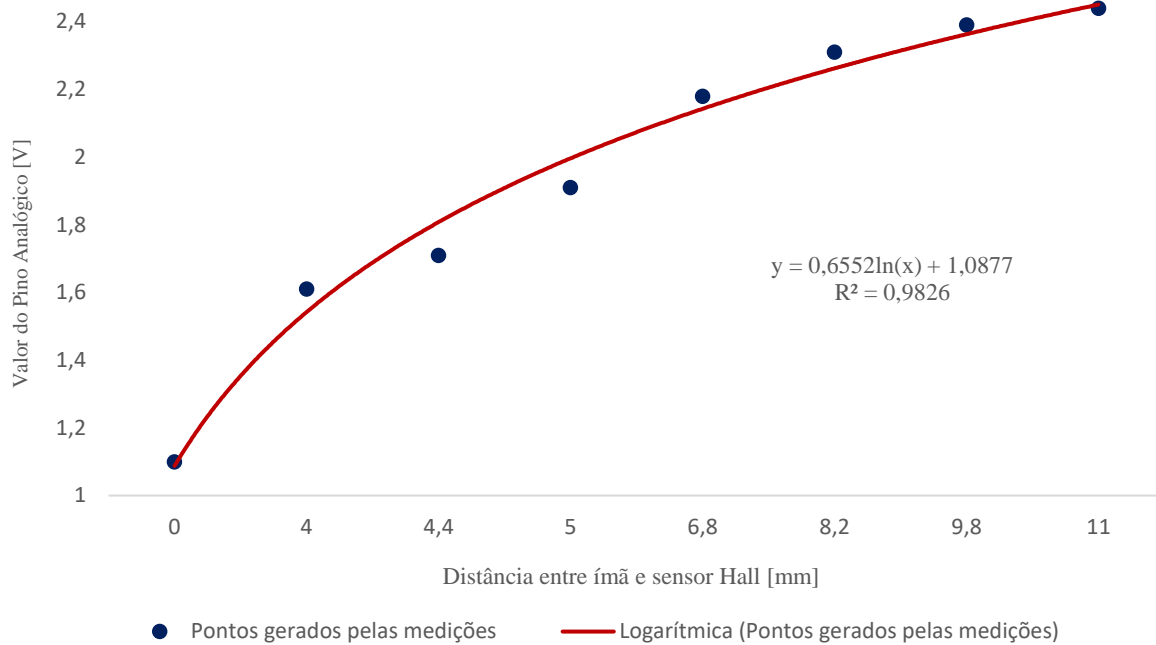
Tabela 6 – Resultados das medições de distância entre ímã e sensor Hall

Medição	1	2	3	4	5	6	7	8
Valor de leitura [V]	1,10	1,61	1,71	1,91	2,18	2,31	2,39	2,44
Distância [mm]	0,0	4,0	4,4	5,0	6,8	8,2	9,8	11,0

Fonte: Autor (2022)

A fim de visualizar os dados e fazer um ajuste de curva com o auxílio do Excel, foram plotados os dados da Tabela 6 e implementada uma linha de tendência dos pontos, tal como pode ser observado na Figura 30.

Figura 30 – Relação entre leitura do pino analógico e distância entre ímã e sensor Hall



Fonte: Autor (2022)

Através da análise do gráfico, é possível estabelecer uma relação logarítmica entre as duas grandezas, fato corroborado por um valor de R^2 igual a 0,9826, explicitando a forte correlação, a qual pode ser representada pela Equação 13, onde U é a tensão (em Volts) medida pelo pino analógico do ARDUINO e D a distância entre ímã e sensor Hall (em mm).

$$U = 0,6552 \ln D + 1,087 \quad (13)$$

Isolando-se o termo x , tem-se a Equação 14.

$$D = e^{\frac{U-1,0877}{0,6552}} \quad (14)$$

Substituindo os valores das medições encontrados para o ABS, de acordo com a Tabela 5, na Equação 14, tem-se a Equação 15, que resulta na distância entre o ímã e o sensor Hall, D_{ABS} (em mm).

$$D_{ABS} = e^{\frac{2,13-1,0877}{0,6552}} = 4,91 \text{ mm} \quad (15)$$

Substituindo os valores das medições encontrados para o PLA, de acordo com a Tabela 5, na Equação 14, tem-se a Equação 16, que resulta na distância entre o ímã e o sensor Hall, D_{PLA} (em mm).

$$D_{PLA} = e^{\frac{2,15-1,0877}{0,6552}} = 5,06 \text{ mm} \quad (16)$$

Logo, a diferença na profundidade de penetração da ponta metálica, $D_{PLA-ABS}$ (em mm), é dada pela Equação 17.

$$D_{PLA-ABS} = D_{PLA} - D_{ABS} = 0,15 \text{ mm} \quad (17)$$

Portanto, pode-se inferir que é possível diferenciar os dois insumos de impressão, ABS e PLA, através da medição indireta de dureza com o mecanismo proposto. Os resultados mostram que o filamento de PLA apresenta uma dureza maior que o ABS, uma vez que a ponta metálica teve uma penetração menor, evidenciada pela distância medida do ímã ao sensor de 5,06 mm frente aos 4,91 mm observados para o ABS. Tal resultado mostrou-se dentro do esperado, uma vez que as medições de dureza nos filamentos, de acordo com um dos fabricantes, previram maior resistência à penetração do PLA em relação ao ABS na forma de filamento.

No entanto, as medições nos corpos de prova mostraram o resultado oposto, alinhado às comparações de dureza da forma pura dos materiais. Tal variação pode ser explicada pela possibilidade da alteração das propriedades mecânicas do material após ser fundido no processo de impressão 3D dos corpos de prova e solidificado novamente em temperatura ambiente. Além disso, a disposição em camadas na manufatura pode contribuir para uma

interação distinta entre os corpos de prova e o durômetro utilizado, mesmo sendo aplicados parâmetros de impressão idênticos.

5. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Posteriores

Tendo como base os resultados obtidos na medição indireta da dureza nos filamentos de impressão 3D, ABS e PLA, podem ser destacadas, de maneira objetiva, as seguintes conclusões:

- É possível realizar a diferenciação entre os insumos de impressão de maneira prévia ao processo de manufatura a partir do mecanismo de baixo custo proposto;
- Os resultados de comparação de dureza medidos diretamente no filamento pelo sistema estão em linha com os dados fornecidos por um dos fabricantes de polímeros de impressão 3D;
- Os resultados da medição do sistema diretamente do filamento mostraram-se opostos aos obtidos na medição dos corpos de prova, muito provavelmente pela forma em que os materiais estavam dispostos na medição e alteração de características mecânicas após a manufatura, tornando os resultados semelhantes ao que a literatura relata da forma pura dos materiais.

Como evolução do presente Trabalho, pode-se reconstruir o sistema proposto utilizando peças fabricadas por meio de usinagem de materiais metálicos, a fim de reduzir folgas e imprecisões geométricas decorrentes do processo de manufatura aditiva. Além disso, um dos benefícios seria a maior precisão das medições pela redução do atrito entre componentes usinados.

É possível, também, aplicar um microcontrolador com maior resolução do conversor analógico digital. O ARDUINO possui capacidade de realizar medições a cada 5 mV, por ter resolução de 10 bits. Um microcontrolador com resolução de 12 bits, por exemplo, poderia fornecer informações mais precisas nas medições.

Além disso, é viável a integração do sistema com uma impressora 3D, visando fechar a malha do processo de identificação do filamento. Ou seja, antes de iniciar qualquer tipo fabricação, um sistema parecido acoplado à própria máquina poderia identificar o insumo de maneira prévia, através de parâmetros já estabelecidos. Após a identificação, alterações no *G-Code* da peça poderiam ser feitas de acordo com o tipo de material, ajustando automaticamente os parâmetros de impressão, evitando erros e falhas posteriores.

Referências

- 3D Printing Market with COVID-19 Impact Analysis by Offering (Printer, Material, Software, Service), Process (Binder Jetting, Direct Energy Deposition, Material Extrusion, Material Jetting, Powder Bed Fusion), Application, Vertical, Technology, and Geography - Global Forecast to 2026. **Markets and Markets**, 2021. Disponível em: <<https://tecnoblog.net/responde/referencia-site-abnt-artigos/>>. Acesso em: 12 de jan. de 2022.
- 3DLAB. **Como imprimir com filamento PLA**. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/como-imprimir-com-filamento-pla>>. Acesso em: 20 de março. de 2022.
- 3DLAB. **Ficha técnica PLA 3DLAB**. Disponível em: <<https://imagens.3dlab.com.br/wp-content/uploads/2021/09/Data-Sheet-Filamento-NYLON-3DLAB-1.pdf>>. Acesso em: 20 de março. de 2022.
- AHN, Sung-Hoon et al. **Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS**. Rapid prototyping journal, 2002.
- AROCA, Rafael et al. **Sistema para ajuste automático de máquinas de processo de manufatura de materiais plásticos por identificação de materiais**. Depositante: Universidade Federal de São Carlos. BR 10 2021 007758-1. Depósito: 23 de abril de 2021.
- BAUMANN, Felix; ROLLER, Dieter. **Vision based error detection for 3D printing processes**. In: MATEC web of conferences. EDP Sciences, 2016. p. 06003.
- BESKO, Marcos; BILYK, Claudio; SIEBEN, Priscila Gritten. **Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D**. Gestão, Tecnologia e Inovação: Revista Eletrônica dos Cursos de Engenharia, Curitiba, v. 1, n. 3, p. 9-18, 2017.
- CHEN, Grona et al. **Pharmaceutical applications of 3D printing**. Additive Manufacturing, v. 34, p. 101209, 2020.
- DELLI, Ugandhar; CHANG, Shing. **Automated process monitoring in 3D printing using supervised machine learning**. Procedia Manufacturing, v. 26, p. 865-870, 2018.
- FARBMAN, Daniel; MCCOY, Chris. **Materials testing of 3D printed ABS and PLA samples to guide mechanical design**. In: International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2016. p. V002T01A015.
- GIANNOPOULOS, Andreas A. et al. **Applications of 3D printing in cardiovascular diseases**. Nature Reviews Cardiology, v. 13, n. 12, p. 701-718, 2016.
- GRUNEWALD, S. J. **Autodesk SVP Jeff Kowalski: 3D Printing “Kind of Sucks Right Now”**. 3D Printing Industry. Outubro de 2014. Disponível em: <<http://3dprintingindustry.com/news/autodesk-svp-jeff-kowalski-3d-printing-kind-sucks-right-now-35127/>>.
- KIM, Chiyen et al. **A study to detect a material deposition status in fused deposition modeling technology**. In: 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2015. p. 779-783.

KLARMANN, A. **3D printing may have a larger impact than the internet.** All about 3D printing. Maio de 2015. Disponível em:< <https://all3dp.com/3d-printing-may-have-a-larger-impact-than-the-internet/>>.

KRASSENSTEIN, B. **Over 50% of All Homes to Have 3D Printers By 2030 - Market Worth \$70 Billion Annually.** 3Dprint.com. Fev/2014. Disponível em: <<https://3dprint.com/915/over-50-of-all-homes-to-have-3d-printers-by-2030-market-worth-70-billion-annually/>>

NACHAL, N. et al. **Applications of 3D printing in food processing.** Food Engineering Reviews, v. 11, n. 3, p. 123-141, 2019.

PARSEKIAN, Pedro Henrique Longo et al. **Failure monitoring and recovery system during manufacturing process.** IEEE Latin America Transactions, v. 18, n. 02, p. 407-413, 2020.

RAO, Prahalad K. et al. **Online real-time quality monitoring in additive manufacturing processes using heterogeneous sensors.** Journal of Manufacturing Science and Engineering, v. 137, n. 6, 2015.

RODRIGUES, Vinícius Picanço et al. **Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações.** Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas, v. 12, n. 3, p. 1, 2017.

SHIMANO, Marcos Massao et al. **Influência do percentual de preenchimento no comportamento mecânico de peças em PLA e ABS obtidas por Impressão 3D por extrusão.** Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação, v. 3, n. 2, p. 178-190, 2019.

TLEGENOV, Yedige; HONG, Geok Soon; LU, Wen Feng. **Nozzle condition monitoring in 3D printing.** Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, v. 54, p. 45-55, 2018.

WITTBRODT, Ben T. et al. **Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers.** Mechatronics, v. 23, n. 6, p. 713-726, 2013.

Apêndice A – Código Utilizado na IDE do ARDUINO

```
#include <VarSpeedServo.h> // inclusão da biblioteca

VarSpeedServo servo;// criando objeto apartir da biblioteca

int pinoAnalogico = A0; //PINO ANALÓGICO SENSOR HALL (MEDE A INTENSIDADE DO
CAMPO MAGNÉTICO)

int pinoDigital = 8; //PINO DIGITAL SENSOR HALL (DETECTA A PRESENÇA DO CAMPO
MAGNÉTICO)

void setup (){

    servo.attach(6); //Servo motor no pino 6

    servo.write(140); //Posição Inicial do Servo

    pinMode(pinoAnalogico, INPUT); //DEFINE O PINO SENSOR HALL COMO
ENTRADA

    pinMode(pinoDigital, INPUT); //DEFINE O PINO SENSOR HALL COMO ENTRADA

    Serial.begin(9600); //INICIALIZA O SERIAL

}

void loop (){

//Servo Motor

//A velocidade varia de 0 a 255 onde 0 é parado e 255 maximo

    servo.slowmove(120, 60); //posição, velocidade

    delay (5000);// tempo de espera

//SENSOR HALL

    Serial.print("Intesidade do campo magnético(Pino A0): "); //IMPRIME
O TEXTO NO MONITOR SERIAL

    Serial.print(analogRead(pinoAnalogico) * (5.0 / 1023.0)); //IMPRIME
NO MONITOR SERIAL UM VALOR DE TENSÃO QUE REPRESENTA A INTENSIDADE DO CAMPO
MAGNÉTICO
```

```

Serial.println("V"); //IMPRIME O TEXTO NO MONITOR SERIAL

Serial.print("Detecção do campo magnético(Pino D8): "); //IMPRIME O
TEXTO NO MONITOR SERIAL

if(digitalRead(pinoDigital) == HIGH){

    Serial.println("Detectado"); //IMPRIME O TEXTO NO MONITOR SERIAL

}else{

    Serial.println("Não detectado"); //IMPRIME O TEXTO NO MONITOR
SERIAL

}

Serial.println("-----"); //IMPRIME O TEXTO NO MONITOR SERIAL

//Servo Motor

servo.slowmove(147, 20); //posição, velocidade

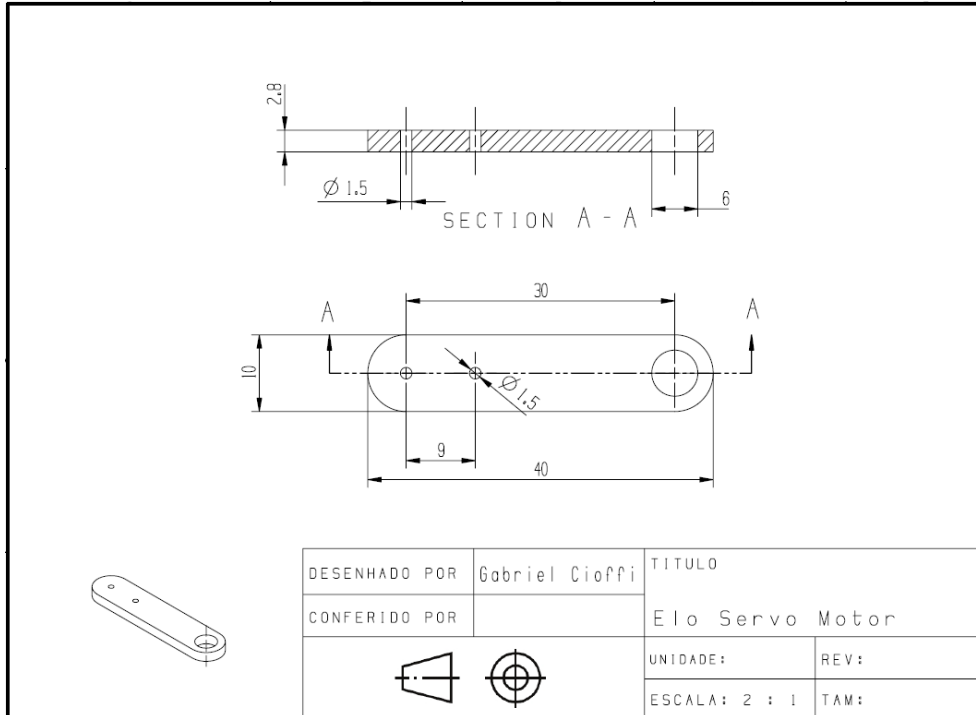
delay (4000); // tempo de espera

}

```

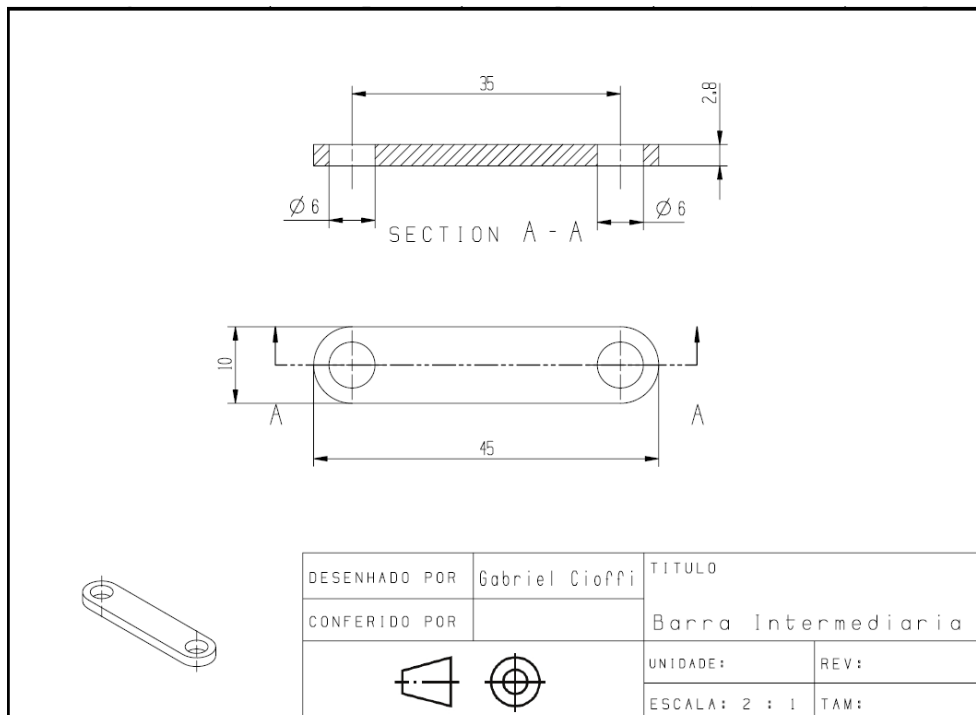
Apêndice B – Desenho Técnico dos Componentes Fabricados

Figura B.1 – Desenho técnico do Elo ligado ao servo motor



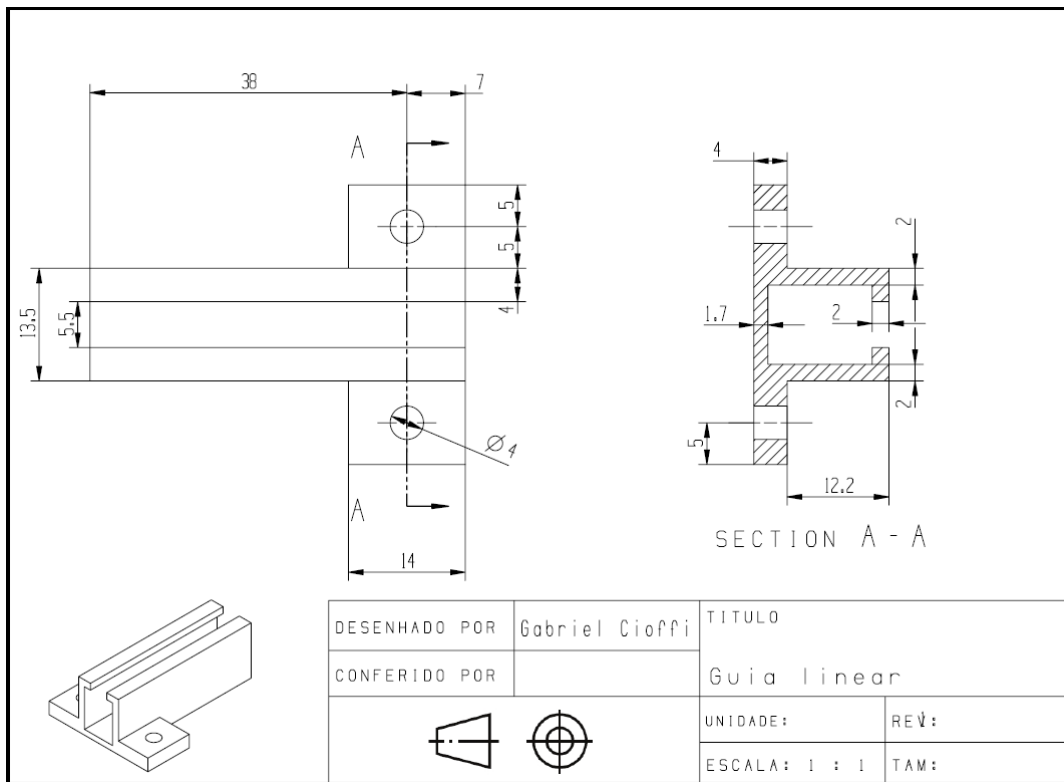
Fonte: Autor (2022)

Figura B.2 - Desenho técnico da barra intermediária



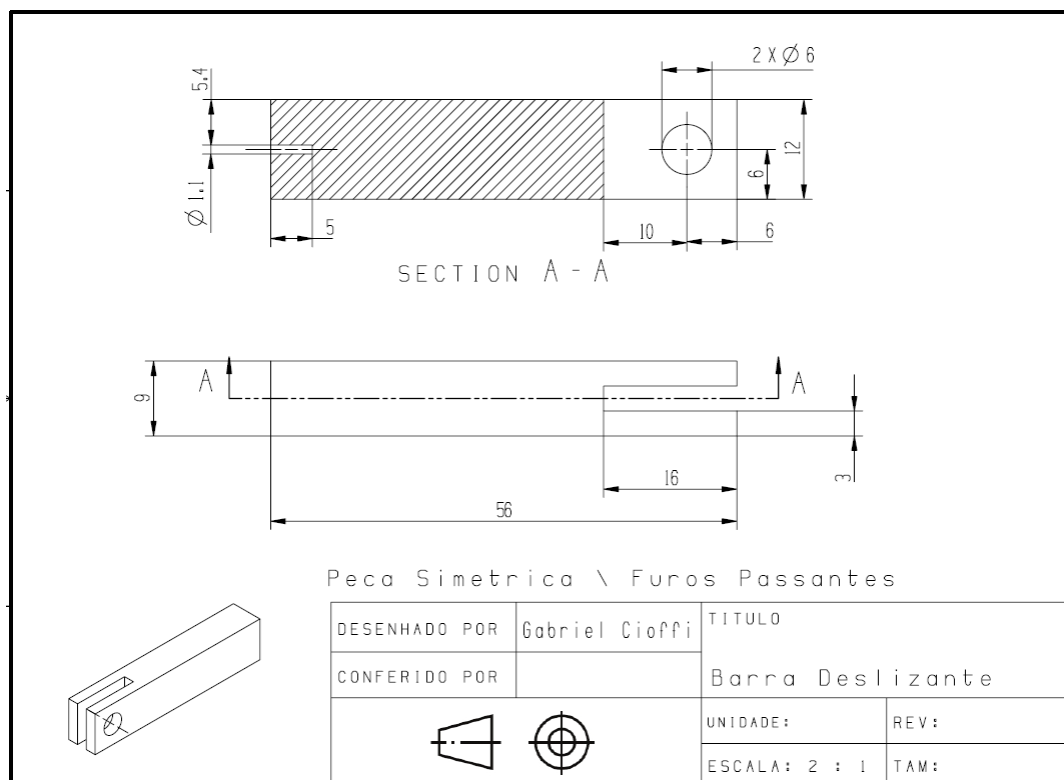
Fonte: Autor (2022)

Figura B.3 - Desenho técnico da guia linear



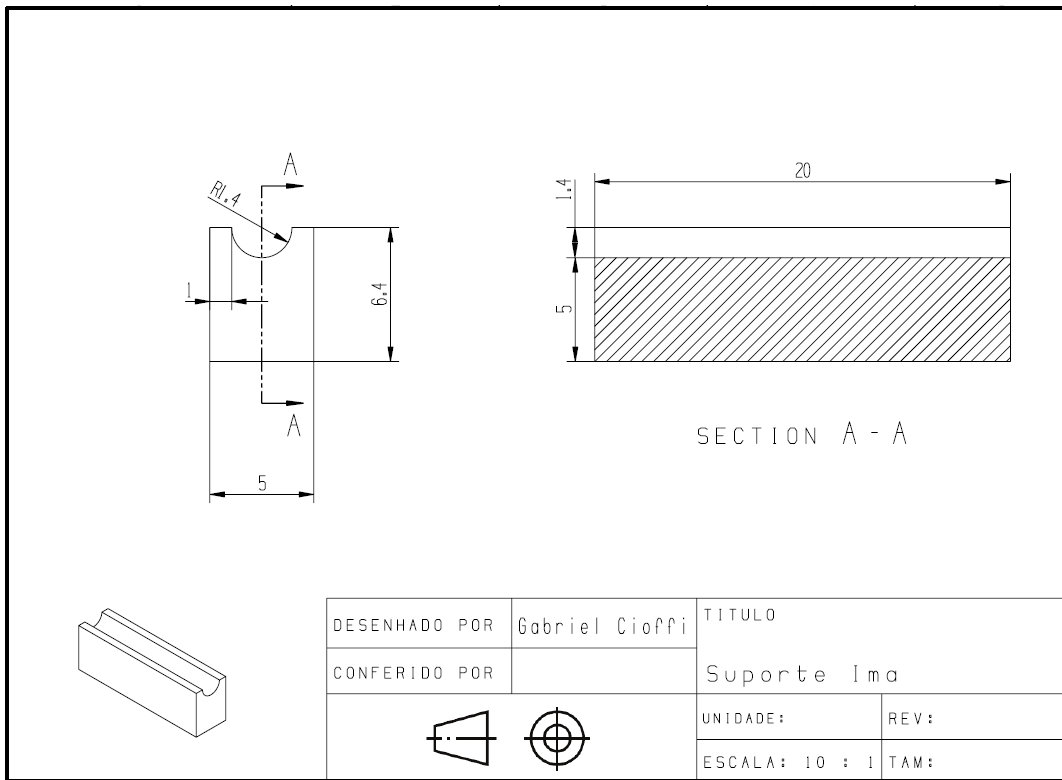
Fonte: Autor (2022)

Figura B.4 - Desenho técnico da barra deslizante



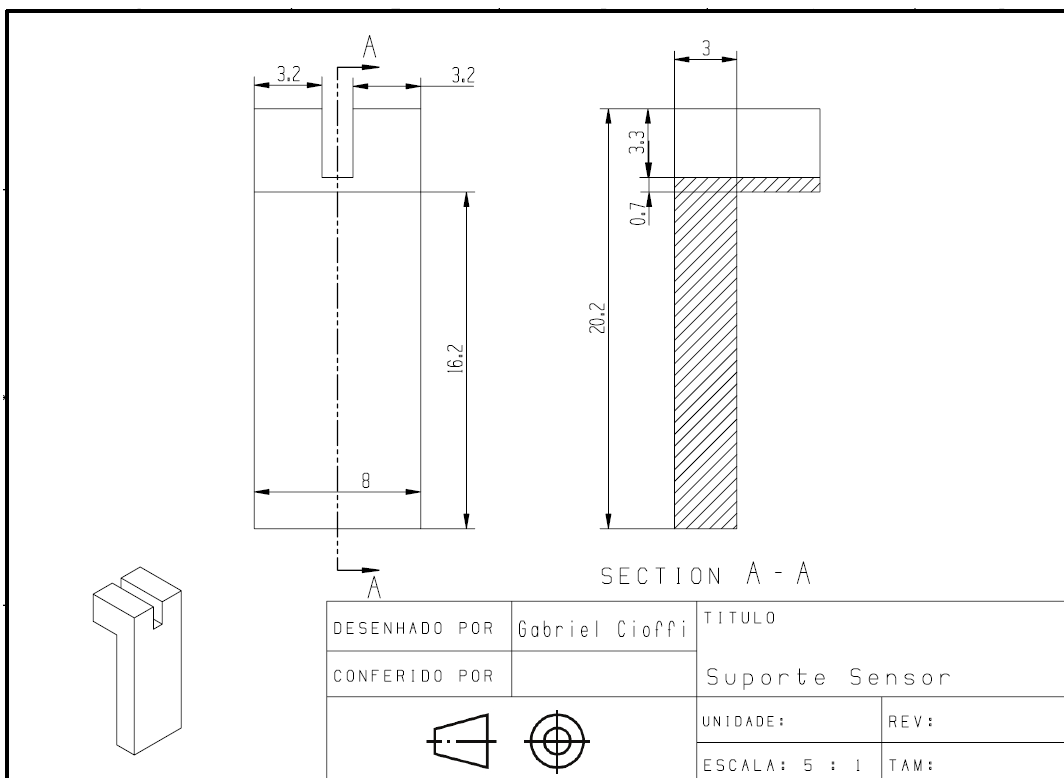
Fonte: Autor (2022)

Figura B.5 - Desenho técnico do suporte dos ímãs



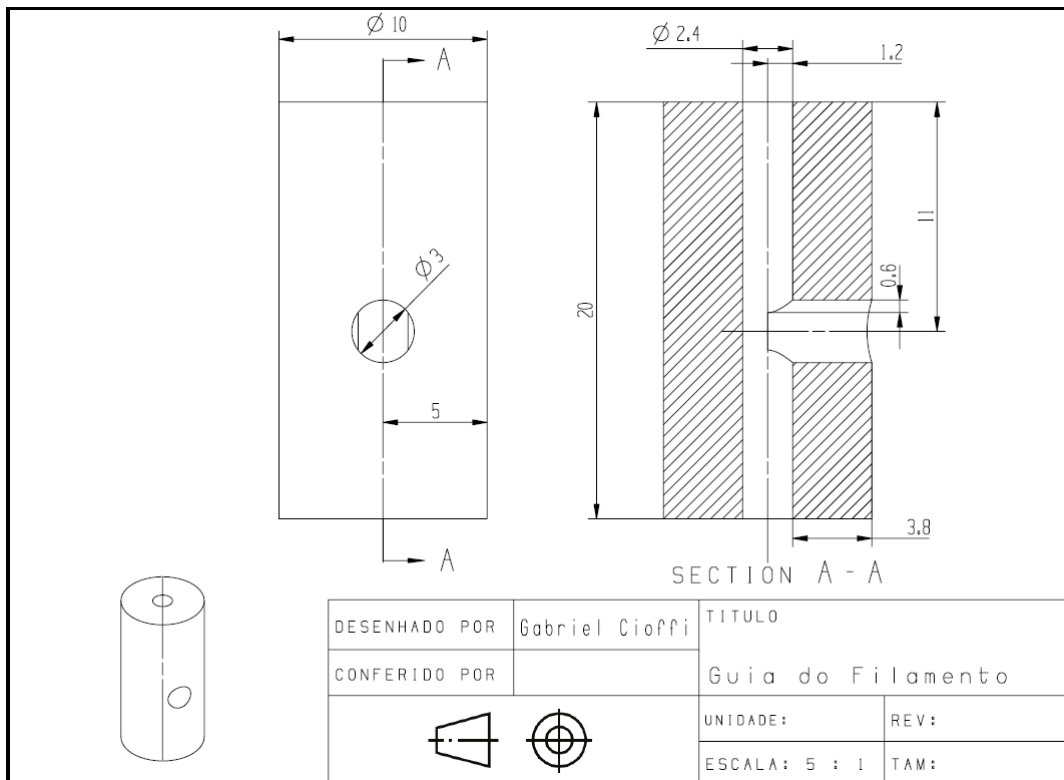
Fonte: Autor (2022)

Figura B.6 - Desenho técnico do suporte do sensor Hall



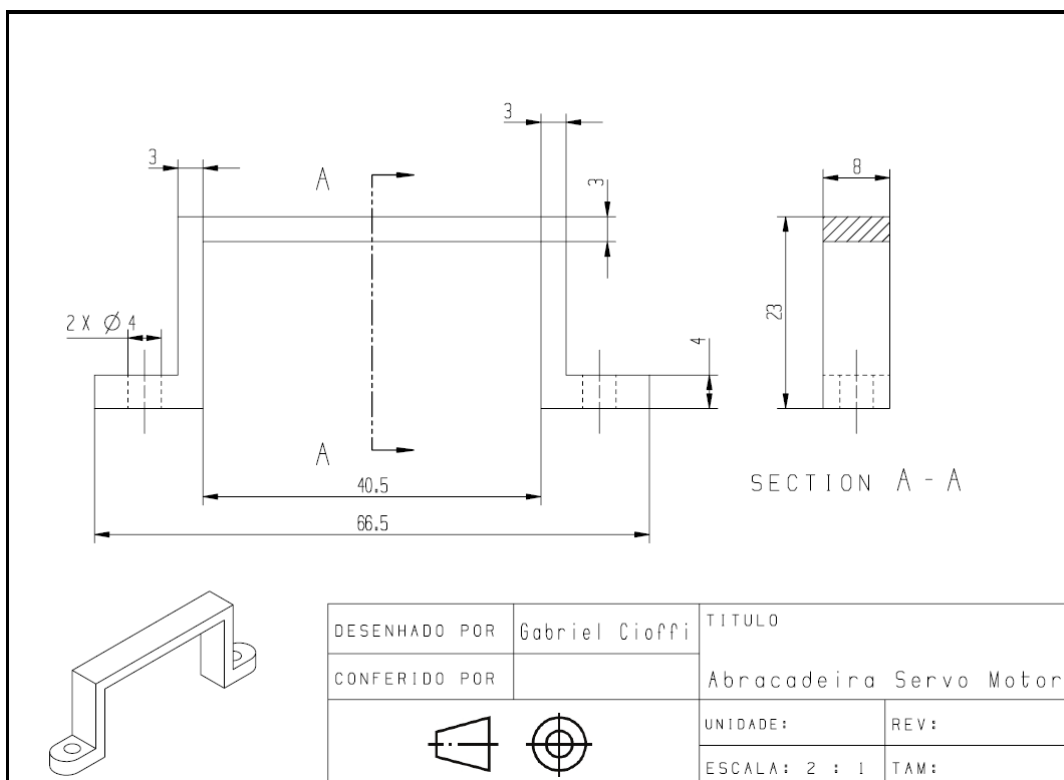
Fonte: Autor (2022)

Figura B.7 - Desenho técnico da guia do filamento



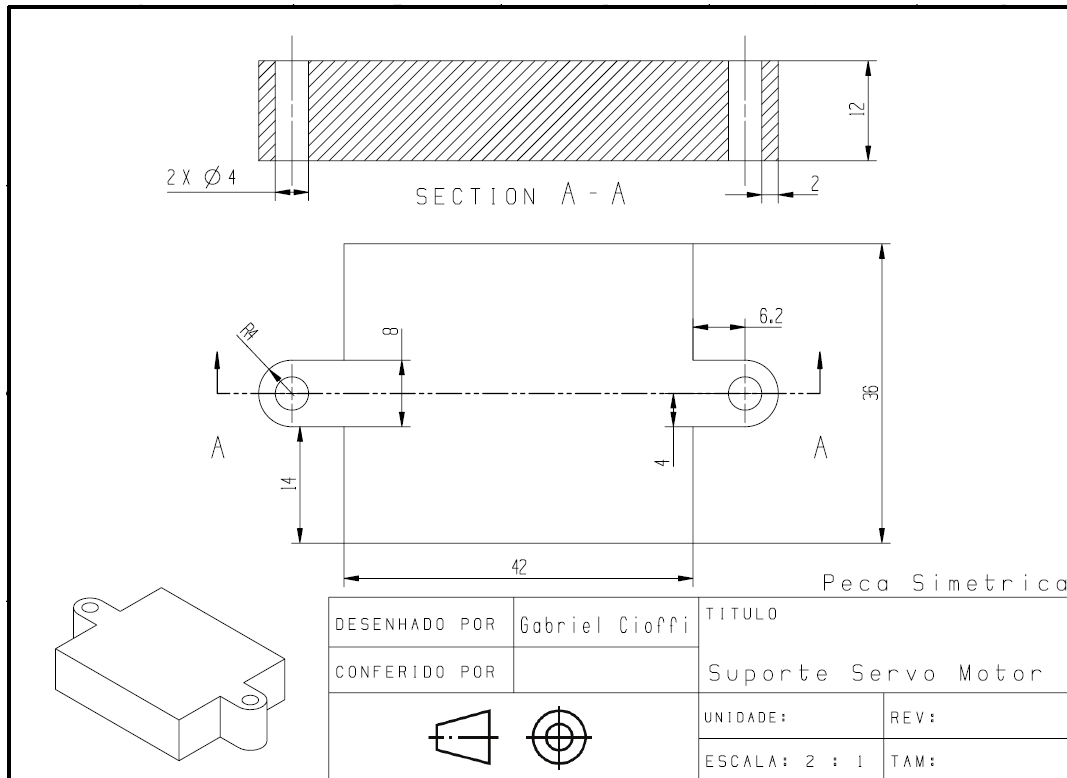
Fonte: Autor (2022)

Figura B.8 - Desenho técnico da abraçadeira do servo motor



Fonte: Autor (2022)

Figura B.9 - Desenho técnico do suporte do servo motor



Fonte: Autor (2022)