



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CÂMPUS DE CRATEÚS**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**JOSÉ JAILSON DE OLIVEIRA SAMPAIO**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPO DE VISCOSÍMETRO  
ROTACIONAL DE BAIXO CUSTO BASEADO EM IMPRESSÃO 3D E ARDUINO**

**CRATEÚS**  
**2022**

JOSÉ JAILSON DE OLIVEIRA SAMPAIO

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPO DE VISCOSÍMETRO  
ROTACIONAL DE BAIXO CUSTO BASEADO EM IMPRESSÃO 3D E ARDUINO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de graduado em Engenharia Civil.  
Área de concentração: Mecânica dos Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Vagner de Lima.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S183d Sampaio, José Jailson de Oliveira.  
Desenvolvimento e Avaliação de Protótipo de Viscosímetro Rotacional de Baixo Custo Baseado em Impressão 3D e Arduino / José Jailson de Oliveira Sampaio. – 2022.  
103 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Sandro Vagner de Lima.

1. Diretrizes Curriculares Nacionais. 2. viscosidade. 3. reômetro. I. Título.

CDD 620

---

JOSÉ JAILSON DE OLIVEIRA SAMPAIO

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPO DE VISCOSÍMETRO  
ROTACIONAL DE BAIXO CUSTO BASEADO EM IMPRESSÃO 3D E ARDUINO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
banca examinadora da Universidade Federal do  
Ceará como requisito parcial à obtenção do  
título de graduado em Engenharia Civil.  
Área de concentração: Mecânica dos Fluidos.

Aprovado em: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Sandro Vagner de Lima (orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Ao Criador.

A meu saudoso avô Sebastião Cesário.

A meus irmãos Hugo e Joelson Sampaio, minha  
primeira linha de lealdade.

## AGRADECIMENTOS

Serei eternamente grato a cada um dos que contribuíram para a realização deste trabalho, dentre os quais destaco Landson Almeida e Airton Silva por suas contribuições fundamentais sobre a utilização da plataforma *Arduino* e impressão 3D.

A meu orientador, Dr. Sandro Lima, não há palavras que possam expressar a gratidão que lhe tenho não apenas por sua excelente orientação e paciência apresentada em meio a tantas tarefas por cumprir, mas sobretudo por seu cativante amor pelo ensino e inspiração acadêmica.

Especialmente, sou grato a Gerlândia Alves pelo apoio recebido durante os últimos anos da graduação, quando a conheci (quisera tê-lo feito antes), e por gentilmente me receber em sua casa durante a pesquisa.

Sou imensamente grato a Marília Tavares e Gabriela Rodrigues pela amizade, apoio e carinho que recebi nos momentos de desânimo, o que foi fundamental para que continuasse tentando mesmo quando as coisas não pareciam funcionar. Vocês foram meus anjos da guarda.

José Mota, Zilda Chaves, Felipe Sousa, Daniele Saboia, Jenilson Rodrigues, Isadora Sena e Carolina Mesquita permearam essa jornada de momentos agradáveis e tornaram-na não apenas suportável, mas em certa medida empolgante e divertida. Por isso, muito obrigado pelo privilégio de poder dividir um planeta e uma época convosco.

Meu eterno agradecimento, amor e lealdade a meu pai, Jaime Sampaio, meus irmãos Hugo e Joelson Sampaio e, por extensão, a Elias Melo e Adriano Sousa pelo apoio e companheirismo. Essa conquista é também sua.

Meu carinho e gratidão se estendem a Egberto Farias e Gonçalo Lima, grandes amigos e contabilistas exemplares, a quem devo muito pelo apoio recebido e pelos ensinamentos sobre a vida e os negócios; e a Sefora Bezerra (da Silva) por sua generosidade e alegria contagiante que sempre demonstra quando nos encontramos.

Por fim, a maior gratidão que tenho é por Gabriella Martins, quem eu sempre tive, por certeza, como sendo o instrumento usado por Deus para me colocar no caminho que me trouxe até onde chego e sem a qual nenhuma dessas palavras estaria sendo escrita.

Quanto ao mais, se de alguém esqueço peço que me perdoe. É que resolvi dar folga aos meus neurônios depois de trabalho tão árduo e de perceber que era inútil tentar domesticar as formigas do banheiro do meu apartamento, ainda que tenha punido as subversivas que claramente buscavam perverter as demais – foi nesse ponto que notei que eles realmente estavam precisando de umas boas férias, às expensas da casa.

Não é que tenhamos um curto espaço de tempo para viver, mas o desperdiçamos demais. A vida é longa o bastante e foi concedida em medida suficientemente generosa para permitir a realização de coisas maiores, se o tempo for bem investido. Mas quando é desperdiçado no luxo e no descuido, quando não é dedicado a bons fins, finalmente forçados pela necessidade última, percebemos que ele passou antes de sabermos que estava passando. (SÊNECA)

## RESUMO

A engenharia é, sem dúvida, uma das áreas mais importantes da ciência ligadas à produção e aplicação de novos conhecimentos. Por conta disso, requer-se do engenheiro uma atuação cada vez mais dinâmica e completa, sendo necessário que os alunos egressos dos cursos de engenharia tenham desenvolvido e/ou aprimorado, durante a graduação, aptidões fundamentais para seu sucesso acadêmico e profissional. Para isso é necessário a aplicação de uma metodologia de ensino que relaciona intimamente teoria e atividades experimentais, fazendo-se uma associação adequada, clara e bem delimitada. Isso requer, no entanto, a aquisição de bons equipamentos de laboratório, o que nem sempre é possível devido ao alto custo dos instrumentos ou por um processo de aquisição burocrático, podendo-se citar, por exemplo, o aparelho que serve para medir a viscosidade de fluidos, chamado de viscosímetro (ou reômetro), que pode chegar a custar cerca de R\$25.000,00. A viscosidade é uma propriedade de grande importância na determinação da qualidade de materiais utilizados em processos industriais, como óleos e tintas, garantindo sua correta aplicação. Com base no que estabelecem as novas DCNs dos cursos de engenharia este trabalho propõe a criação de um modelo de viscosímetro rotacional de baixo custo que atenda às necessidades acadêmicas do Câmpus da Universidade Federal do Ceará (UFC) em Crateús, lançando mão de conceitos de impressão 3D e automação por meio da plataforma *Arduino*. Para avaliação do protótipo desenvolvido foram analisadas as limitações do modelo construído e das técnicas empregadas na sua construção, sobretudo no que diz respeito ao tipo de modelagem empregada e a influência desta na resistência do material utilizado para impressão, a precisão e aplicabilidade de atuadores empregados na leitura das variáveis experimentais, além da análise dos resultados dos ensaios de viscosidade utilizando azeite de oliva, óleo de motor e glicerina, onde se obteve medidas de viscosidade com erro inferior a 8% nos dois primeiros casos e, para este último, por haver maior dificuldade em controlar a temperatura de fluidos mais viscosos durante os ensaios, o erro foi de 28%. O custo de construção do protótipo foi de cerca de 1,2% do valor necessário para aquisição do modelo comercial. Com base nos resultados dos ensaios de viscosidade e do custo de construção do dispositivo, concluiu-se que a impressão 3D e a plataforma *Arduino* podem ser ferramentas úteis na construção de protótipos de baixo custo empregados em atividades experimentais cuja finalidade seja a aplicação de conhecimentos teóricos em atividades práticas e a observação de fenômenos físicos.

**Palavras-chave:** Diretrizes Curriculares Nacionais; viscosidade; reômetro.



## ABSTRACT

Engineering is, undoubtedly, one of the most important areas of science associated with the production and application of new knowledge. For this reason, the professional field increasingly demands an engineer with a more dynamic and complete performance. Therefore, it is necessary for the graduated engineer to have developed and/or improved, during graduation, fundamental skills for their academic and professional success. For this, it is essential to apply a teaching methodology that closely relates theory and experimental practices, in an adequate, clear and well-defined way. This requires, however, the acquisition of good laboratory equipment, which is not always possible due to the high cost of the instruments or a bureaucratic acquisition process. For example, a device used to measure the viscosity of fluids, a property of great importance in determining the quality of materials used in the oil and paint industry, may cost around R\$25,000.00. Based on what the new DCNs of engineering courses establish this work proposes the creation of a low-cost rotational viscometer model, using concepts of 3D printing and automation through the *Arduino* platform, in order to solve academic needs of the Federal University of Ceará (UFC) located in the city of Crateús. In order to evaluate the developed prototype, the limitations of the model and the techniques used in its 3D construction were analyzed, as well as their influence on the resistance of the material used for printing, the precision and applicability of actuators used in the reading of experimental variables, and viscosity tests were performed using olive oil, motor oil and glycerin. The results showed that the developed device is capable of performing viscosity measurements with an error of less than 8%; for the latter, as it was more difficult to control the temperature of more viscous fluids during the tests, the error was 28%. The construction cost of about 1.2% of the value needed to acquire the commercial model. Based on the results of the viscosity tests and the cost of building the device, it was concluded that 3D printing and the *Arduino* platform can be useful tools in the construction of low-cost prototypes, with the potential to be used in experimental activities whose purpose is the application of theoretical knowledge in practical activities and the observation of physical phenomena.

**Keywords:** Diretrizes Curriculares Nacionais; viscosity; rheometer.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Deslocamento da camada fluida entre os cilindros.....	24
Figura 2 - Tensão de cisalhamento por taxa de deformação .....	26
Figura 3 - Viscosímetros Cannon-Fenske, Höppler e Gilmont .....	27
Figura 4 - Reômetro rotacional.....	28
Figura 5 - Placa Arduino Uno R3.....	29
Figura 6 - Tela principal da IDE do Arduino .....	29
Figura 7 - Torque.....	30
Figura 8 - Rotação do elemento.....	31
Figura 9 - Ponte de Wheatstone.....	33
Figura 10 - Posicionamento dos extensômetros .....	34
Figura 11 - Encoder Lm393.....	35
Figura 12 - Regiões onde são produzidas forças de cisalhamento .....	36
Figura 13 - Elemento de espessura infinitesimal (vista lateral).....	37
Figura 14 - Elemento de espessura infinitesimal (vista inferior).....	38
Figura 15 - Perfil de velocidade entre as bases dos cilindros .....	38
Figura 16 - Região de comportamento particular da camada fluida.....	40
Figura 17 - Deslocamento de elemento infinitesimal.....	42
Figura 18 - Fluxograma de construção do modelo .....	44
Figura 19 - Projeto dos cilindros e do disco para leitura da rotação (AutoCAD) .....	45
Figura 20 - Estrutura de encaixe.....	46
Figura 21 - Modelo tridimensional do dispositivo de encaixe .....	47
Figura 22 - Componentes do suporte dos cilindros e dispositivos auxiliares.....	48
Figura 23 - Montagem do protótipo .....	49
Figura 24 - Suportes para a placa Arduino (esquerda) e protoboard (direita).....	50
Figura 25 - Modelagem tridimensional dos componentes do protótipo.....	51
Figura 26 - Representação tridimensional do viscosímetro.....	51
Figura 27 - Fatiamento do cilindro interno.....	52
Figura 28 - Vetores deslocamento e força e o ângulo entre eles .....	53
Figura 29 - Conexão do encoder à placa Arduino .....	55
Figura 30 - Conexão da célula de carga/módulo HX711 à placa Arduino.....	56
Figura 31 – Projeto do dispositivo auxiliar de calibração da célula de carga .....	57

Figura 32 - Deflexão da célula de carga para diferentes distribuições de carga .....	58
Figura 33 - Funcionamento do algoritmo para obtenção da medida de massa.....	58
Figura 34 - Modelo preliminar do suporte do viscosímetro .....	61
Figura 35 - Principais falhas do modelo preliminar construído .....	62
Figura 36 - Modelo intermediário do suporte do viscosímetro .....	63
Figura 37 - Principais alterações empregadas no modelo intermediário construído .....	63
Figura 38 - Modelo final do suporte do viscosímetro .....	64
Figura 39 - Fibras orientadas paralelamente à direção de aplicação da força .....	65
Figura 40 - Fibras orientadas perpendicularmente à direção de aplicação da força.....	66
Figura 41 - Fatiamento com fibras paralelas e perpendiculares .....	66
Figura 42 - Folga recomendada entre peças construídas e pré-fabricadas .....	67
Figura 43 – Modelo tridimensional do cilindro externo.....	67
Figura 44 – Modelo tridimensional do cilindro interno .....	68
Figura 45 - Diferenças nas formas curvas no modelo intermediário.....	68
Figura 46 - Cilindros externos impressos a partir de diferentes modelagens .....	69
Figura 47 - Motor DC com caixa de redução e célula de carga de 100 g.....	71
Figura 48 - Cilindro interno acoplado ao rolamento .....	73
Figura 49 – Cilindro externo .....	73
Figura 50 – Disco para leitura da velocidade angular .....	74
Figura 51 – Dispositivo de retlineidade do cilindro externo .....	74
Figura 52 - Dispositivo de encaixe do encoder .....	75
Figura 53 - Estrutura de encaixe do rolamento.....	75
Figura 54 - Base do suporte.....	75
Figura 55 - Suportes da protoboard e da placa Arduino.....	76
Figura 56 - Célula de carga e calço da célula .....	76
Figura 57 - Dispositivo auxiliar de calibração.....	77
Figura 58 - Protótipo montado (vista frontal).....	78
Figura 59 - Protótipo montado (vista anterior).....	78
Figura 60 - Sentido de rotação do eixo do motor DC.....	79
Figura 61 - Medição da massa da bandeja.....	81
Figura 62 – Monitor Serial com o protótipo desligado .....	83
Figura 63 - Curva de calibração corrigida .....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores esperados para força e torque (água a 20°C e a 1 atm) .....	70
Tabela 2 – Viscosidade dinâmica mínima e máxima .....	72
Tabela 3 – Fluidos aplicáveis para experimentação no protótipo .....	72
Tabela 4 – Calibração da massa 0 grama da célula .....	80
Tabela 5 – Calibração da máxima leitura da célula.....	81
Tabela 6 – Medição da massa da bandeja.....	82
Tabela 7 - Dados obtidos para a amostra de azeite de oliva.....	84
Tabela 8 - Dados obtidos para a amostra de óleo de motor SAE 10W30 .....	85
Tabela 9 - Dados obtidos para a amostra de glicerina.....	86
Tabela 10 - Valores de massa esperados e valores medidos .....	87
Tabela 11 - Viscosidade medida e valores de referência.....	87
Tabela 12 - Quantidade de dispositivos eletrônicos e custo de aquisição .....	88
Tabela 13 - Custo de impressão dos componentes do protótipo .....	89

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABMES	Associação Brasileira de Mantenedoras do Ensino Superior
CES	Câmara de Educação Superior
CNE	Conselho Nacional de Educação
DCN	Diretrizes Curriculares Nacionais
PPC	Projeto Pedagógico do Curso

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Problema de pesquisa .....</b>	<b>17</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>17</b>
<b>1.3.1</b>	<i>Objetivo Geral.....</i>	<b>17</b>
<b>1.3.2</b>	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<b>17</b>
<b>1.4</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>18</b>
<b>1.5</b>	<b>Delimitação .....</b>	<b>19</b>
<b>1.6</b>	<b>Roteiro temático .....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b>Diretrizes Curriculares Nacionais .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2</b>	<b>Viscosidade.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3</b>	<b>Viscosímetro.....</b>	<b>27</b>
<b>2.4</b>	<b>Arduino .....</b>	<b>28</b>
<b>2.5</b>	<b>Parâmetros de projeto .....</b>	<b>30</b>
<b>2.6</b>	<b>Impressão 3D .....</b>	<b>31</b>
<b>2.7</b>	<b>Célula de carga .....</b>	<b>33</b>
<b>2.8</b>	<b>Leitor de velocidade angular.....</b>	<b>35</b>
<b>2.9</b>	<b>Estudo dos perfis de velocidade .....</b>	<b>35</b>
<b>2.9.1</b>	<i>Perfil linear de velocidade.....</i>	<b>36</b>
<b>2.9.2</b>	<i>Perfil não-linear de velocidade .....</i>	<b>41</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>44</b>
<b>3.1</b>	<b>Projeto dos cilindros e disco de leitura de rotação.....</b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>Projeto do suporte e dispositivos auxiliares.....</b>	<b>48</b>
<b>3.3</b>	<b>Modelagem 3D.....</b>	<b>50</b>

3.4	Definição dos parâmetros vetoriais .....	52
3.5	Conexões dos dispositivos .....	54
3.5.1	<i>Leitor de velocidade angular/rotação (encoder)</i> .....	55
3.5.2	<i>Célula de carga</i> .....	56
3.6	Procedimento experimental para ensaio da viscosidade e análise de custo .....	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	61
4.1	Evolução do modelo .....	61
4.2	Verificação da resistência do material e características dimensionais.....	65
4.3	Ordem de grandeza da modelagem tridimensional .....	67
4.4	Definição das características do motor e da célula de carga.....	69
4.5	Limites do modelo .....	71
4.6	Modelo construído.....	73
4.7	Resultado da calibração da célula de carga.....	79
4.8	Medição da viscosidade.....	83
4.9	Análise de custo de construção do protótipo .....	88
5	CONCLUSÃO .....	90
	REFERÊNCIAS.....	92
	APÊNDICE A – DIMENSÕES DOS COMPONENTES DO PROTÓTIPO.....	94
	APÊNDICE B – ARRANJO EXPERIMENTAL COMPLETO .....	96
	APÊNDICE C – ALGORITMO DO ENCODER.....	97
	APÊNDICE D – ALGORITMO PARA LEITURA DA CÉLULA DE CARGA.....	98
	APÊNDICE E – ALGORITMO UNIFICADO DO VISCOSÍMETRO .....	100
	APÊNDICE F – PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA.....	102

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Atividades experimentais têm um papel de fundamental importância nos cursos de engenharia, uma vez que a atuação do engenheiro está baseada na multidisciplinaridade, devido ao vasto corpo teórico, e transdisciplinaridade, que relaciona as muitas áreas do conhecimento abordadas durante a graduação. Isso possibilita que se tenha uma visão holística dos problemas e que sejam desenvolvidas ferramentas para resolvê-los da melhor forma. Portanto, para que o desempenho do estudante e a atuação do profissional de engenharia sejam bem-sucedidos, requer-se que seja conhecida intimamente a relação entre o conhecimento teórico e as atividades práticas desenvolvidas.

De acordo com Barberà e Valdés (1996), o trabalho prático e, em particular, a atividade de laboratório, são fatores imprescindíveis para o sucesso do ensino de ciências. Os autores ainda afirmam que John Locke, 400 anos atrás, já discutia a necessidade dos trabalhos práticos na educação e que, desde o fim do século XIX, mantém-se uma tradição que assume a importância das práticas experimentais.

Para Zytkeuwisz e Bego (2018, pág. 74) “a pesquisa em ensino de ciências vem revelando crescente preocupação com a melhoria do processo de ensino e aprendizagem”. Para os autores, as atividades experimentais deveriam ter a capacidade de gerar maior interesse nos alunos, auxiliar na compreensão de fenômenos e aprimorar a capacidade de resolver problemas, estimulando a criatividade, além de ajudar a desenvolver atividades práticas. No entanto, advertem que na realidade há diversas pesquisas que revelam que estes pressupostos não condizem com o que é observado.

Alguns dos fatores que contribuem para esse comportamento são, por exemplo, o fato de que os objetivos didáticos das atividades experimentais raramente são bem definidos ou delimitados, bem como estas também carecem de fundamentação em quaisquer perspectivas metodológicas para o ensino de ciências. Com efeito, em grande parte dos casos, as atividades experimentais são concebidas a partir de concepções espontâneas de professores acerca do papel da experimentação, fazendo com que a atividade experimental para o ensino de ciências seja, amiúde, mal-empregada. (ZYTKEUWISZ; BEGO, 2018, pág. 75).

Com isso, embora se reconheça a importância da atividade experimental e prática, tem-se a percepção de que não basta empregar atividades em laboratório, mas deve-se sobretudo relacioná-las adequadamente, de forma bem definida, clara e bem delimitada, aos conceitos teóricos que subjazem à prática experimental, fazendo com que esse processo não seja avulso



ou mesmo carente de sentido real. Sem isso não é possível assegurar os benefícios atribuídos à atividade.

Assim, dentro do contexto em que estamos inseridos, acredita-se que o nível de compreensão e aprendizado durante a graduação serão tanto mais eficazes quanto maior for o grau de adequação das atividades experimentais ao que estabelecem as novas Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) dos cursos de engenharia, publicadas em 2019 pelo Conselho Nacional de Educação (Resolução nº 2, de 24 de abril de 2019). O segundo artigo da resolução diz que:

As DCNs de Engenharia definem os princípios, os fundamentos, as condições e as finalidades, estabelecidas pela Câmara de Educação Superior do Conselho Nacional de Educação (CES/CNE), para aplicação, em âmbito nacional, na organização, no desenvolvimento e na avaliação do curso de graduação em Engenharia das Instituições de Educação Superior (IES). (ABMES, 2019, pág. 1).

Para Oliveira (2007), por ser o engenheiro o elemento-chave no processo de condução das inovações tecnológicas e responsável pela difusão e apropriação dos novos conhecimentos no setor produtivo, é importante discutir sua formação. Acredita-se que aliar o percurso formativo norteado pelo projeto pedagógico dos cursos (PPC) aos interesses da atuação profissional é um requisito imprescindível para o sucesso da formação dos estudantes de engenharia. O autor acrescenta ainda que “[...] os engenheiros devem enfrentar uma crescente complexidade e interdisciplinaridade das tecnologias requerendo novas aptidões e habilidades” (OLIVEIRA, 2007, pág. 9). Para Sutili (2022), “em uma sociedade em constante transformação e avanços tecnológicos rápidos, a principal característica de um profissional competitivo é a capacidade de criar e aplicar ciência e tecnologia na geração de bens e serviços”.

Assim, é necessário que os alunos assumam uma postura de questionamento dos conceitos a que são apresentados, buscando entender sua abrangência, limitações e aplicações práticas. Nisso reside a importância de aliar a teoria às práticas experimentais, fazendo com que seja este o mínimo arranjo que possibilita o sucesso no ensino de ciências em geral e a atuação competente do engenheiro, em particular.

Para Axt e Moreira (1991), é importante ainda que se tenham bons equipamentos para que as práticas experimentais aconteçam, já que a falta de um equipamento pode impossibilitar ou pelo menos prejudicar a ação dos professores e a experiência dos alunos. Por conseguinte, ter-se-ia uma atividade deficiente – e talvez ineficiente –, recaindo nos problemas já apresentados. Os autores afirmam que, apesar dessa necessidade, não se pode esperar que sejam montados laboratórios com todos os equipamentos do qual necessitam, mas sejam

buscadas formas alternativas de se desenvolver tais práticas, dentre elas, o envolvimento dos alunos na confecção de dispositivos.

## **1.2 Problema de pesquisa**

Realizando um levantamento dos instrumentos disponíveis no laboratório de física do Câmpus da UFC em Crateús, verifica-se que estão instalados equipamentos para estudo de óptica, medidores de tensão, corrente e outras propriedades eletromagnéticas, balanças, dispositivos para estudo do movimento dos corpos, micrômetros, equipamentos para estudos térmicos, fontes de alimentação, kits de robótica e eletrônica digital, conjuntos para experimento de acústica e empuxo. Com isso, nota-se que há uma deficiência em montagens experimentais que possibilitem a realização de práticas utilizando conceitos da mecânica dos fluidos. Observando essa deficiência e com base nos critérios estabelecidos pelas DCNs tem-se, como questão de pesquisa, a verificação da aplicabilidade de um protótipo de viscosímetro rotacional de baixo custo construído através de impressão 3D e automação realizada por meio da plataforma *Arduino*, de modo a desenvolver-se boas práticas experimentais na área de mecânica dos fluidos e que atendam aos critérios exigidos pelas Diretrizes.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo Geral***

Com o objetivo de aprimorar o ensino de mecânica dos fluidos na perspectiva da formação por habilidades e competências definidas pelas Novas Diretrizes Curriculares Nacionais dos cursos de engenharia, neste trabalho pretende-se verificar como um protótipo de baixo custo, construído a partir do uso da impressão 3D e da automação em *Arduino* pode traduzir-se em uma ferramenta capaz de aferir a viscosidade de fluidos.

### ***1.3.2 Objetivos Específicos***

- Identificar fatores limitantes relacionados à elaboração do modelo teórico, à modelagem e à construção do modelo físico de um medidor de viscosidade rotacional, bem como fatores que favorecem o processo construtivo e a utilização do modelo;

- Analisar a resistência do material utilizado na construção do dispositivo em razão da natureza dos experimentos a serem realizados;
- Definir os atuadores associados à plataforma *Arduino* adequados para o processo de automação (leitura das variáveis, funcionamento etc.);
- Determinar quais os limites experimentais do protótipo construído;
- Analisar a validade do modelo físico realizando a calibração dos dispositivos utilizados no processo de automação;
- Analisar a validade do modelo físico por meio da prova do conceito;
- Verificar a viabilidade econômica de criação, implementação e utilização do protótipo.

#### 1.4 Justificativa

No contexto da implantação do Câmpus da UFC em Crateús, nos primeiros anos dos cursos, os alunos tinham de se deslocar a outras instituições de ensino para a realização de práticas experimentais. Naquela ocasião foram utilizados os laboratórios de Física e Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) Câmpus de Crateús. Após essa fase inicial, mesmo quando houve a mudança definitiva para as instalações do Câmpus da UFC em Crateús, ainda assim havia uma grande deficiência nos laboratórios da instituição em função de uma implantação recente, que exigia a destinação de recursos que não acompanharam a evolução dos semestres das turmas iniciais.

O Art. 4º, inciso II da Resolução nº 2, de 24 de abril de 2019, que institui as Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) do Curso de Graduação em Engenharia afirma que o curso de graduação em Engenharia deve proporcionar aos seus egressos, ao longo da formação, como competências gerais, entre outras, a análise e compreensão dos fenômenos físicos e químicos por meio de modelos simbólicos, físicos e outros, verificados e validados por experimentação, sendo capaz de modelar os fenômenos, os sistemas físicos e químicos e utilizando as ferramentas matemáticas, estatísticas, computacionais e de simulação, etc. necessárias para este fim, além de prever os resultados dos sistemas por meio dos modelos, concebendo experimentos que reproduzam resultados reais para o comportamento dos fenômenos e sistemas em estudo e verificando a validade dos modelos por meio de técnicas adequadas (ABMES, 2019).

Como se pode ver, o aspecto prático dos cursos de engenharia é um fator de importância significativa, conforme estabelecido pelas DCNs, que determina no seu Art. 16 um prazo de três anos para implementação das diretrizes, contados a partir de sua publicação,

ocorrida em abril de 2019, tendo assim os cursos até abril de 2022 para o cumprimento do prazo. Porém, há alguns fatores que dificultam o processo de implementação e adequação, caracterizados principalmente por aspectos financeiros e legais. O primeiro refere-se, por exemplo, ao contingenciamento de gastos que as universidades vêm sofrendo nos últimos anos, o que faz com que a não alocação dos recursos inviabilize a aquisição de novos equipamentos. O segundo aspecto está relacionado ao fato de que, mesmo quando a verba necessária para a compra de novos equipamentos está disponível, o processo legal para a aquisição é geralmente lento e burocrático. Além disso, muitos equipamentos requerem instalações especiais ou mesmo a utilização de outros equipamentos que possibilitem sua instalação.

### **1.5 Delimitação**

Considerando a elaboração de estratégias de ensino baseado na automação dos experimentos utilizando a plataforma *Arduino* e impressão 3D, este trabalho se limita a verificar a validação experimental da automação da montagem experimental de um viscosímetro rotacional a ser testado no laboratório de Física/Eletrotécnica do Câmpus da UFC em Crateús, realizando uma avaliação comparativa de custos referentes à construção e manutenção do equipamento com os valores usuais daqueles disponíveis no mercado e com isso realizar um estudo de aplicabilidade de protótipos dessa natureza.

### **1.6 Roteiro temático**

Este trabalho está dividido em cinco seções, na qual a segunda seção apresenta o Referencial Teórico onde serão dispostas as informações relevantes sobre a plataforma *Arduino* e sua crescente utilização no mercado, como também as principais teorias da mecânica do fluidos sobre a propriedade da viscosidade dos fluidos, estabelecendo a base para as equações que serão aplicadas para a realização deste trabalho, os tipos de viscosímetros utilizados em laboratório, os dispositivos utilizados para obtenção dos parâmetros necessários para medição da viscosidade, as ferramentas empregadas na construção do modelo físico e os principais pontos das DCNs que dizem respeito a práticas experimentais. Na terceira seção serão abordados os Materiais e Métodos relacionados à elaboração do modelo teórico e realização dos experimentos, como estão relacionadas as equações com os algoritmos integrados à placa *Arduino* e a calibração e leitura dos dados obtidos a partir do viscosímetro. Na quarta seção serão apresentados a evolução do modelo do viscosímetro, além das características

dimensionais importantes para construção e resistência das peças. Também serão apresentados o modelo construído e os resultados da calibração dos sensores, medição da viscosidade de alguns fluidos e a análise de custo de construção do protótipo. A quinta seção encerra o trabalho apresentado as principais conclusões feitas a partir da elaboração, construção e análise de custo do protótipo e sua aplicabilidade na medição da viscosidade de fluidos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Diretrizes Curriculares Nacionais

Para Becker e Werner (2018), a engenharia atua não apenas dentro do domínio das aplicações práticas, mas também está fortemente vinculada à produção do conhecimento dentro da lógica interna da ciência. Isso implica no fato de que à engenharia não cabe apenas desenvolver ferramentas úteis para a solução de problemas, mas também é sua característica a produção de novos conhecimentos científicos.

[...] a Engenharia envolve conhecimentos de Ciência e os aplica em situações reais, necessitando, concomitantemente, de um conjunto de elementos voltados à compreensão da lógica interna da Ciência, mas, ao mesmo tempo, a compreensão do contexto social, político e cultural no qual ela está sendo inserida. Tal necessidade implica em proporcionar uma formação em Engenharia ampla e com compreensão de ambos os posicionamentos. (BECKER; WERNER, 2018, pág. 76).

Objetivando atender a necessidade de uma maior mobilidade no exercício profissional e tornar a forma de atuação e necessidade de conhecimento do engenheiro mais homogêneas, em 2002 foram publicadas as Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia. Seguindo uma tendência mundial, tais diretrizes propunham o perfil do engenheiro com ênfase generalista, humanista, crítica e reflexiva (CARVALHO; TONINI, 2017). Sobretudo nestes dois últimos pontos é que reside a necessidade de alinhar melhor a aplicação de conhecimento prático e o desenvolvimento de conhecimento científico. Carvalho e Tonini (2017, pág. 832) afirmam que “[Com as diretrizes] o ensino deixa de ser centrado no professor e passa a ser centrado no aluno, e o currículo, antes focado no conteúdo, passa a priorizar o desenvolvimento de habilidades e competências”.

Recentemente, novas Diretrizes Curriculares Nacionais dos cursos de engenharia foram publicadas através da Resolução nº 2, de 24 de abril de 2019. Este trabalho baseia-se sobretudo no que recomendam as mais recentes atualizações contidas nessas DCNs. No que diz respeito ao perfil e competências esperadas dos egressos, a Resolução cita que:

Art. 3º O perfil do egresso do curso de graduação em Engenharia deve compreender, entre outras, as seguintes características:

I - ter visão holística e humanista, ser crítico, reflexivo, criativo, cooperativo e ético e com forte formação técnica;

II - estar apto a pesquisar, desenvolver, adaptar e utilizar novas tecnologias, com atuação inovadora e empreendedora;

III - ser capaz de reconhecer as necessidades dos usuários, formular, analisar e resolver, de forma criativa, os problemas de Engenharia;

IV - adotar perspectivas multidisciplinares e transdisciplinares em sua prática.

Art. 4º O curso de graduação em Engenharia deve proporcionar aos seus egressos, ao longo da formação, as seguintes competências gerais:

I - formular e conceber soluções desejáveis de engenharia, analisando e compreendendo os usuários dessas soluções e seu contexto [...];

II - analisar e compreender os fenômenos físicos e químicos por meio de modelos simbólicos, físicos e outros, verificados e validados por experimentação [...];

III - conceber, projetar e analisar sistemas, produtos (bens e serviços), componentes ou processos [...];

IV - implantar, supervisionar e controlar as soluções de Engenharia [...];

VIII - aprender de forma autônoma e lidar com situações e contextos complexos, atualizando-se em relação aos avanços da ciência, da tecnologia e aos desafios da inovação [...].

Porém, alguns desafios comprometem uma implantação efetiva daquilo que recomendam as Diretrizes, como carga horária curricular saturada e professores com dificuldade de integrar ensino e extensão (KLEBA; RUFINO, 2021). Acredita-se, então, que a melhor forma de minimizar estes problemas é fazendo com que o egresso seja capaz de lidar com a complexidade das inovações tecnológicas, isto é, que possa desenvolver uma capacidade de rápida adaptação, visto que tais inovações acontecessem rápida e incessantemente. Desta forma, a proximidade com a ciência em seu sentido estrito tem a função de aprimorar a capacidade adaptativa; as práticas experimentais, a de vincular o conhecimento teórico obtido em sala de aula à realidade que permeia a atividade profissional do engenheiro.

Com o objetivo de aplicar os pontos discutidos anteriormente das recomendações das DCN's, este trabalho propõe a construção de um protótipo para medição de viscosidade de fluidos (viscosímetro rotacional) lançando mão de técnicas de baixo custo, mas que, não obstante, sejam capazes de criar um modelo que atenda às necessidades de projeto.

## 2.2 Viscosidade

Antes de tudo, é importante que se defina viscosidade, que é, de acordo com Silva e Maia (2014, pág. 1) “a propriedade dos fluidos que corresponde ao transporte microscópico de quantidade de movimento por difusão molecular”. Assim, por viscosidade quer-se dizer a medida da resistência de um fluido à deformação causada por uma tensão de cisalhamento, ou ainda, a resistência interna para fluir, devendo-se entendê-la como a medida do atrito que o fluido oferece para o movimento.

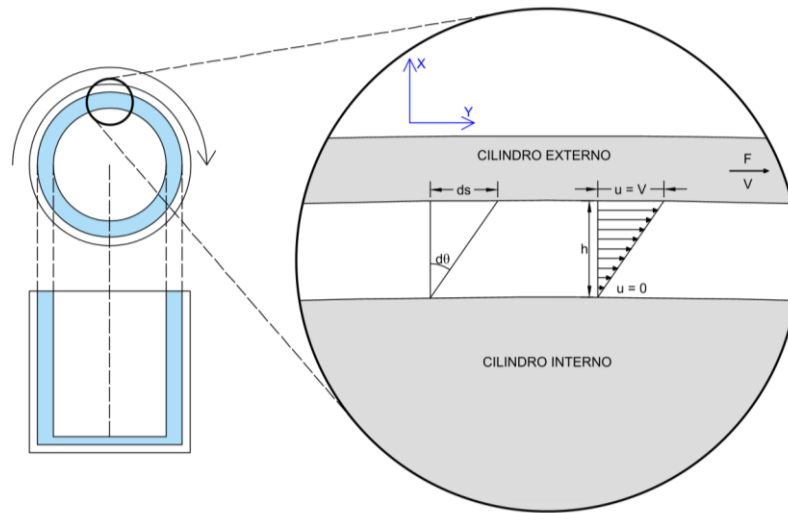
Para se fazer uma analogia, quando se deseja empurrar um objeto sobre uma superfície plana é necessário aplicar uma força paralela à superfície e no sentido do deslocamento, de intensidade tal que possa superar a força de atrito que age em sentido contrário. Portanto, a força necessária para mover o objeto depende do coeficiente de atrito da superfície. Para Çengel e Cimbala (2012) a situação é semelhante quando um fluido se move em relação a um sólido ou quando dois fluidos se movem um em relação ao outro. Os autores ainda afirmam: “A força que um fluido exerce sobre um corpo na direção do escoamento é chamada de força de arrasto, tendo direção tangente à superfície do objeto e sua intensidade depende, em parte, da viscosidade” (ÇENGEL; CIMBALA, 2012, pág. 41). Por sua direção tangente, este tipo de força viscosa produz sobre a superfície uma tensão de cisalhamento.

De outra forma pode-se dizer que a viscosidade de um fluido é a medida de sua resistência à taxa de deformação quando o fluido está sujeito à uma tensão de cisalhamento, resultando em uma força de atrito interno que se desenvolve entre as diferentes camadas do fluido à medida que são forçadas a mover-se uma em relação à outra. Do ponto de vista microscópico, em líquidos, a viscosidade é causada pelas forças coesivas entre as moléculas; nos gases, pelas colisões moleculares. A temperatura é fator de grande influência na medida da viscosidade, fazendo com que esta grandeza diminua com o aumento da temperatura em se tratando de líquidos e nos gases o aumento de temperatura causa um aumento na viscosidade.

Para entender a relação entre viscosidade, tensão de cisalhamento e taxa de deformação considere dois cilindros concêntricos, de modo que o cilindro interno esteja separado do cilindro externo por uma folga na área lateral e na base, com o cilindro externo sujeito a uma rotação. Na região entre eles, isto é, a folga, denominada aqui de região intersticial, põe-se o fluido, conforme mostra a Figura 1 a seguir.



Figura 1 - Deslocamento da camada fluida entre os cilindros



Fonte: Elaborada pelo autor.

As camadas próximas a cada uma das superfícies dos cilindros, por conta da condição de não escorregamento, tendem a assumir a velocidade de deslocamento de cada superfície. Portanto, a camada próxima ao cilindro interno, em estado de repouso, tende a manter uma velocidade nula. Por sua vez, a camada próxima ao cilindro externo, em movimento, tende a assumir a mesma velocidade de deslocamento da parede deste cilindro. Com isso, considerando um escoamento laminar estacionário, surge nas camadas do fluido uma força viscosa de direção tangente à superfície da camada, no sentido contrário ao movimento, responsável pelo surgimento de uma tensão de cisalhamento entre cada camada de fluido e a formação de um perfil de velocidade, conforme mostrado no detalhe da figura anterior.

Como se sabe, a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) exercida por um corpo é dada por:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Onde  $F$  é a força e  $A$ , a área sobre a qual a força é aplicada. Considerando a folga  $h$  como sendo na direção do eixo  $x$ ; a velocidade, positiva para a direita; e o perfil de velocidades linear, tem-se a seguinte equação da reta:

$$u(x) = ax + b \quad (2)$$

Pela condição de não escorregamento, a velocidade da camada fluida que está em contato com o cilindro interno deve ser nula, uma vez que este cilindro não apresenta rotação.

Da mesma forma, a velocidade da camada que está em contato com o cilindro externo deve ser igual à velocidade escalar linear no cilindro no ponto de contato entre a parede do cilindro e o fluido. Assim, as condições de contorno para o perfil de velocidade na região intersticial são  $u(0) = 0$  e  $u(h) = V$ , em que  $V$  é a velocidade de deslocamento da parede do cilindro externo. Segue, então, que  $u(x)$  assume a forma da Equação 3:

$$u(x) = \frac{V}{h}x \quad (3)$$

Derivando em relação a  $x$ , tem-se:

$$\frac{du}{dx} = \frac{V}{h} \quad (4)$$

Por outro lado, considerando  $ds$  na Figura 1 como sendo a distância infinitesimal percorrida pela camada de fluido sobre o cilindro externo e sendo  $d\theta$  o ângulo de deformação da camada (também infinitesimal, por conseguinte), é possível verificar a seguinte condição:

$$d\theta \approx \text{tg } \theta = \frac{ds}{h} = \frac{V dt}{h} = \frac{du}{dx} dt \quad (5)$$

Logo, a taxa de deformação do fluido ( $d\theta/dt$ ) é dado por:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dx} \quad (6)$$

A partir da Equação 6 pode-se afirmar que a taxa de deformação de um elemento do fluido é equivalente ao gradiente de velocidade. Çengel e Cimbala (2012) afirmam ainda que experimentalmente verifica-se que para a maioria dos fluidos a taxa de deformação e, portanto, o gradiente de velocidade é diretamente proporcional à tensão de cisalhamento. Os fluidos em que esta relação é linear são ditos newtonianos. Assim, segue que:

$$\tau \propto \frac{d\theta}{dt} \quad (7)$$

Ou ainda:

$$\tau \propto \frac{du}{dx} \quad (8)$$

A proporcionalidade mostrada na Equação 8 torna-se uma igualdade ao ser inserida na equação uma constante experimental. A essa constante chama-se  $\mu$ , sendo definida como coeficiente de viscosidade dinâmica (ou absoluta) do fluido, cuja unidade é  $\text{kg/m} \cdot \text{s}$  (ou  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ). Assim:

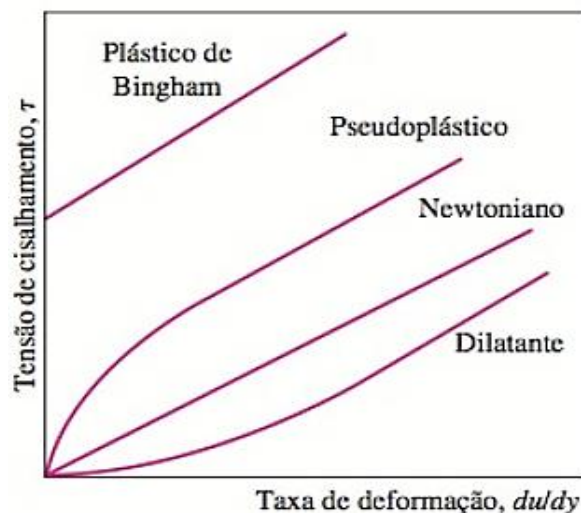
$$\tau = \mu \frac{du}{dx} \quad (9)$$

A partir das Equações 1, 4 e 9 infere-se que a força viscosa ( $F_v$ ) em qualquer camada de fluido é dada como sendo:

$$F_v = \tau A = \mu \frac{du}{dx} A = \mu \frac{V}{h} A \quad (10)$$

Os fluidos para os quais a tensão de cisalhamento não varia linearmente com a taxa de deformação são ditos não newtonianos. Nesse caso, a viscosidade não é absoluta, mas aparente para cada ponto da curva tensão de cisalhamento por taxa de deformação. Neste grupo encontram-se os *fluidos dilatantes*, cuja viscosidade aumenta com a taxa de deformação; os *pseudoplásticos*, que têm viscosidade reduzida com o aumento da taxa de deformação; e os *plásticos de Bingham*, cuja deformação resiste a baixas tensões de cisalhamento, até um valor limite, a partir do qual passam a comportar-se como fluidos newtonianos (ÇENGEL; CIMBALA, 2012). A Figura 2 mostra a tensão de cisalhamento referente à taxa de deformação de cada um dos tipos de fluidos discutidos.

Figura 2 - Tensão de cisalhamento por taxa de deformação



### 2.3 Viscosímetro

O aparelho utilizado para a obtenção da viscosidade de fluidos é chamado de viscosímetro. Em se tratando de líquidos com escoamento laminar, muitos são os métodos para determinação de sua viscosidade. A maioria destes métodos consiste em verificar a velocidade de escoamento do líquido no interior de um tubo capilar ou ainda a queda, dentro do líquido, de um corpo esférico de densidade conhecida. Para os líquidos, os principais modelos utilizados são os viscosímetros Cannon-Fenske (à esquerda), Höppler (no centro) e Gilmont (à direita), mostrados na Figura 3.

Figura 3 - Viscosímetros Cannon-Fenske, Höppler e Gilmont



Fonte: Thomas Scientific (2022), Direct Industry (2022) e Fisher Scientific (2022).

Esses modelos são mormente empregados quando se deseja determinar a viscosidade de fluidos mais viscosos. Quando, porém, se pretende obter esta propriedade para fluidos que apresentam média e baixa viscosidade geralmente são utilizados reômetros rotacionais, que promovem a deformação por cisalhamento dos fluidos por meio da rotação de cilindros coaxiais (NASCIMENTO, 2007). A Figura 4 a seguir mostra um modelo de reômetro rotacional. Observa-se no meio da figura os cilindros concêntricos utilizados para determinação das propriedades reológicas do fluido sob experimentação. O protótipo proposto neste trabalho utiliza este mesmo princípio para aferição da viscosidade.

Figura 4 - Reômetro rotacional



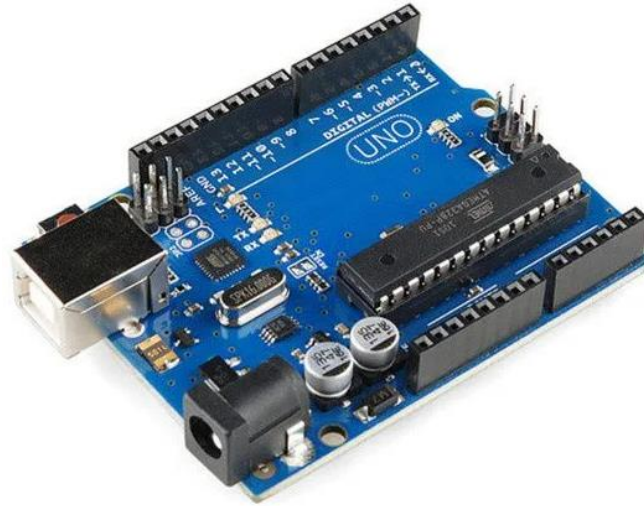
Fonte: BrasEq (2022).

## 2.4 Arduino

Uma ferramenta amplamente utilizada em processos de automação é a plataforma *Arduino*. Essa plataforma surgiu a partir da necessidade de se ensinar programação de computadores de modo a aplicar os conhecimentos adquiridos em projetos de arte, automação e robótica, mas que, apesar disso, fossem didáticas, práticas e baratas. Seus componentes são protótipos eletrônicos que permitem o desenvolvimento de controles interativos a um baixo custo. A plataforma é dividida em software, representado pelo compilador e sua interface gráfica, e hardware, representado pelos componentes eletrônicos (DESTEFANI; SOUZA, 2015).

De código aberto, a plataforma *Arduino* consiste em uma placa *input/output* e um ambiente de desenvolvimento baseado em *linguagem processing* (a inserção de dados ocorre por meio de um programa, direcionados a um hardware, ocorrendo em seguida o retorno de dados, ou seja, a leitura das informações conforme indicado pelo algoritmo de entrada), podendo ser usado na construção de diversos projetos eletrônicos (MULTILOGICA-SHOP, 2017). A Figura 5 mostra uma placa de *Arduino* Uno R3.

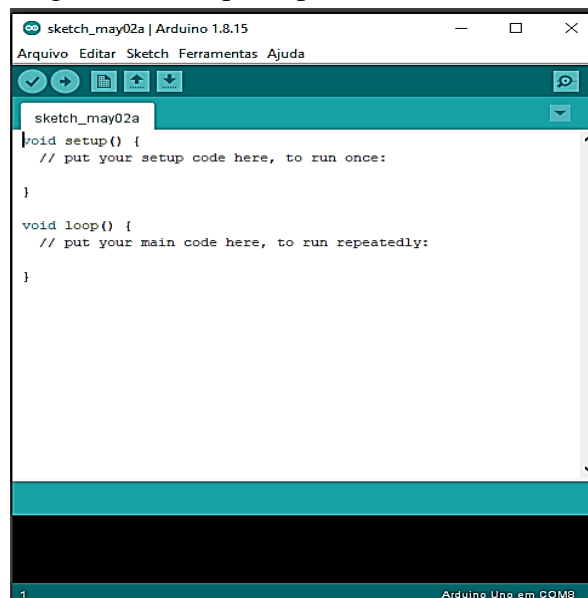
Figura 5 - Placa Arduino Uno R3



Fonte: Eletrogate, 2022.

A grande variedade de atuadores/sensores que podem ser acoplados no *Arduino* e a facilidade de implementação fazem dele uma ferramenta de grande utilidade em processos de automação. Outra vantagem da plataforma é a facilidade de conexão da placa com outros dispositivos, tornando possível a integração de diferentes ferramentas para o desenvolvimento de projetos eletrônicos. Quanto a sua programação, baseia-se essencialmente no controle de sinais elétricos por meio dos programas interpretados por seu microcontrolador. A Figura 6 mostra o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) da plataforma, onde são criados os programas.

Figura 6 - Tela principal da IDE do Arduino

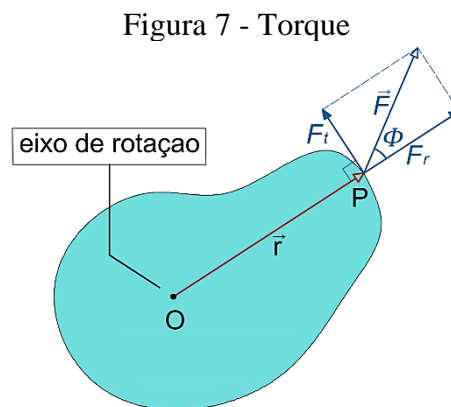


Fonte: Elaborada pelo autor.

## 2.5 Parâmetros de projeto

Para medir a viscosidade do fluido posto entre dois cilindros concêntricos, semelhante ao arranjo mostrados na Figura 1, é necessário obter através da plataforma *Arduino* os valores referentes à velocidade angular e ao torque a que está submetido o cilindro no momento da rotação.

Segundo Halliday, Resnick e Walker (2012, pág. 268) “o torque [...] pode ser descrito coloquialmente como a ação de girar ou torcer de uma força  $\vec{F}$ ”. Desta forma, ao aplicar-se uma força em um dado objeto com a finalidade de fazê-lo girar, então, diz-se que este objeto está sujeito a um torque. Matematicamente, esta grandeza é dada como sendo o produto vetorial do vetor de força pelo vetor posição que localiza a força em relação ao eixo de rotação (Figura 7), com  $\phi$  sendo o ângulo entre os vetores mencionados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Formalmente, o vetor torque é dado como sendo:

$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (11)$$

Tendo módulo igual a

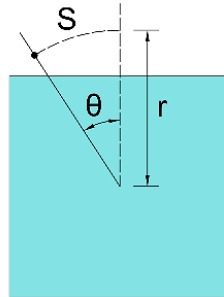
$$|\vec{T}| = |\vec{r}| \cdot |\vec{F}| \cdot \sin \phi \quad (12)$$

Desta forma, é possível verificar na Figura 7 que apenas a componente perpendicular da força pode produzir torque.

Por sua vez, quanto à velocidade angular, ainda de acordo Halliday, Resnick e Walker (2012), supondo uma reta de referência de um corpo rígido que gira de um ângulo  $\theta$ , um ponto arbitrário localizado nessa reta e a uma distância  $r$  de um eixo de rotação descreve

um arco de circunferência de comprimento  $S$  (Figura 8) cujo valor é dado como sendo o produto do comprimento de  $r$  pelo ângulo  $\theta$  em radianos (Equação 13).

Figura 8 - Rotação do elemento



Fonte: Elaborada pelo autor.

$$s = r\theta \quad (13)$$

Para se obter a taxa de deslocamento (ou rotação, nesse caso) deriva-se em relação ao tempo, sendo  $r$  constante. Assim:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{d\theta}{dt} r \quad (14)$$

Sabe-se que  $ds/dt$  é a velocidade linear escalar  $v$  e  $d\theta/dt$ , a velocidade angular  $\omega$ . Portanto, a equação anterior se torna:

$$v = \omega r \quad (15)$$

Assim, para se obter a velocidade linear escalar a que está submetido o cilindro externo ao rotacionar é necessário obter a velocidade angular do cilindro e multiplicar pelo valor do seu raio. Finalmente, as Equações 11 e 15 formulam os dois principais parâmetros para obtenção da viscosidade abordados neste trabalho. Na Seção Materiais e Métodos será descrito como esses parâmetros serão obtidos através de uma placa *Arduino* Uno e a formulação para, a partir das leituras obtidas, aferir-se a viscosidade dos fluidos utilizados nas práticas experimentais.

## 2.6 Impressão 3D

Quando se pretende construir peças elaboradas para projetos mecânicos é comum utilizar usinagem de metais. No entanto, em projetos de baixa complexidade construtiva e que



requerem constantes atualizações – um modelo base é elaborado e a partir deste as limitações observadas são corrigidas nos modelos seguintes, sucessivamente – até que se chegue ao modelo que melhor se adequa à finalidade para o qual foi concebido pode-se utilizar técnicas de impressão 3D.

De acordo com Silva e Maia (2014, pág. 33), “a impressão 3D é uma área da engenharia de manufatura que tem como característica a construção, a partir de um modelo virtual, de peças por deposição automática, camada-a-camada, sob controle de computador”. Desta forma, é possível construir modelos com razoável precisão para diversas aplicações.

A impressão 3D proporciona uma confecção rápida, reduzindo, assim, os custos e sendo considerada uma tecnologia inovadora em uma nova era industrial. Neste tipo de impressão, papel, cera, plástico ou outros materiais são utilizados para criar camadas de sobreposição, dando origem a um elemento sólido (ZIER et al., 2019).

A impressão 3D consiste nas seguintes etapas: criação do objeto tridimensional computadorizado com formato de arquivo Computer Aided Design (CAD); conversão do projeto em formato de arquivo Stereolithography (STL), para a leitura do equipamento, que construirá o objeto; fatiamento do desenho, cujos detalhes e acabamentos se tornarão melhores com um maior número de camadas; impressão do objeto físico e; limpeza e acabamento do produto final. (ZIER et al., 2019, pág. 305, apud GORNI, 2013).

Ainda de acordo com os autores, existem diversas técnicas de impressão desta natureza, dentre as quais destacam-se: *Fused Deposition Modeling* (FDM), que consiste em uma técnica de baixo custo, simples utilização e fácil armazenagem; *Selective Laser Sintering* (SLS), que consiste em uma técnica de alto investimento, capaz de criar objetos a partir da utilização de laser pela máquina de impressão, sendo capaz de fundir as pequenas partículas em pó e, com isso, garantir uma precisão maior no produto; *Stereo Litho Graphy* (SLA) que, sendo esta a primeira técnica de impressão 3D, utiliza um laser em resina líquida; *Laminated Object Manufacturing* (LOM), que é um método de impressão baseado em folhas de papel, oferecendo, portanto, baixo custo; e, por fim, o processo de *Three-dimensional Printing* (3Dprint) que, com base de camada em pó e adesivo líquido, oferece rapidez e melhor visualização.

Por sua vez, os principais materiais utilizados na impressão 3D, de acordo com Zier et al. (2019), são: *Ácido Polilático* (PLA), que consiste em um termoplástico biodegradável, derivado de produtos como amido de milho ou cana-de-açúcar; *Acrilonitrila Butadieno Estireno* (ABS), que consiste em um tipo de plástico formado por monômeros, apresentando grande resistência química e durabilidade, além de estabilidade em altas temperaturas, boa resistência a impacto e de fácil processamento; *Acrilonitrila Butadieno Estireno/Polycarbonato*

(ABS-PC), sendo este um composto termoplástico de engenharia de alto impacto e ideal para prototipagem funcional, ferramental e manufatura de baixo volume; e o *Acrilonitrilo Estireno Acrilato* (ASA), que trata-se de um termoplástico que combina resistência mecânica, resistência aos raios UV e à água, tendo um maior acabamento.

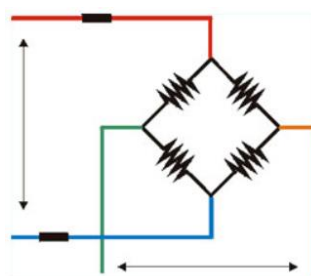
## 2.7 Célula de carga

Conforme citado anteriormente, os dois parâmetros que se deve conhecer para medir a viscosidade de um fluido em modelos de viscosímetros rotacionais são o torque e a velocidade angular. A Equação 11 afirma que o torque a que um corpo está sujeito é igual ao produto vetorial entre o vetor força aplicada no corpo em rotação e o vetor deslocamento, que é a distância entre o ponto de aplicação da força e o eixo de rotação do corpo. O módulo do vetor deslocamento e o ângulo entre os vetores é de fácil obtenção. No entanto, para que se conheça o vetor força (especialmente seu módulo) pode-se utilizar uma célula de carga.

De acordo com Randa (2016), células de carga são dispositivos eletromecânicos que, ao converterem em tensão as deformações de um corpo, podem ser utilizados para a medição de cargas, estáticas ou dinâmicas, além de ações de tração e compressão.

A conversão da força em tensão ocorre por meio de extensômetros colocados na estrutura da célula de carga, solidários a sua deformação. Seu princípio de funcionamento baseia-se na variação da resistência ôhmica dos extensômetros quando submetidos a deformação. Em células de carga geralmente são utilizados quatro extensômetros ligados entre si segundo o que se denomina *ponte de Wheatstone* (Figura 9). Quando esses extensômetros sofrem deformação ocorre um desbalanceamento da ponte proporcional à força que a provoca. Assim, medindo-se este desbalanceamento é possível aferir o valor da força aplicada (CONCEIÇÃO, 2005).

Figura 9 - Ponte de Wheatstone



Fonte: Conceição, 2005, pág. 31.

Considerando o regime elástico de deformações, a Lei de Hooke (Equação 16) estabelece que, ao ser submetido um dado material a um esforço mecânico, a tensão a que está sujeito esse material é igual ao produto do módulo de elasticidade (ou módulo de Young) característico desse material por sua deformação (HIBBELER, 2010).

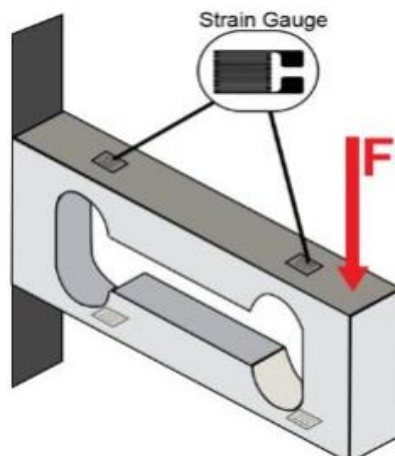
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (16)$$

Ainda de acordo com Hibbeler (2010), a partir da realização de ensaios de tração em um corpo de prova é possível determinar a curva de tensão por deformação do material e obter, afinal, o módulo de elasticidade.

Sabemos que as células de carga são projetadas para trabalharem dentro do regime de deformação elástica, uma vez que a cada medição realizada buscamos partir de uma deformação nula até uma deformação que não faça com que o material da célula de carga escoe permanentemente” (RANDA, 2016, pág. 23).

Sendo a célula de carga um transdutor que utiliza a ponte de Wheatstone para converter força em um sinal elétrico de tensão elétrica, ao ser aplicada uma força sobre o corpo de uma célula de carga resistiva, o membro elástico deflete e cria uma deformação nos pontos onde os extensômetros estão conectados à célula. Como resultado, dois dos extensômetros sofrem esforço de compressão enquanto os outros dois sofrem tração (RANDA, 2016 *apud*. REDDY, 2016, tradução do autor). A Figura 10 a seguir mostra o posicionamento dos extensômetros em uma célula de carga.

Figura 10 - Posicionamento dos extensômetros (strain gages) em uma célula de carga

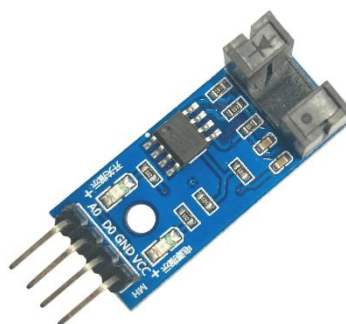


Fonte: Randa, 2016, pág. 24.

## 2.8 Leitor de velocidade angular

Neste trabalho, para a obtenção da velocidade de rotação do cilindro foi utilizado um dispositivo emissor de pulso (*encoder* e acoplador óptico) do modelo Lm393 para *Arduino* (Figura 11):

Figura 11 - Encoder Lm393



Fonte: Elaborada pelo autor.

Este dispositivo funciona emitindo pulsos entre as duas estruturas em forma de torre na Figura 11. Quando um obstáculo passa por meio da estrutura interrompe o pulso e, assim, pode-se determinar a rotação de um disco com quantidade de obstáculos conhecida. Quanto maior a quantidade de obstáculos maior será a precisão de leitura.

## 2.9 Estudo dos perfis de velocidade

Sabe-se que para pequenas camadas de fluido o perfil de velocidade comporta-se como linear, conforme ilustrado na Figura 1, tornando válida a Equação 9. Como não fossem encontrados dados na literatura que tratam precisamente da dimensão da camada, três hipóteses serão testadas na realização dos experimentos no dispositivo. Na Primeira hipótese foi considerado um perfil linear de velocidade do fluido para o cálculo da viscosidade, *desconsiderando* a região contida entre a base do cilindro interno e a face superior da base do cilindro externo; na segunda, o mesmo perfil, mas considerando, agora, os efeitos na região entre as bases; por fim, uma hipótese que considera um perfil não-linear de velocidade das camadas do fluido.

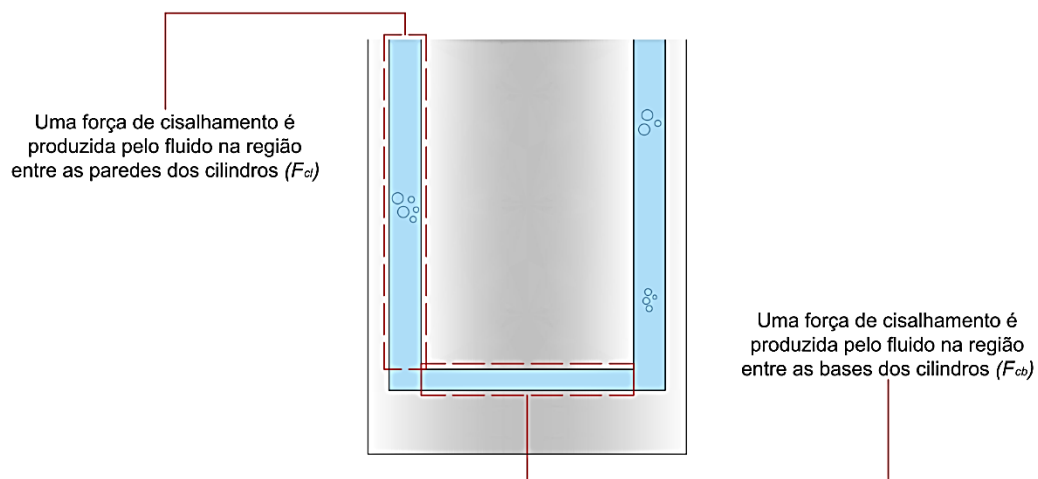
Nas hipóteses, como a região intersticial é muito pequena em relação ao raio de cada um dos cilindros, pode-se assumir que o líquido colocado nessa região tende a se

comportar como estando entre duas placas aproximadamente paralelas, conforme mostrado na Figura 1. A partir disso, nas subseções a seguir, é apresentada a fundamentação para as três hipóteses que foram testadas.

### 2.9.1 Perfil linear de velocidade

No arranjo experimental, há duas componentes de torque: o torque lateral ( $T_l$ ) causado pela componente de força referente à parte do fluido localizada na região entre as laterais dos cilindros, denominada de força de cisalhamento lateral ( $F_{cl}$ ), e o torque de base ( $T_b$ ) causado pela componente de força referente à parte do fluido localizada entre as bases dos cilindros, denominada de força de cisalhamento na base ( $F_{cb}$ ), conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Regiões onde são produzidas forças de cisalhamento



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a força de cisalhamento lateral no cilindro interno, sendo  $R_i$  o seu raio, tem-se:

$$T_l = F_{cl}R_i \quad (17)$$

Como o perfil é linear, a tensão de cisalhamento é igual em todas as camadas do fluido. Assim, a partir das Equações 10 e 17, tem-se que:

$$T_l = F_{cl}R_i = \mu A \frac{V}{h} R_i = \mu 2\pi R_i L \frac{\omega R_e}{h} R_i \quad (18)$$

Conforme se observa na Figura 1,  $h = R_e - R_i$ , então:

$$T_l = \mu \frac{2\pi R_i^2 R_e L \omega}{R_e - R_i} \quad (19)$$

Sabendo ainda que a relação entre a velocidade angular e a rotação por unidade de tempo é  $\omega = 2\pi f$ , onde  $f$  é dado em rotações por segundo, para que a unidade da viscosidade seja (kg/m.s ou Pa.s), tem-se:

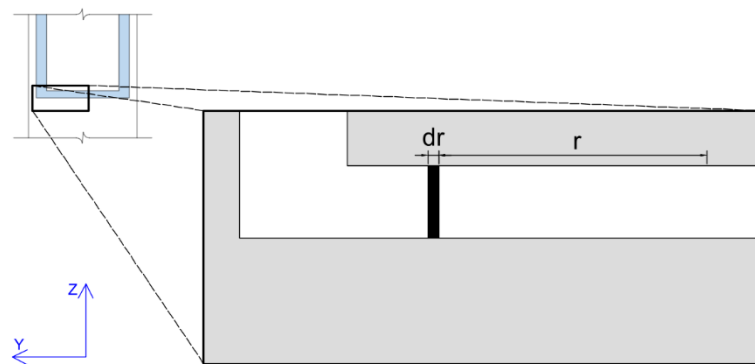
$$T_l = \mu \frac{4\pi^2 R_i^2 R_e L f}{R_e - R_i} \quad (20)$$

Isolando a viscosidade, que é o que se pretende obter a partir do experimento, finalmente chega-se à equação que representa o cálculo da viscosidade para o perfil linear desconsiderando os efeitos do fluido na região entre as bases (por isso o índice “db”), a primeira hipótese:

$$\mu_{linear,db} = \frac{T_l(R_e - R_i)}{4\pi^2 R_i^2 R_e L f} \quad (21)$$

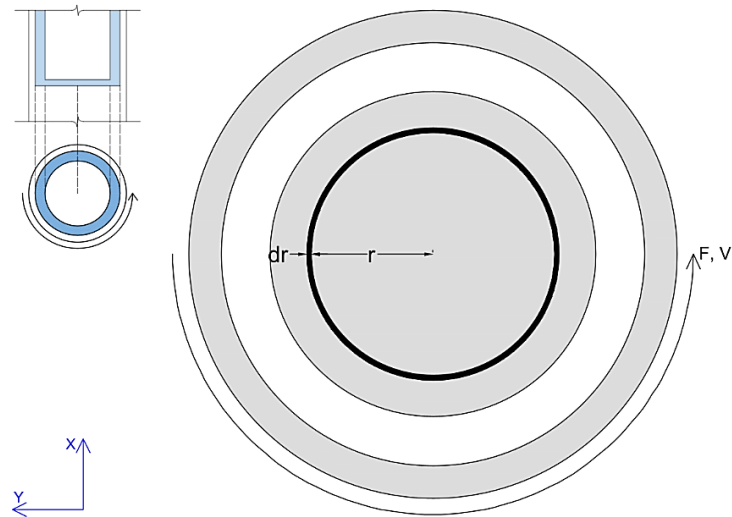
Porém, a Equação 15 despreza a região localizada entre as bases dos cilindros interno e externo (por isso o termo *db* subíndice do primeiro termo da equação) . Para o cálculo de tais efeitos, considere-se o elemento infinitesimal de espessura  $dr$  a uma distância  $r$  do eixo coaxial dos cilindros mostrado nas Figuras 13 e 14 a seguir:

Figura 13 - Elemento de espessura infinitesimal (vista lateral)



Fonte: Elaborada pelo autor.

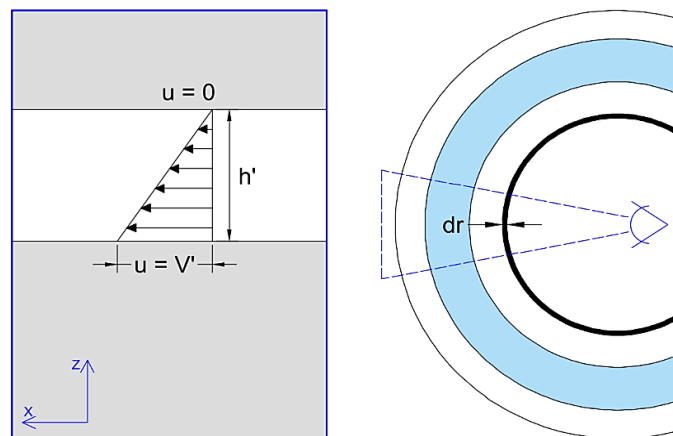
Figura 14 - Elemento de espessura infinitesimal (vista inferior)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para este elemento o perfil de velocidade é conforme mostrado na Figura 15 a seguir.

Figura 15 - Perfil de velocidade entre as bases dos cilindros



Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando  $h'$  a distância entre as bases dos cilindros (orientada no eixo  $z$ ) e o perfil de velocidades como sendo linear, tem-se a seguinte equação da reta:

$$u(z) = cz + d \quad (22)$$

Pela condição de não escorregamento, a velocidade da camada fluida que está em contato com o cilindro interno deve ser nula para qualquer ponto, uma vez que este cilindro tem sua rotação impedida. Por sua vez, a velocidade da camada que está em contato com o cilindro externo deve ser igual à velocidade de rotação do cilindro no ponto onde se considera o

elemento infinitesimal. Assim, as condições de contorno para o perfil de velocidade na região entre as bases dos cilindros são  $u(0) = V'$  e  $u(h') = 0$ . Aplicando o mesmo método de resolução utilizado para se obter a Equação 3, obtém-se:

$$u(z) = \frac{-V'}{h'}z + V' \quad (23)$$

Logo:

$$\frac{du}{dz} = -\frac{V'}{h'} \quad (24)$$

De modo análogo à Equação 9:

$$\tau = \mu \frac{du}{dz} \quad (25)$$

O elemento fluido de espessura infinitesimal  $dr$  gera uma força de cisalhamento infinitesimal  $dF_{cb}$  na base que, por sua vez, gera um torque infinitesimal  $dT_b$  no elemento de área  $dA$ , conforme as Equações 26 e 27 a seguir. Assim:

$$dF_{cb} = \tau dA = \mu \frac{du}{dz} dA = \mu \left( \frac{V'}{h'} \right) dA \quad (26)$$

Como  $dA$  é igual a  $2\pi r dr$ , então, o torque infinitesimal  $dF_{cb}$  pode ser determinado por:

$$dF_{cb} = \mu \left( \frac{V'}{h'} \right) 2\pi r dr \quad (27)$$

Sendo  $V'$  a velocidade linear no elemento e igual  $\omega r$ , a Equação 27 fica:

$$dF_{cb} = \mu \left( \frac{\omega r}{h'} \right) 2\pi r dr \quad (28)$$

Por conseguinte, o torque infinitesimal é:

$$dT_b = dF_{cb} \cdot r \quad (29)$$

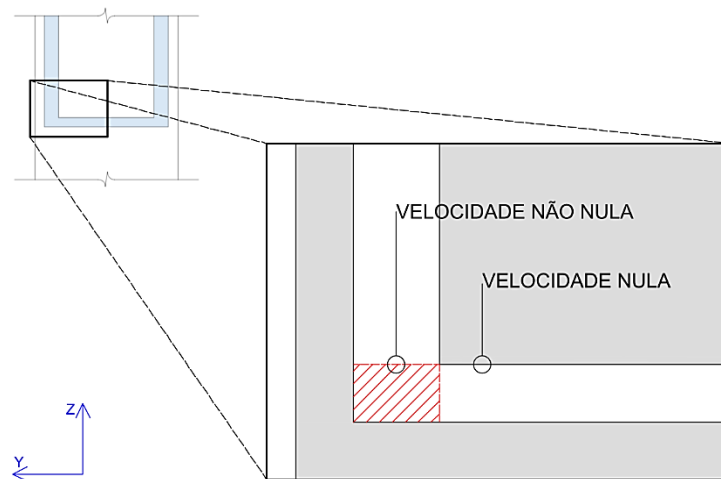
Assim:



$$T_b = \int dT_b = \int_0^{R_i} dF_{cb} \cdot r = \mu \frac{2\pi\omega}{h'} \int_0^{R_i} r^3 dr \quad (30)$$

Onde, desprezando os efeitos de borda mostrados na Figura 16, a força de cisalhamento da base deve contemplar toda a região da base sob o cilindro interno, por isso o limite superior da integral deve ser o raio desse cilindro.

Figura 16 - Região de comportamento particular da camada fluida



Fonte: Elaborada pelo autor.

Finalmente, resolvendo a integral da Equação 30, obtém-se que:

$$T_b = \mu \frac{2\pi\omega R_i^4}{4h'} \quad (31)$$

Com isso, o torque total da força viscosa na superfície do cilindro interno se torna a soma das contribuições do torque devido às interações entre as laterais dos cilindros e as contribuições do torque devido às interações entre as bases dos cilindros:

$$T = T_l + T_b \quad (32)$$

Utilizando as Equações 19 e 31 e substituído os termos equivalentes na Equação 32, tem-se o seguinte:

$$T = \mu \frac{2\pi R_i^2 R_e L \omega}{R_e - R_i} + \mu \frac{2\pi R_i^4 \omega}{4h'} \quad (33)$$

Evidenciando os termos em comum:

$$T = \mu 2\pi R_i^2 \omega \left( \frac{R_e L}{R_e - R_i} + \frac{R_i^2}{4h'} \right) \quad (34)$$

Após esta análise, a equação para obtenção da viscosidade considerando esta hipótese fica:

$$\mu = \frac{T}{2\pi R_i^2 \omega \left( \frac{R_e L}{R_e - R_i} + \frac{R_i^2}{4h'} \right)} \quad (35)$$

Novamente, tomando  $\omega$  como sendo igual a  $2\pi f$ , chega-se à equação que representa o cálculo da viscosidade para o perfil linear considerando os efeitos do fluido na região entre as bases (por isso o índice “cb”), a segunda hipótese:

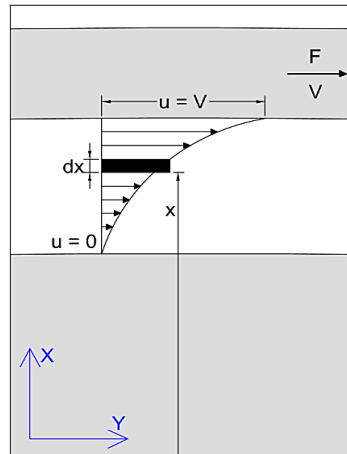
$$\mu_{linear,cb} = \frac{T}{4\pi^2 R_i^2 f \left( \frac{R_e L}{R_e - R_i} + \frac{R_i^2}{4h'} \right)} \quad (36)$$

Observa-se que se ignorarmos a expressão  $R_i^2/4h'$ , a Equação 36 reduz-se à Equação 21. Portanto, considera-se que esse termo se refere à parcela de fluido entre as bases dos cilindros. É importante ressaltar que  $L$  é a altura que o volume fluido alcança a partir da base do cilindro interno.

### 2.9.2 Perfil não-linear de velocidade

Novamente, como não foram encontrados dados na literatura a respeito da distância máxima entre as paredes dos cilindros em viscosímetros rotacionais, isto é, a folga máxima que permite considerar um perfil linear de velocidades, é necessário supor também um perfil não-linear de velocidade do fluido. A Figura 17 a seguir mostra o deslocamento da camada fluida na região intersticial para essa hipótese.

Figura 17 - Deslocamento de elemento infinitesimal



Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando-se que  $h$  está na direção de um eixo  $x$  e a velocidade, na direção de um eixo  $y$ , quando for alcançado o equilíbrio rotacional para uma camada de espessura  $dr$  a velocidade varia de  $v + dv$ , que gera as tensões de cisalhamento. Como cada camada se desloca com velocidade constante, o torque gerado no cilindro interno e transmitido à primeira camada de fluido sobre a área lateral equilibra-se com os torques de cada uma das camadas de espessura infinitesimal  $dx$  adjacentes. Logo:

$$T_l = F_{cl} \cdot r \quad (37)$$

$$T_l = \tau \cdot A \cdot r = \mu \left| \frac{du}{dx} \right| 2\pi x L \cdot x \quad (38)$$

Isolando, tem-se que:

$$\mu du = \frac{T_l dx}{2\pi x^2 L} \quad (39)$$

Integrando de ambos os lados, tem-se:

$$\mu \int_0^V du = \frac{T_l}{2\pi L} \int_{R_i}^{R_e} \frac{dx}{x^2} \quad (40)$$

Assim:

$$\mu = \frac{T_l}{2\pi LV} \left( \frac{R_e - R_i}{R_e R_i} \right) \quad (41)$$

Novamente, pela Equação 15 sabe-se que neste caso  $V = \omega \cdot R_e$ . Logo:

$$\mu = \frac{T_l}{2\pi L \omega} \left( \frac{R_e - R_i}{R_e^2 R_i} \right) \quad (42)$$

Além disso, novamente pode-se adotar a relação entre a velocidade angular e a rotação por unidade de tempo, isto é,  $\omega = 2\pi f$ . Finalmente, a equação que representa o cálculo da viscosidade para o perfil não-linear, a terceira hipótese, é:

$$\mu_{\text{não-linear}} = \frac{T_l}{4\pi^2 L f} \left( \frac{R_e - R_i}{R_e^2 R_i} \right) \quad (43)$$

O que se observa nas Equações 21, 36 e 43 é que de modo geral a viscosidade é dada como sendo uma relação entre torque e frequência de rotação, como mostra a seguinte equação:

$$\mu = \frac{T}{f} \cdot C \quad (44)$$

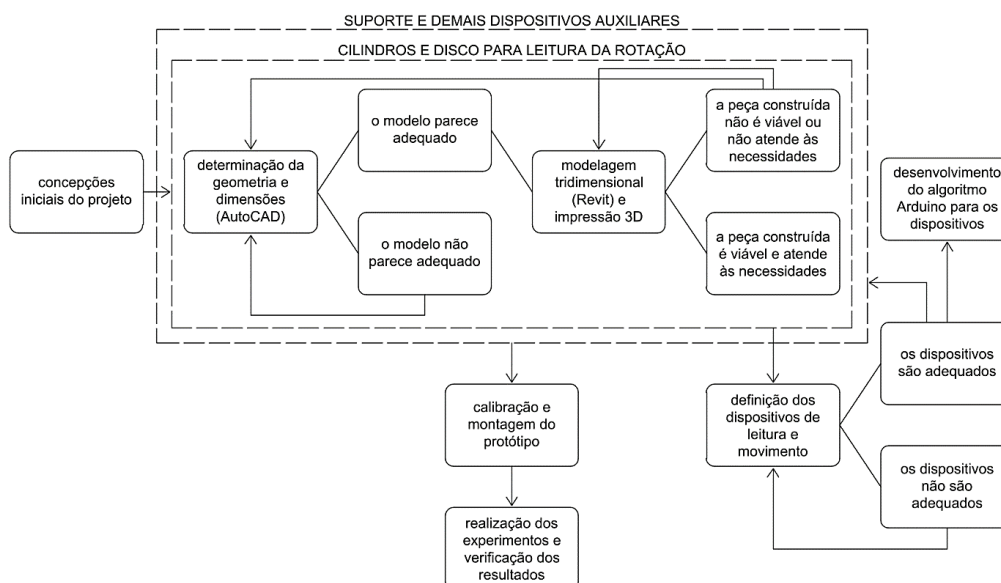
Onde  $T$  é o torque em N.m,  $f$  é a frequência em rotações por segundo e  $C$  é uma constante relacionada à geometria dos cilindros.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O protótipo desenvolvido neste trabalho apresenta o mesmo princípio de um viscosímetro rotacional, onde são empregados dois cilindros concêntricos e foi construído considerando cinco partes, quais sejam: os cilindros, principais componentes do projeto; os dispositivos eletrônicos de leitura e movimento (célula de carga, *encoder* e motor DC/caixa de redução); os dispositivos eletrônicos de comando (placa *Arduino Uno* e *protoboard*); os dispositivos auxiliares, que servem para encaixar os dispositivos de leitura, além de outras funções (rolamento, dispositivos de retineidade do cilindro externo, de encaixe do *encoder* e calço da célula de carga); e o suporte, formado pela base, colunas e estrutura de encaixe do rolamento, onde são alocados os cilindros e todas as demais peças do modelo. Os dispositivos auxiliares e suporte foram modelados sumariamente de acordo com as características dos dispositivos eletrônicos e dos cilindros.

Toda a concepção do modelo, suas formas, dimensões e estudos iniciais foram realizados no *AutoCAD*. Tendo em conta as possíveis alterações nos modelos, para otimizar o projeto, optou-se primeiro por realizar os estudos iniciais nesse software e só a partir da definição das características geométricas é que o projeto foi reproduzido no *Revit* para a modelagem tridimensional das peças. A Figura 18 mostra o fluxograma de construção do modelo. Nas subseções seguintes são apresentados os métodos utilizados para construção de cada componente do protótipo.

Figura 18 - Fluxograma de construção do modelo

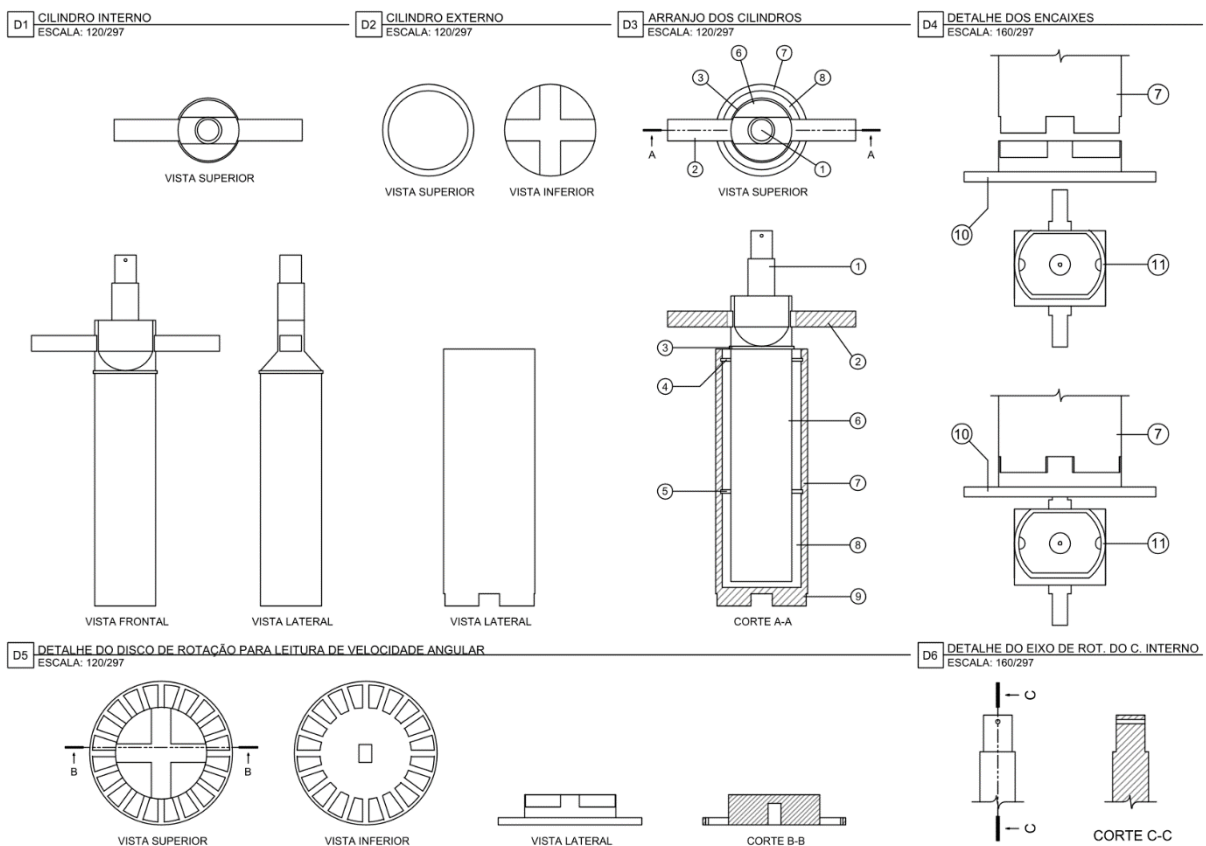


Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.1 Projeto dos cilindros e disco de leitura de rotação

O projeto dos cilindros e do disco para leitura da rotação do cilindro externo, cujas dimensões e detalhamentos são apresentados no Apêndice A, é mostrado na Figura 19 com detalhamento dos pontos mais importantes do modelo e seu arranjo experimental. As regiões hachuradas representam cortes. Foi adotado entre os cilindros um distanciamento de 3mm. Isso porque para dimensões menores não se pode garantir a estabilidade do cilindro interno em relação ao cilindro externo e dimensões maiores podem alterar o tipo de escoamento do fluido durante a utilização do protótipo.

Figura 19 - Projeto dos cilindros e do disco para leitura da rotação (AutoCAD)

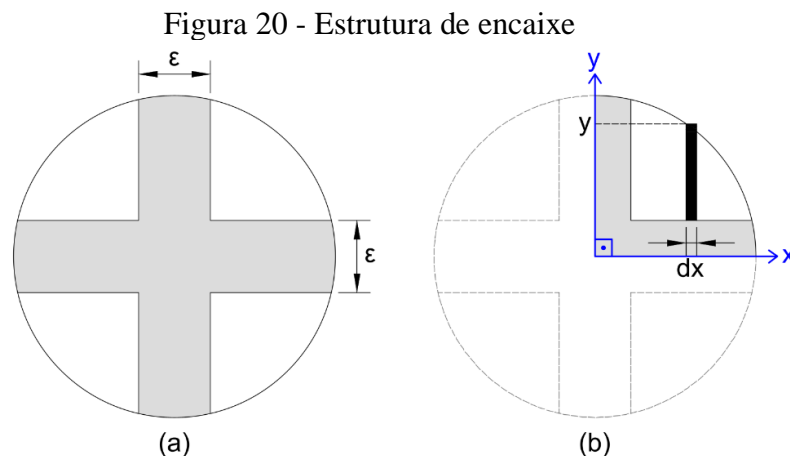


Fonte: Elaborada pelo autor.

Os componentes do protótipo na Figura 19 foram definidos como sendo: ① eixo de rotação do cilindro interno, projetado com seção transversal adequada e com um orifício (ver D6) para encaixe de um pino de forma a impedir deslocamentos verticais acentuados do cilindro interno; ② braços de alavanca para medição do torque e equilíbrio do cilindro interno, projetados de forma simétrica a fim de evitar o deslocamento do centro de massa do cilindro interno e de forma a impedir inclinações indesejadas e a desestabilização do cilindro

no momento da rotação, o que poderia levar a um enviesamento das medições de força e, consequentemente, erro na determinação da viscosidade; ③ marcação para verificação da distância entre as bases dos cilindros e retineidade do cilindro interno em relação ao cilindro externo; ④ e ⑤ são as marcações criadas para identificação correta do volume de ensaio de 17 ml, sendo que a marcação inferior (⑤) serve para verificar a quantidade correta de fluido quando o cilindro interno não está inserido no cilindro externo, de forma a facilitar o manuseio das peças do protótipo durante a experimentação, enquanto que a marcação superior (④) representa o nível que o fluido deve alcançar quando o cilindro interno é inserido dentro do cilindro externo, permitindo assim uma segunda verificação do volume de fluido a ser experimentado; ⑥ cilindro interno; ⑦ parede lateral do cilindro externo; ⑧ região intersticial onde é colocado o fluido que se deseja aferir a viscosidade; ⑨ base do cilindro externo; ⑩ disco para leitura da taxa de rotação do cilindro externo, projetado como dispositivo de encaixe separado da base do cilindro para evitar possíveis danos no cilindro externo gerados por tensões relacionadas à rotação do eixo; ⑪ motor DC acoplado a uma caixa de redução.

Para otimizar o desempenho da estrutura de encaixe no disco de rotação, considerou-se as dimensões ideais para a região de relevo do encaixe como sendo aquelas em que a área da região sombreada da Figura 20a seja igual a soma das outras áreas do círculo da mesma figura. Tendo em conta essa condição foi determinado o valor de  $\varepsilon$  ideal adotando-se o quadrante indicado na Figura 20b como referência:



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, tem-se que:

$$dA = \left( y - \frac{\varepsilon}{2} \right) dx = \left( \sqrt{R^2 - x^2} - \frac{\varepsilon}{2} \right) dx \quad (45)$$

Onde foi usada a equação do círculo na forma  $y = \sqrt{R^2 - x^2}$ . Para a obtenção da área desse quadrante foi realizado o cálculo integral do elemento de área infinitesimal do ponto em que  $x$  é igual à metade do valor de  $\varepsilon$  ( $x = \varepsilon/2$ ) até o ponto em que  $y$  é igual à metade do valor de  $\varepsilon$  ( $x = \sqrt{R^2 - (\varepsilon/2)^2}$ ). Assim:

$$A = \int_{\varepsilon/2}^{\sqrt{R^2 - (\varepsilon/2)^2}} \left( \sqrt{R^2 - x^2} - \frac{\varepsilon}{2} \right) dx \quad (46)$$

Assim, a solução final da área acima mencionada foi determinada a partir da Equação 47:

$$A = \frac{1}{2} \left[ x\sqrt{R^2 - x^2} + R^2 \cdot \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{x}{\sqrt{R^2 - x^2}} \right) - \varepsilon x \right] \Bigg|_{\varepsilon/2}^{\sqrt{R^2 - (\varepsilon/2)^2}} \quad (47)$$

Por fim, tendo em vista a otimização do desempenho da estrutura de encaixe mencionado anteriormente, para obter o valor de  $\varepsilon$  foi utilizado a ferramenta solver do software *MS Excel*, validado com o uso do software *AutoCAD*, na qual foi imposta a condição de que a área calculada na Equação 47 deve ser igual a metade da área de um quarto de um círculo, ou seja,  $A = \pi R^2/8$ . Como resultado, foi adotado o valor de 6,7 milímetros para  $\varepsilon$  na construção do dispositivo. Outra forma utilizada para otimizar o dispositivo de encaixe foi tornar mais profunda a região de encaixe, adotando-se um valor de 4 mm. A Figura 21 mostra o modelo tridimensional do dispositivo.

Figura 21 - Modelo tridimensional do dispositivo de encaixe



Fonte: Elaborada pelo autor.

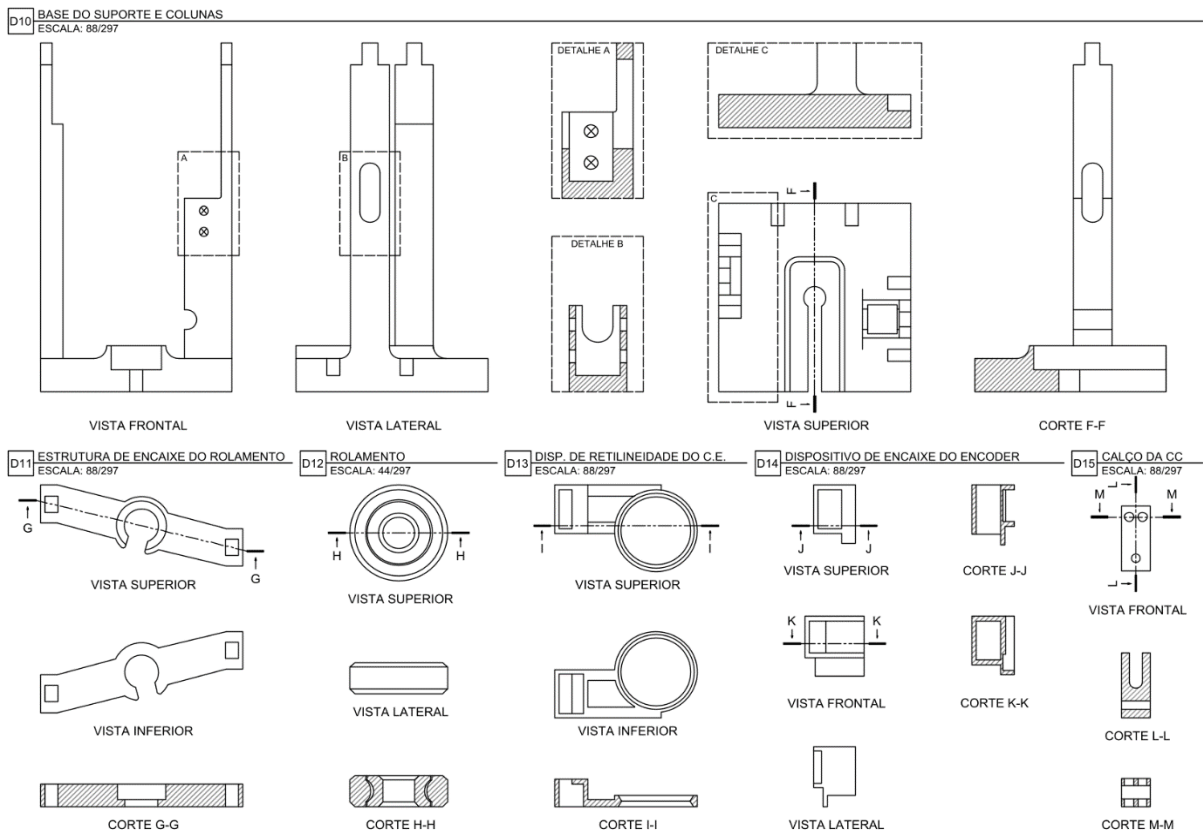


### 3.2 Projeto do suporte e dispositivos auxiliares

Considerando a natureza do projeto em garantir a estabilidade do cilindro durante a rotação e ter sensibilidade ao torque mesmo em baixas rotações foi adotado um motor com rotação e torque moderados e uma célula de carga de baixa capacidade de carga para leitura do torque produzido, o que permite medidas de baixos valores de torque. Para definir o motor e a célula de carga adequados foi realizada uma estimativa do torque a que estaria submetido o cilindro interno quando ensaiada uma amostra de água a 20°C, à pressão de 1 atmosfera (atm), para diferentes rotações do cilindro externo.

Uma vez definidos os componentes mostrados até aqui, foram estabelecidas as características geométricas do suporte para encaixe destes elementos e dispositivos auxiliares necessários para realização dos experimentos. A Figura 22 mostra os componentes do suporte e suas dimensões, além dos dispositivos auxiliares elaborados. No suporte são encaixados os dispositivos auxiliares e a estrutura apresentada em D11 é onde será encaixado o rolamento que ficará acoplado ao eixo do cilindro interno. As regiões hachuradas representam cortes.

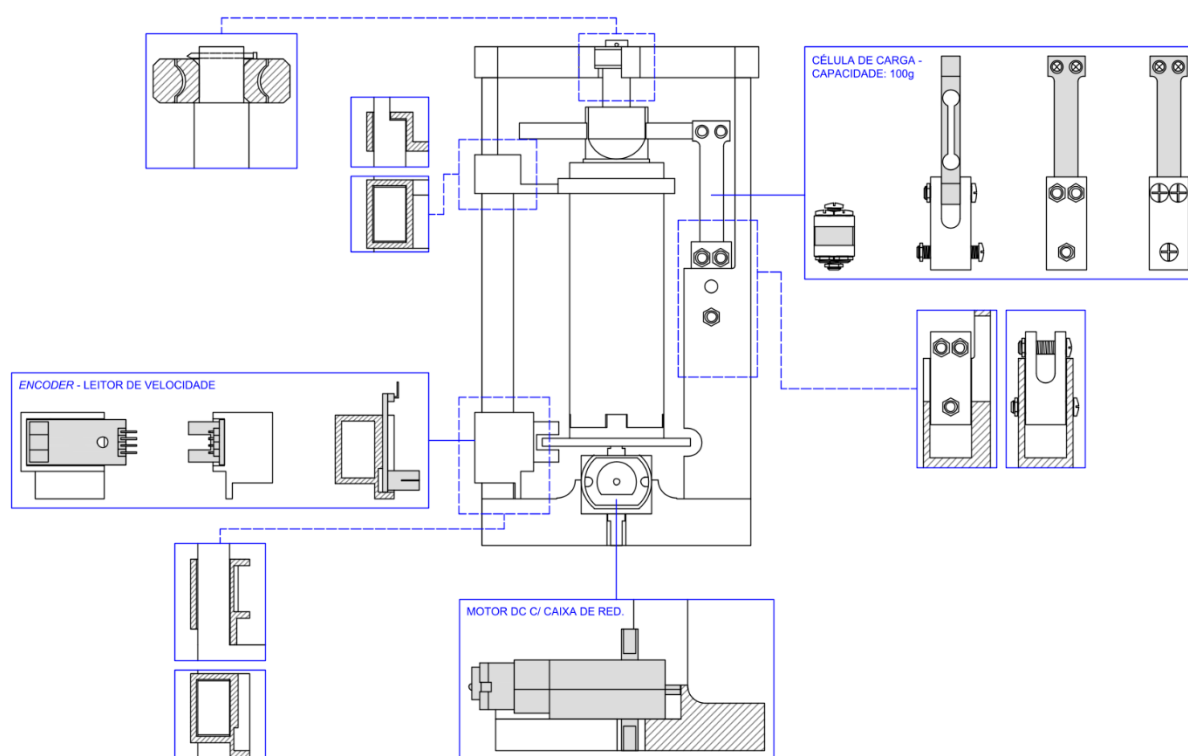
Figura 22 - Componentes do suporte dos cilindros e dispositivos auxiliares



Fonte: Elaborada pelo autor.

O suporte foi construído de modo a ter uma base para encaixe da caixa de redução com o motor DC, duas colunas responsáveis por receber a célula de carga (detalhes A e B da Figura 22) e os dispositivos que garantem a retlineidade do cilindro externo e o encaixe do *encoder* (D13 e D14, respectivamente), e por uma estrutura horizontal de encaixe do rolamento (ver detalhe D11) do eixo do cilindro interno. As dimensões dos componentes do suporte e dispositivos auxiliares são mostradas no Apêndice A. A Figura 23 a seguir mostra a elaboração da montagem do protótipo, destacando os detalhes do encaixe dos dispositivos eletrônicos de leitura e movimento (estruturas sombreadadas) e seus dispositivos auxiliares.

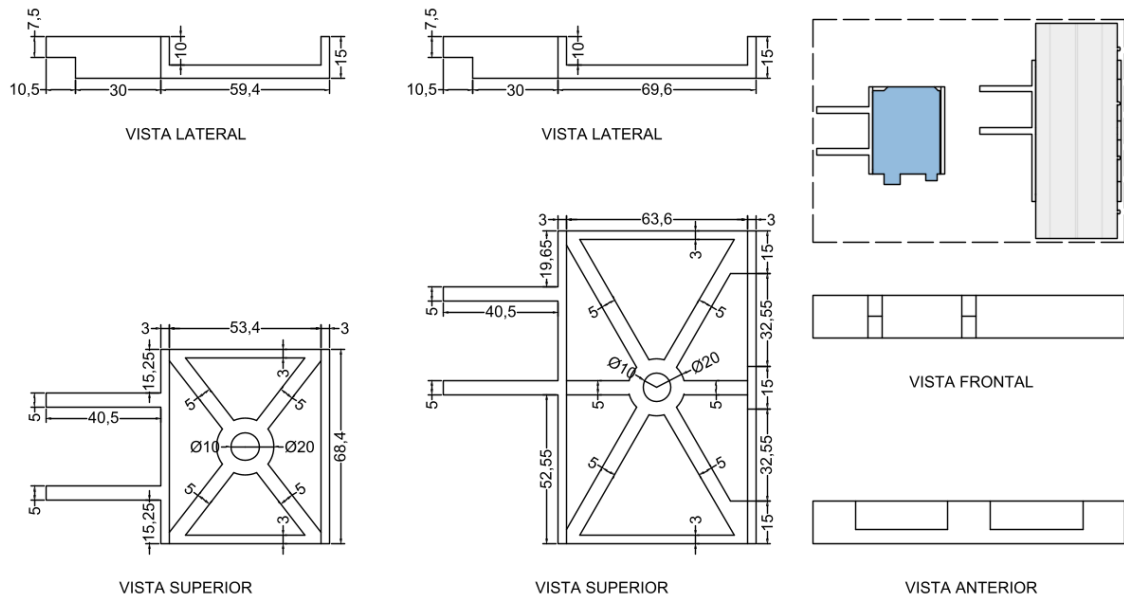
Figura 23 - Montagem do protótipo



Fonte: Elaborada pelo autor.

Outros dispositivos auxiliares desenvolvidos foram os suportes para a placa *Arduino* e *Protoboard* mostrados na Figura 24 (as dimensões estão em milímetros). Estes suportes impedem que os componentes fiquem soltos durante a realização dos experimentos, além de auxiliar na organização dos cabos e *jumpers* usados nas conexões, facilitando a prática e mantendo uma distância razoável entre o fluido e alguns dos componentes eletrônicos.

Figura 24 - Suportes para a placa Arduino (esquerda) e protoboard (direita)

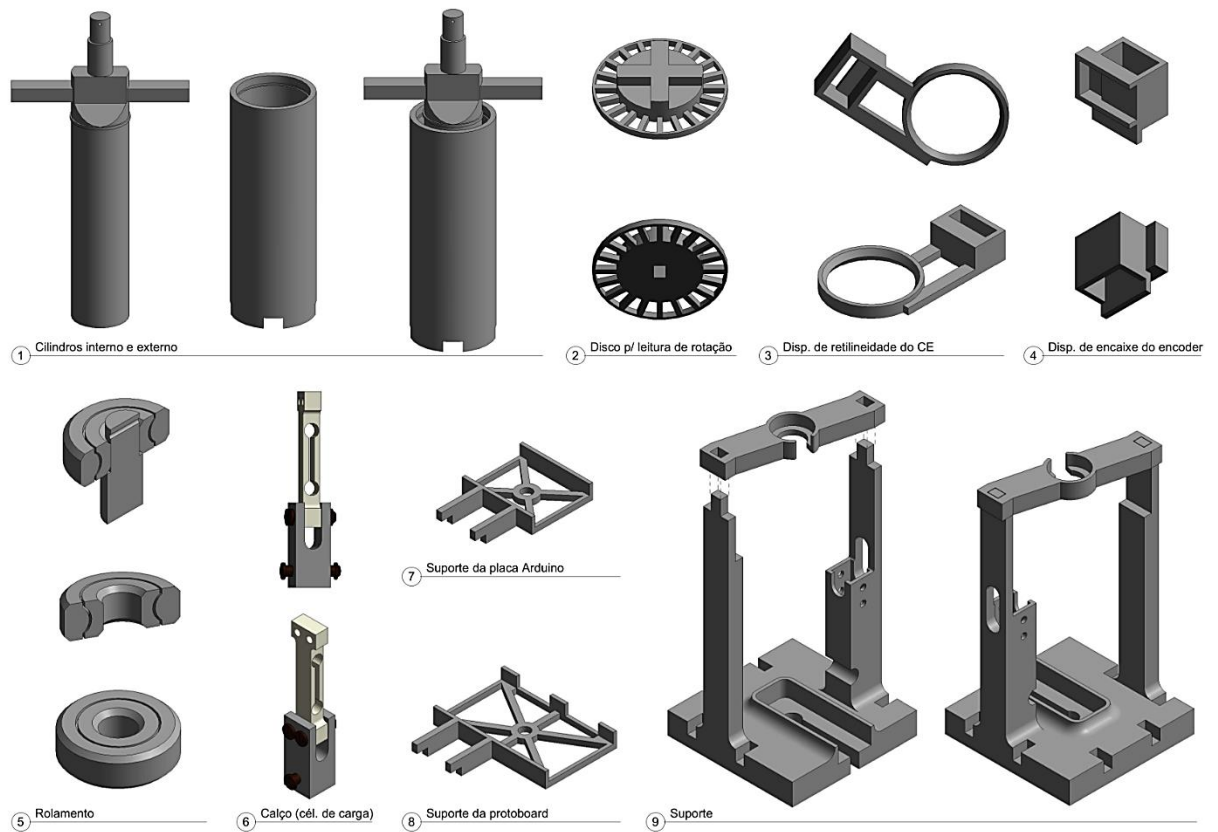


Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.3 Modelagem 3D

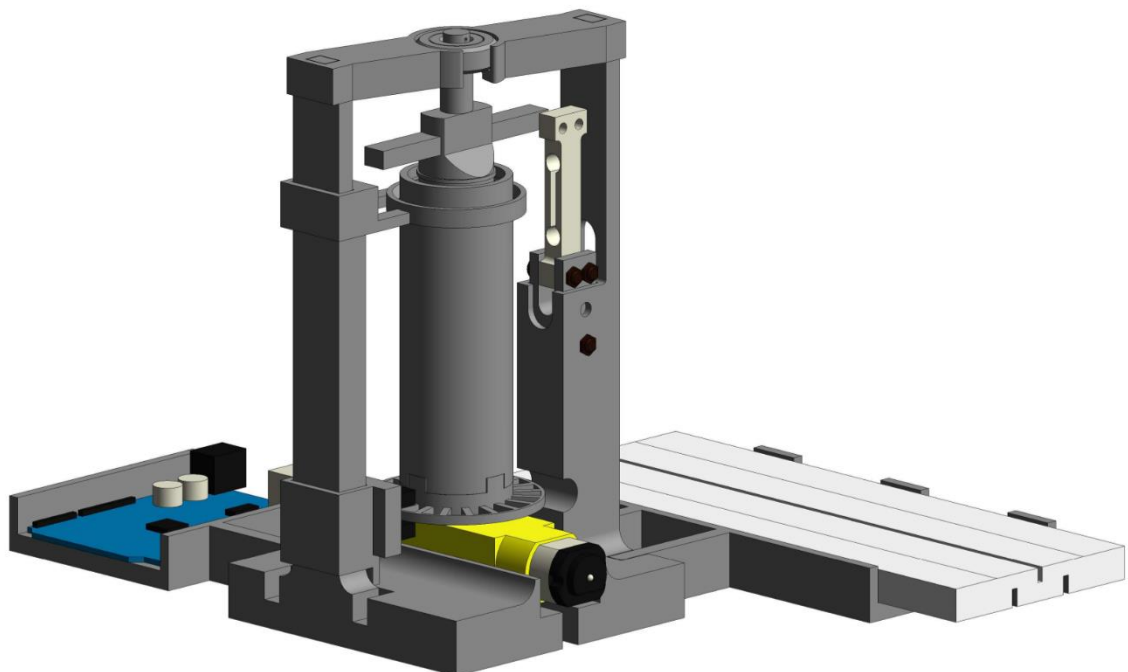
Definidas as características geométricas dos componentes do protótipo foi realizada modelagem tridimensional no software *Revit*. As peças foram criadas como modelos genéricos de componentes. A Figura 25 mostra a modelagem tridimensional no *Revit* dos componentes do protótipo. Com exceção da célula de carga (D6), todas estas peças foram desenvolvidas para impressão 3D. D5 mostra detalhes do encaixe do rolamento com o eixo de rotação do cilindro interno, no qual é possível observar como ocorre o travamento do rolamento com o eixo. Na Figura 26 tem-se uma representação do protótipo completamente montado.

Figura 25 - Modelagem tridimensional dos componentes do protótipo



Fonte: Elaborada pelo autor.

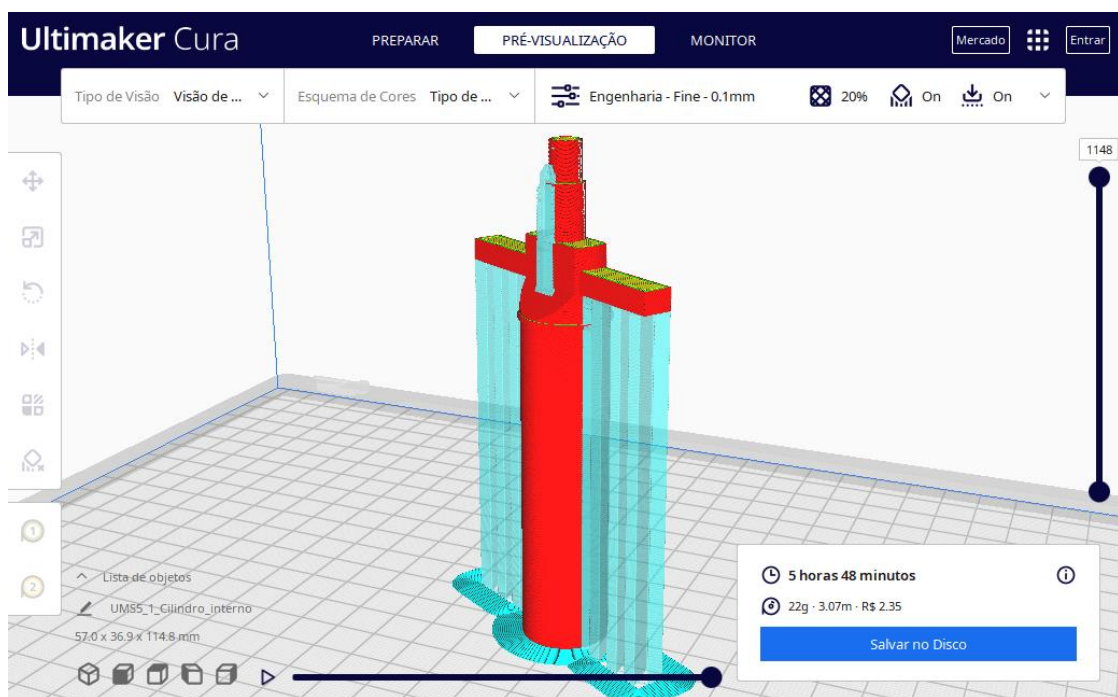
Figura 26 - Representação tridimensional do viscosímetro



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a criação do modelo para impressão 3D no *Revit*, foi realizado o processo de fatiamento no software *Ultimaker Cura* no formato *Standard Template Library* (.stl). O fatiamento consiste em analisar a estrutura formada pelas linhas de impressão, simulando o procedimento de impressão. Como o modelo criado em *Revit* não é compatível com o software de fatiamento, foi realizada a devida conversão utilizando o plugin *STL Exporter for Revit*. A Figura 27 mostra a interface do software *Ultimaker Cura* e uma perspectiva do cilindro interno após o fatiamento.

Figura 27 - Fatiamento do cilindro interno



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, os componentes foram confeccionados através de uma impressora 3D do modelo *GTMAX3D CORE H5*, usado acrilonitrila butadieno estireno (ABS) como material-base.

### 3.4 Definição dos parâmetros vetoriais

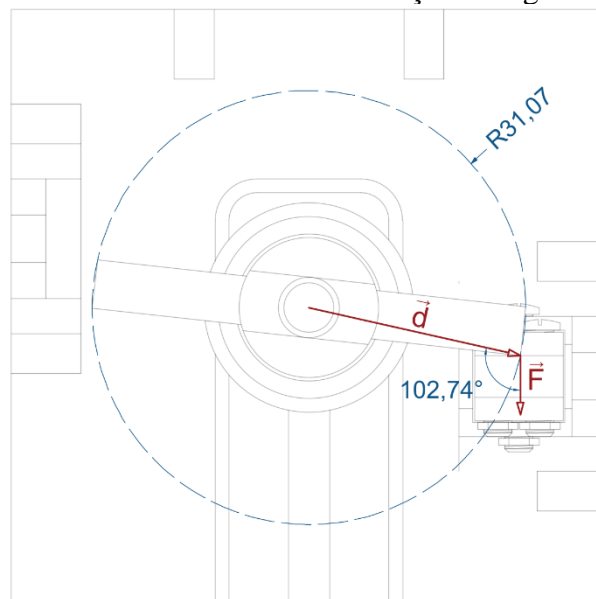
O torque a que está sujeito o cilindro interno foi medido por meio da reação à rotação. Na condição de equilíbrio, quando os braços de alavanca do cilindro interno tocam a célula de carga, tem-se um binário cujo valor é proporcional à distância do centro do cilindro

interno ao ponto de contato e igual ao torque aplicado pela força viscosa nas superfícies do cilindro interno, calculado através da Equação 48.

$$T = F \cdot d \cdot \sin \phi \quad (48)$$

Onde  $F$  é o módulo da força aplicada à célula de carga pelo braço de alavanca quando o cilindro interno gira, movido pela força viscosa,  $d$  é o módulo do vetor posição que descreve a distância do eixo ao ponto de aplicação da força na célula de carga e  $\phi$  é o menor ângulo entre  $F$  e  $d$ . Através do software *AutoCAD* foi determinado o módulo do vetor posição e o ângulo entre o vetor posição e a força aplicada na célula de carga, conforme mostra a Figura 28.

Figura 28 - Vetores deslocamento e força e o ângulo entre eles



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como mencionado anteriormente adota-se o ângulo como sendo o menor ângulo entre  $F$  e  $d$ , porém, como  $\phi$  e  $180^\circ - \phi$ , são ângulos complementares e  $\sin = \sin (180 - \phi)$ , foi usado o ângulo complementar de  $\phi$ , determinado conforme Figura 28, na equação 48. Dessa forma, a partir do *AutoCAD*, foi determinado o ângulo complementar como sendo  $102,74^\circ$ .

Desta forma, a viscosidade do fluido de interesse foi determinada a partir das equações 21, 36 e 43, tendo em conta o torque indicado na equação 48. Nesta perspectiva, no presente trabalho foram testados modelos de dinâmica do fluido para determinação da viscosidade, a saber:

- a) Perfil linear de velocidade do fluido com efeitos viscosos considerados apenas na superfície lateral do cilindro interno, com viscosidade determinada pela Equação 49:

$$\mu_{linear,db} = \frac{F \cdot d \cdot \sin \phi}{4\pi^2 R_i^2 f \left( \frac{R_e L}{R_e - R_i} \right)} \quad (49)$$

- b) Perfil linear de velocidade dos fluidos considerando efeitos viscosos na superfície lateral e base do cilindro interno, sendo a viscosidade determinada pela Equação 50:

$$\mu_{linear,cb} = \frac{F \cdot d \cdot \sin \phi}{4\pi^2 R_i^2 f \left( \frac{R_e L}{R_e - R_i} + \frac{R_i^2}{4h'} \right)} \quad (50)$$

- c) Perfil não-linear de velocidade do fluido com efeitos viscosos considerados apenas na superfície lateral do cilindro interno, com viscosidade determinada pela equação 51:

$$\mu_{n\tilde{a}o-linear} = \frac{F \cdot d \cdot \sin \phi}{4\pi^2 L f} \left( \frac{R_e - R_i}{R_e^2 R_i} \right) \quad (51)$$

Nas três hipóteses o torque foi determinado através da Equação 52, enquanto a frequência  $f$  da rotação foi determinada usando um leitor definido conforme subseção 3.5.1. Sabendo-se que o torque é dado por:

$$T = \overbrace{\text{leitura da célula} \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 [N]}^{\text{força}} \cdot \overbrace{31,07 \cdot 10^{-3} [m]}^{\text{braço de alavanca}} \cdot \sin 102,74^\circ \quad (52)$$

A subseção 3.5.2 apresenta a forma como a leitura da célula de carga foi realizada.

### 3.5 Conexões dos dispositivos

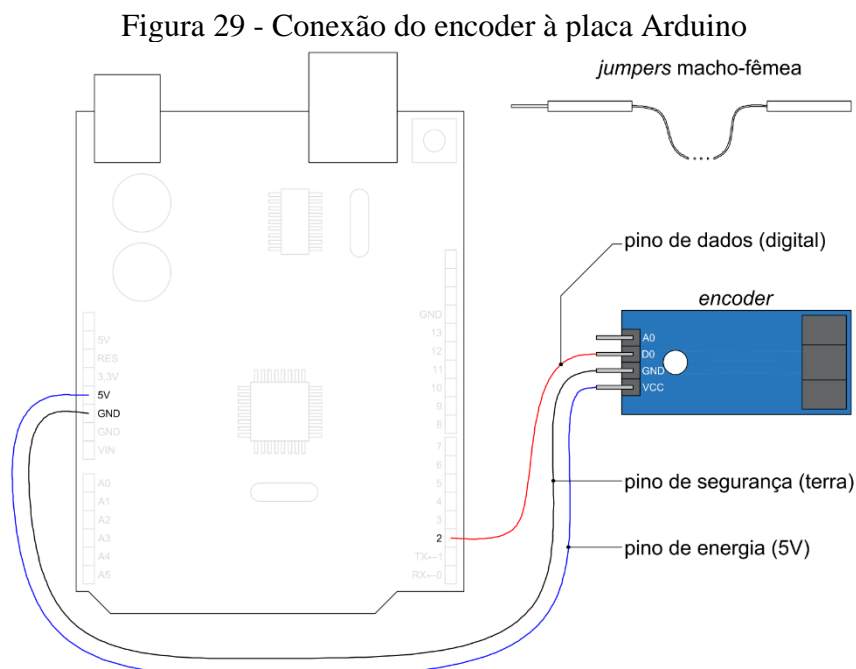
Para verificar a aplicabilidade dos dispositivos de leitura foi necessário verificar as leituras isoladamente de cada um dos componentes. Para isso, foram criadas rotinas utilizando a IDE do *Arduino* para a obtenção das informações através do leitor de velocidade angular/rotação (*encoder*) e, em seguida, da célula de carga. Os Apêndices C e D mostram cada uma das rotinas isoladamente enquanto o Apêndice E apresenta a rotina unificada, que é a empregada na realização dos experimentos para obtenção da viscosidade. Os comentários

necessários são feitos ao longo de cada um dos códigos, indicando a função de partes específicas e das variáveis utilizadas.

### 3.5.1 Leitor de velocidade angular/rotação (*encoder*)

O dispositivo emissor de pulsos (*encoder*) utilizado para leitura da frequência de rotação contém quatro terminais, sendo eles o terminal de energia (VCC), terminal de segurança (GND), terminal de dados digitais (D0) e terminal de dados analógicos (A0). Todos os terminais contêm pinos para que sejam feitas as conexões. O pino de energia foi conectado a uma porta 5V da placa *Arduino*; o pino de segurança, a uma porta GND; e o pino de dados digitais a uma porta numerada (2 a 11).

Como os pulsos lidos pelo *encoder* são valores inteiros (discretos), correspondentes a cada um dos obstáculos do disco utilizado para leitura da rotação (desenho 5 da Figura 19), foi utilizado o pino de dados digitais e não o pino de dados analógicos. A Figura 29 mostra o *encoder* e a conexão de seus pinos à placa *Arduino* através de *jumpers*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, para o funcionamento do leitor de velocidade angular, foi desenvolvido um algoritmo (ver Apêndice C) no qual foi indicado um número de obstáculos igual a 20 na variável



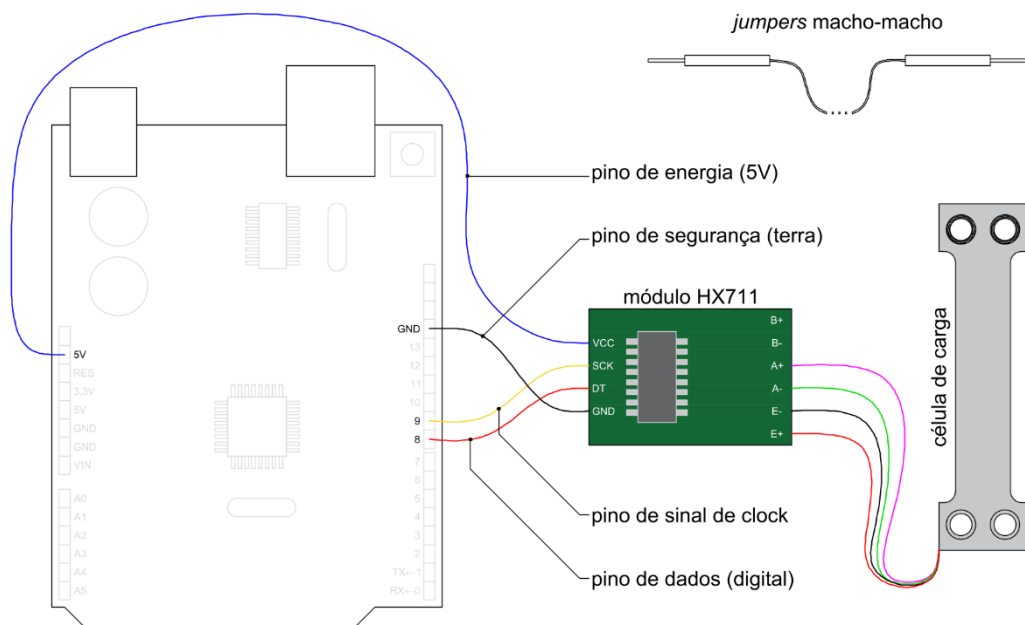
“pulsos\_por\_volta”, correspondente aos obstáculos reais presentes no disco para leitura da rotação (Figura 21).

### 3.5.2 Célula de carga

Para leitura do torque ao qual o cilindro interno está sujeito, os fios dos extensômetros da célula de carga foram conectados no módulo HX711 e este, por sua vez, conectado à placa *Arduino* através de uma *Protoboard*, considerando-se a ordem das conexões mostrada na Figura 30. Para que a leitura feita pelo dispositivo esteja correta é imprescindível que esta ordem das conexões seja seguida.

De maneira semelhante ao *encoder*, os pinos de energia (VCC) e de segurança (GND) foram conectados a portas de 5V e GND da placa *Arduino*, respectivamente. Já os pinos de dados (DT) e de sinal de clock (SCK) foram conectados às portas digitais disponíveis, enumeradas entre 2 e 11.

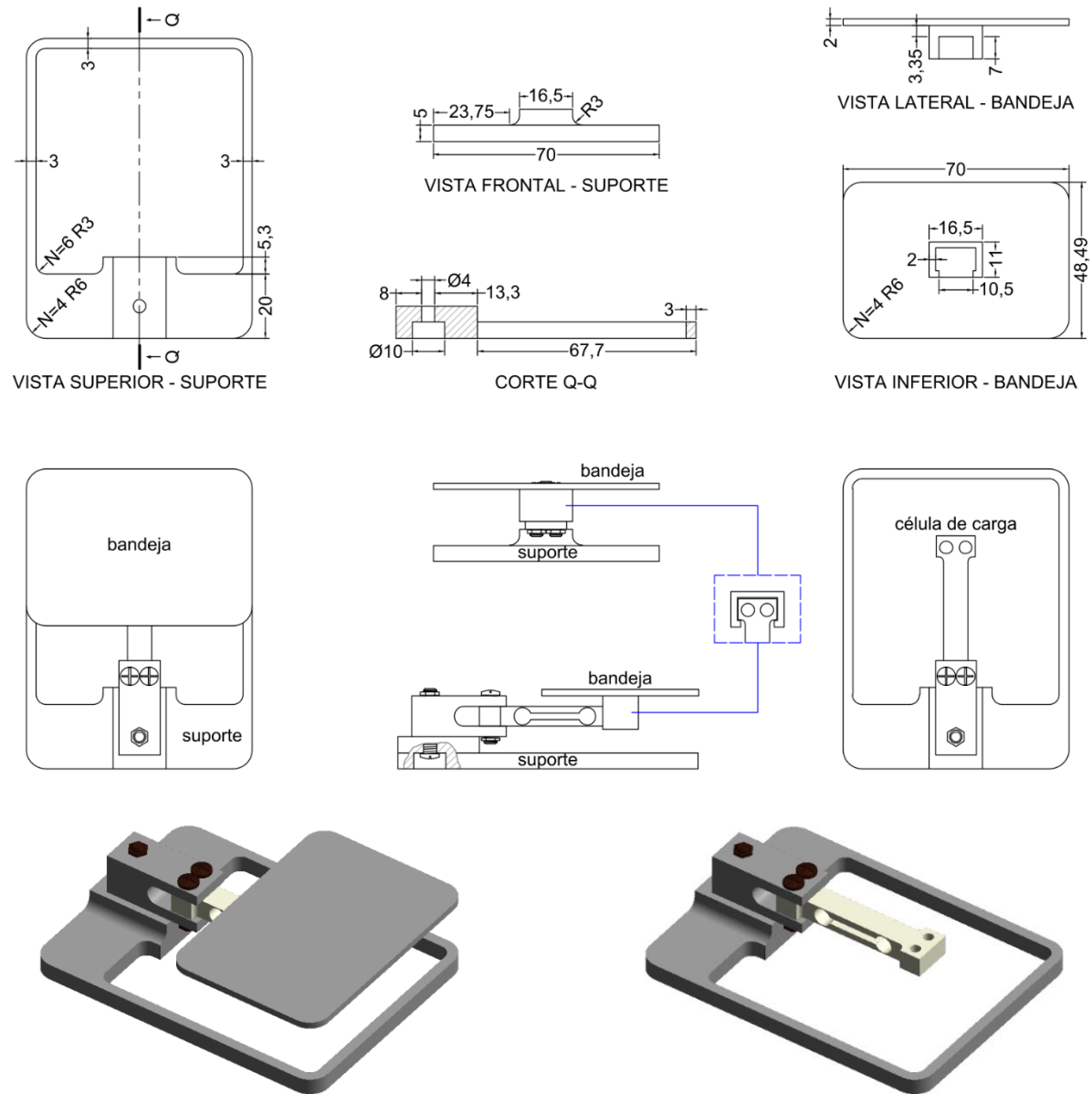
Figura 30 - Conexão da célula de carga/módulo HX711 à placa *Arduino*



Fonte: Elaborada pelo autor.

Posteriormente, para facilitar o processo de calibração da célula de carga foi desenvolvido, também por impressão 3D, um suporte (Figura 31) ao qual foi acoplada a célula de carga, funcionando de forma semelhante a uma balança de precisão convencional. As dimensões apresentadas estão em milímetros e as regiões hachuradas representam cortes.

Figura 31 – Projeto do dispositivo auxiliar de calibração da célula de carga

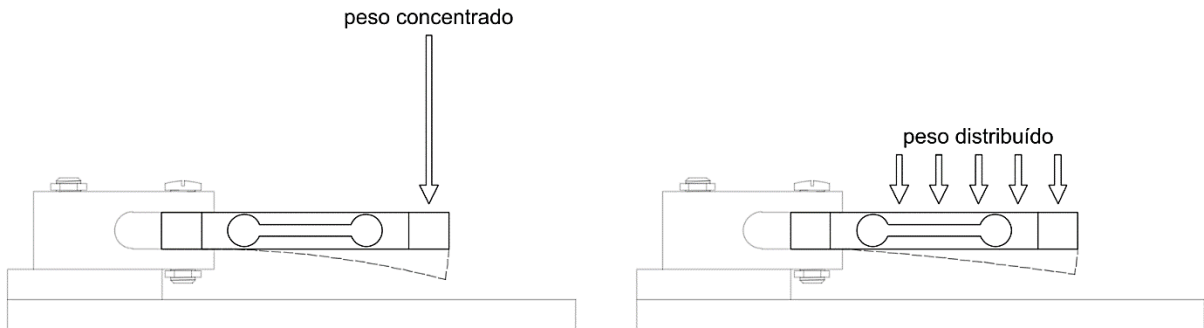


Fonte: Elaborada pelo autor.

Da Figura 31 vê-se que a bandeja do suporte foi concebida de tal modo que a soma do peso do objeto e da própria bandeja possa estar concentrada na região de encaixe da bandeja, assegurando configurações semelhantes entre a calibração e a utilização no protótipo para medir a viscosidade. Como o sinal produzido pelos extensômetros é função de seu alongamento, uma força concentrada na região de encaixe da bandeja com a célula de carga ocasiona uma deflexão mais curvilínea, com alongamentos maiores da superfície sob tração (face superior). Por isso, utilizar uma carga distribuída durante a calibração poderia levar a leituras incorretas quando instalada a célula de carga no suporte do protótipo. Além disso, como a aplicação de uma força pontual leva a maiores deflexões, aumenta-se a sensibilidade da célula de carga e,

consequentemente, a precisão das leituras. A Figura 32 mostra as deflexões causadas por esses dois tipos de distribuição de carga.

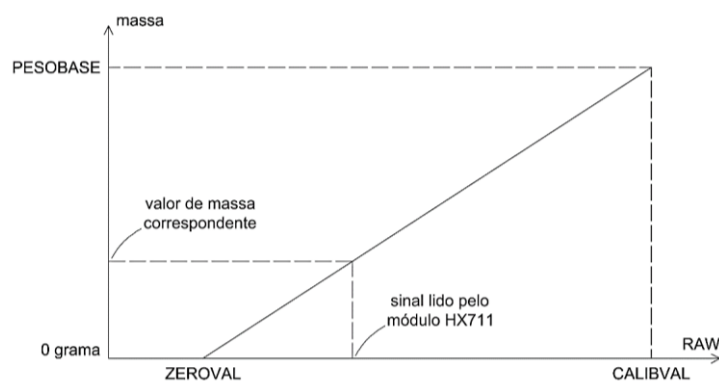
Figura 32 - Deflexão da célula de carga para diferentes distribuições de carga



Fonte: Elaborada pelo autor.

Realizada as devidas conexões, considerando-se os cuidados apresentados acima, a célula de carga foi, então, calibrada. Considerando o algoritmo mostrado no Apêndice D a calibração foi realizada em duas etapas. Primeiramente foi realizada a calibração do valor de RAW que corresponde à leitura na célula de carga que representa a medição de 0 grama. Em seguida, realizou-se a calibração do valor de RAW que corresponde à medição da carga máxima aferível pela célula. De forma mais detalhada, a calibração foi realizada por meio da interpolação dos valores indicados nas variáveis “ZEROVAL”, “CALIBVAL” e “PESOBASE” através da função “ConvertVal” do Algoritmo. Nesta função foi calculado um coeficiente de conversão para que, quando for realizada uma medição, um valor de massa seja obtido a partir do sinal elétrico captado dos extensômetros pelo módulo HX711, como mostra a Figura 33. O procedimento de calibração mostrado no Apêndice F:

Figura 33 - Funcionamento do algoritmo para obtenção da medida de massa



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como verificação adicional da correção das leituras, a própria bandeja do dispositivo auxiliar de calibração teve sua massa aferida pela célula de carga após a calibração, comparando-se o valor da medição com o que foi obtido da pesagem da mesma peça em uma balança de precisão Marte Mod. AD3300.

### **3.6 Procedimento experimental para ensaio da viscosidade e análise de custo**

Após a definição do motor e da célula de carga foi possível estabelecer os valores mínimos e máximos de viscosidade possíveis de serem aferidos pelo protótipo e, assim, definir os fluidos que foram ensaiados para obtenção da viscosidade (por apresentarem valores de viscosidade dentro dos limites de aferição do modelo). Para isso, com o protótipo completamente montado, deixando à parte apenas o cilindro interno (acoplado ao rolamento) e a estrutura de encaixe do rolamento, os ensaios de viscosidade foram realizados segundo os seguintes procedimentos:

- 1) O fluido a ser ensaiado foi colocado no cilindro externo até a marcação inferior do cilindro;
- 2) Em seguida, foram montadas as partes restantes (cilindro interno e estrutura de encaixe do rolamento) e verificados a reticidade dos cilindros e se o fluido atingia a marcação superior do cilindro externo;
- 3) Posteriormente, o cabo da placa *Arduino* foi conectado na porta USB do computador e a fonte de alimentação na tomada sem que o motor seja acionado;
- 4) Após isso, com o braço de alavanca do cilindro interno não tocando na célula de carga, o Monitor Serial foi aberto para verificar a correção de leitura da rotação e torque nulos antes do acionamento do protótipo;
- 5) Por fim, o motor foi acionado, de modo que o cilindro girasse em sentido horário, sendo verificada a estabilidade do arranjo e a reticidade da região intersticial entre os cilindros.

No ensaio da viscosidade foram realizadas ao todo 34 leituras para cada amostra. As 7 primeiras e 7 últimas leituras foram usadas para verificar a medição de rotação e torque nulos, já que nesses casos o motor está desligado. Nas leituras 8 a 27 o motor foi ligado e foram realizadas as leituras correspondentes. Com a finalidade de se ter maior controle e melhor análise das variáveis, através do Monitor Serial as informações de RAW, massa, torque equivalente e rotação foram constantemente monitoradas durante as leituras.

Seguindo os procedimentos mostrados em 3.4, os valores médios das leituras 8 a 27 e uma distância intersticial entre os cilindros ( $R_e - R_i$ ) igual a 3 mm, a viscosidade das amostras ensaiadas foram determinadas com base nas hipóteses de um perfil de velocidade linear (desconsiderando e considerando os efeitos do fluido entre as bases dos cilindros) e um perfil de velocidade não-linear. Então, os valores obtidos foram comparados com os valores esperados constantes na literatura e verificado o erro associado a cada uma das medições, observando qual das hipóteses melhor se adequou ao modelo.

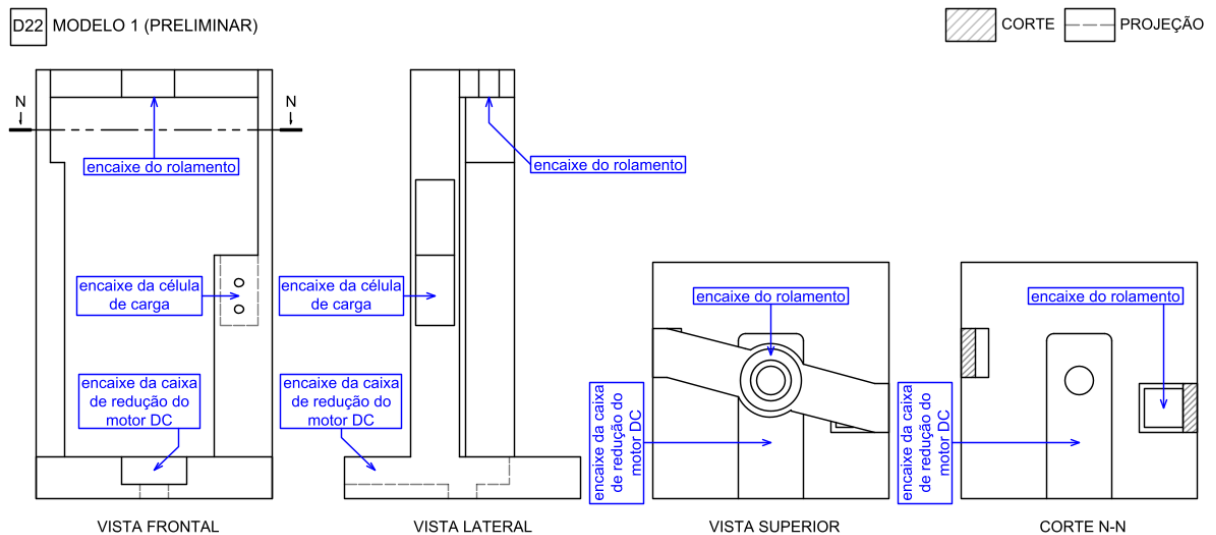
Por fim, foi realizado o comparativo entre o custo de construção do protótipo e o custo de aquisição de um viscosímetro rotacional de mercado. Para o primeiro, analisou-se o preço do material associado à quantidade utilizada para imprimir as peças do modelo com base em informações obtidas do software de fatiamento (*Ultimaker Cura*), acrescido do custo de aquisição dos dispositivos eletrônicos de leitura, de movimento e de comando e seus acessórios.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Evolução do modelo

Como se trata da construção de um protótipo, muitas arestas foram corrigidas ao longo do trabalho. Basicamente definiu-se um modelo e foram realizados testes preliminares para verificar sua aplicabilidade, incorporando os pontos positivos e eliminando os pontos negativos no modelo seguinte. Durante os testes não houve alterações consideráveis nos cilindros. As principais mudanças ocorreram no suporte. A seguir, são mostrados os três principais modelos desenvolvidos. A Figura 34 mostra o primeiro modelo elaborado. Neste modelo, todo o suporte foi construído como uma peça única, indivisível. Por conta disso, um problema inicialmente identificado foi que um dano em qualquer parte da estrutura leva a peça toda a tornar-se inútil.

Figura 34 - Modelo preliminar do suporte do viscosímetro



Fonte: Elaborada pelo autor.

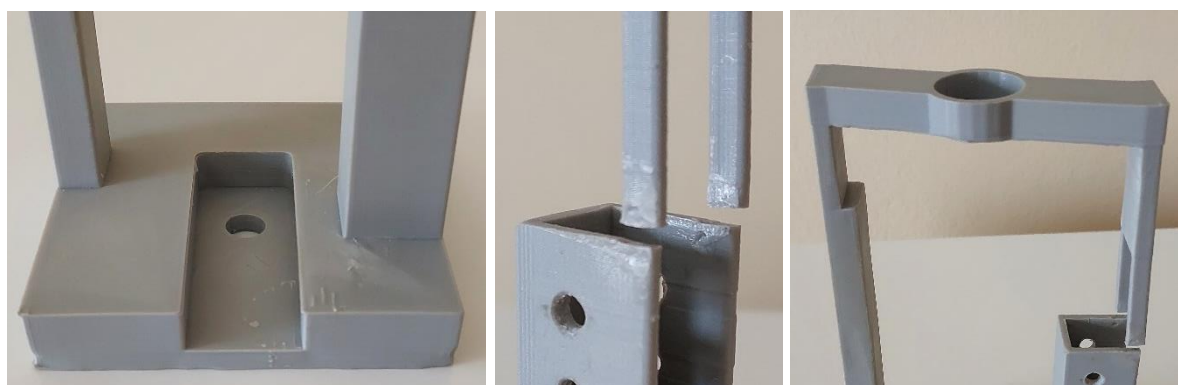
As principais falhas detectadas nesse modelo foram:

- I. Distância insuficiente entre a região de encaixe da caixa de redução do motor DC e a superfície sobre a qual o suporte foi colocado, fazendo com que um dos eixos da caixa de redução do motor tenha ultrapassado a base do suporte;
- II. Paredes finas próximas à região de inserção da célula de carga, tornando-as frágeis e suscetíveis a quebras e flexões excessivas da região superior da coluna;

- III. Dificuldade de inserção dos componentes do viscosímetro (cilindros interno e externo, célula de carga etc.) por conta de ausência de uma inclinação no cilindro interno na proximidade dos braços de alavancas e de marcações no cilindro externo para indicar o volume aproximado de fluido a ser ensaiado, levando a complicações para adição de fluido e para seu descarte após a prática experimental.

Na Figura 35 são apresentadas, no suporte construído, as principais falhas do modelo preliminar. Como se observa na figura central, devido à espessura da parede houve ruptura da estrutura após constante manuseio.

Figura 35 - Principais falhas do modelo preliminar construído

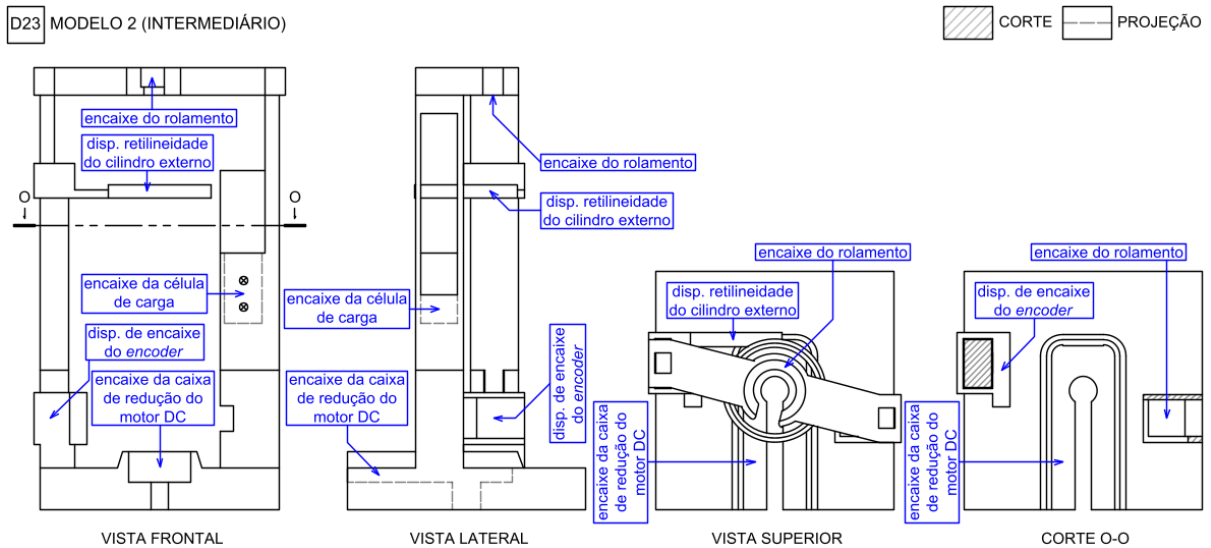


Fonte: Elaborada pelo autor.

Objetivando eliminar as falhas do modelo preliminar, tanto em relação à montagem dos componentes quanto à realização da prática experimental, foi desenvolvido um segundo modelo. A Figura 36 mostra o modelo intermediário. Para solucionar os problemas, esse modelo foi planejado de tal modo que o suporte não fosse uma peça única, mas desmontável, sendo dividido em uma base, duas colunas e a estrutura de encaixe do rolamento. Além disso, o modelo intermediário foi desenvolvido de modo que tenha uma distância adequada entre a região de encaixe da caixa de redução do motor DC e a superfície de apoio.

Na região de encaixe da célula de carga foi construída uma elevação para apoiar as finas paredes na lateral dessa região (como pode ser observado na vista lateral), conferindo-lhe maior resistência à quebra. Por fim, a nova estrutura de encaixe do rolamento apresenta uma saída lateral, planejada para facilitar a montagem e desmontagem dos cilindros. Nesse modelo também foram inseridos o dispositivo de retlineidade do cilindro interno a fim de garantir maior estabilidade do cilindro e o dispositivo de encaixe do *encoder* para medida da velocidade de rotação, além das marcações de volume no cilindro externo.

Figura 36 - Modelo intermediário do suporte do viscosímetro



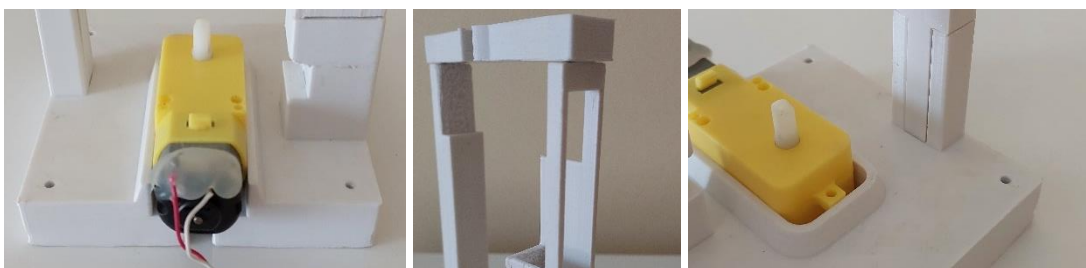
Fonte: Elaborada pelo autor.

No entanto, a tentativa de solucionar alguns dos problemas do modelo preliminar suscitaram a ocorrência de outros problemas, quais sejam:

- I. Vibração indesejada quando o motor é acionado devido à característica desmontável das peças do suporte;
- II. Leituras enviesadas da célula, em relação aos valores esperados, em virtude do surgimento de um esforço inicial na célula de carga causado pela estrutura elevada desenvolvida para melhorar a resistência das paredes do encaixe da célula;
- III. A Célula de carga com capacidade de 5kg se mostrou inadequada para o protótipo proposto, já que os valores esperados de leitura de força para a maioria dos fluidos são muito pequenos.

Na Figura 37 são apresentadas, no suporte construído, as modificações feitas no modelo intermediário, destacando-se o caráter desmontável desse modelo.

Figura 37 - Principais alterações empregadas no modelo intermediário construído



Fonte: Elaborada pelo autor.



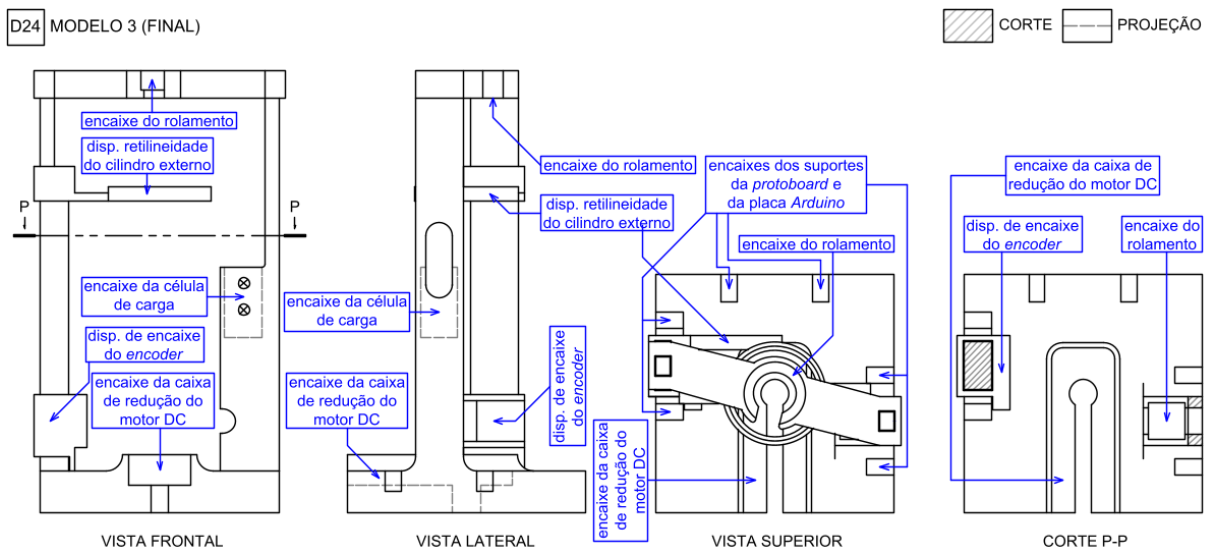
Finalmente, para manter os pontos positivos e eliminar os problemas observados nos modelos anteriores foi desenvolvido um terceiro modelo do protótipo. A Figura 38 mostra o modelo final. Para evitar vibrações excessivas, esse modelo não é totalmente desmontável, sendo que apenas a estrutura de encaixe do rolamento pode ser retirada. Desse modo são minimizadas as vibrações relacionadas às colunas verticais devido a sua fixação na base do suporte mas, não obstante, mantém-se a facilidade de montagem e desmontagem dos cilindros.

Para melhorar a resistência da estrutura o modelo foi projetado de modo a conter formas mais arredondadas, que podem ser observadas na região de encaixe da caixa de redução do motor DC e no encontro das colunas com a base do suporte, por exemplo. Outro ponto importante neste modelo é a região menos vazada para passagem dos fios da célula de carga na região de alocação da célula, o que confere maior espessura das paredes e, portanto, maior resistência a quebras e flexões da parte superior dessa coluna.

Neste modelo foram mantidas ainda as dimensões da região de alocação da célula de carga com capacidade de 5 kg, mas foi construído um dispositivo calço (dispositivo D15 na Figura 22) para células de capacidade de 100 g, 300 g, aumentando assim a faixa de sensibilidade de leitura de força, o que viabiliza a experimentação de fluidos de baixas e altas viscosidades.

Por fim, este modelo apresenta ainda suportes para encaixe da *protoboard* e da placa *Arduino* (Figura 24), pensados para organizar melhor esses componentes e evitar que atrapalhem o manuseio do protótipo durante a prática experimental.

Figura 38 - Modelo final do suporte do viscosímetro

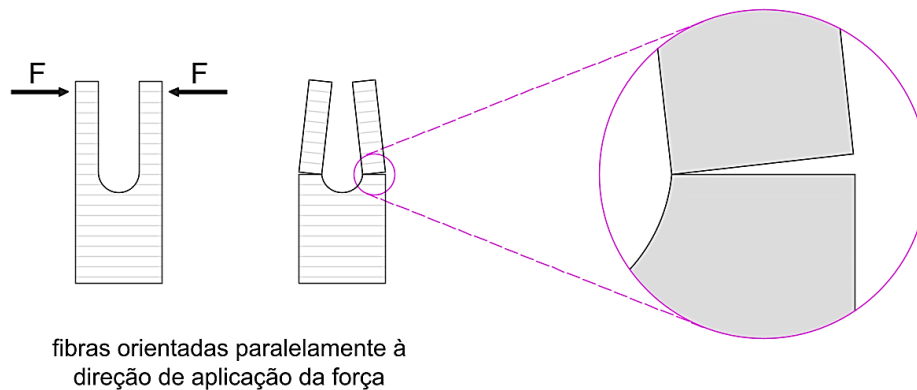


Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.2 Verificação da resistência do material e características dimensionais

Um dos fatores que se mostrou importante para ser considerado na análise da viabilidade do protótipo foi a resistência do material usado na construção das peças aos esforços a que está submetido durante o procedimento experimental. Foi observado durante o processo de impressão das peças que as linhas de impressão criam fibras que, se orientadas de forma incorreta, isto é, se estiverem paralelas à direção de aplicação dos esforços, podem ocasionar a quebra da estrutura da peça, como ilustrado no calço utilizado para encaixar a célula de carga de 100 g na coluna do suporte do viscosímetro mostrado na Figura 39, no qual, devido a fixação dos parafusos da célula e o manuseio durante a montagem ocorrem os esforços representados pela força  $F$ . Por conta disso, a impressão de uma peça deve levar em consideração as forças aplicadas sobre ela, sobretudo a direção de aplicação dessas forças.

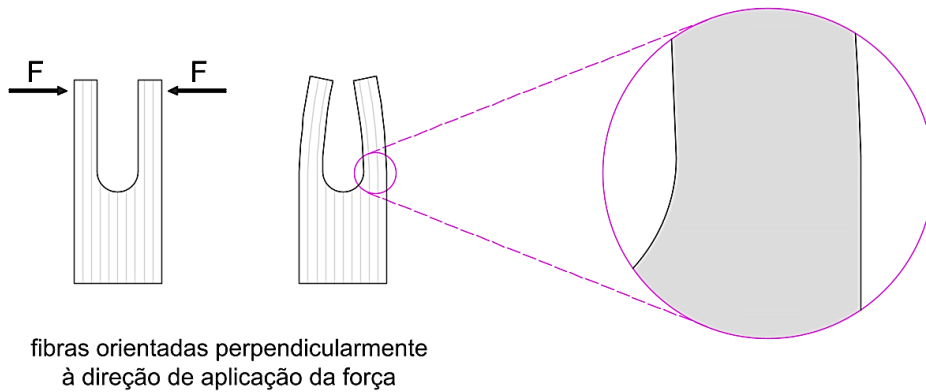
Figura 39 - Fibras orientadas paralelamente à direção de aplicação da força



Fonte: Elaborada pelo autor.

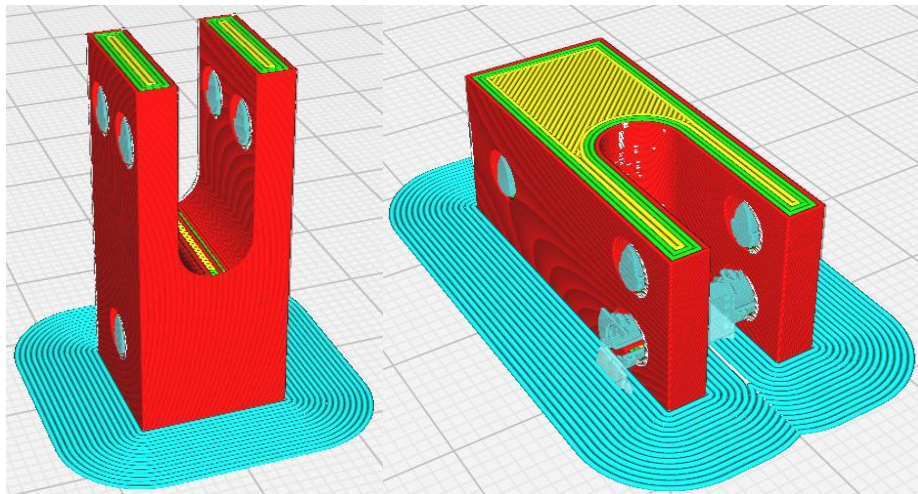
Com isso, o dispositivo deve ser construído de tal modo que as linhas de impressão criem fibras orientadas perpendicularmente à direção de aplicação da força (ver o exemplo do calço da célula de carga mostrado na Figura 40), especialmente nas estruturas que apresentam espessuras inferiores a 5 mm. Neste caso, foi observado que as fibras apresentam maior flexibilidade e impedem a ruptura da estrutura da peça, como pode ser observado pelo alinhamento perpendicular das fibras apontado no fatiamento de uma peça no software *Ultimaker Cura* mostrado na Figura 41.

Figura 40 - Fibras orientadas perpendicularmente à direção de aplicação da força



Fonte: Elaborada pelo autor.

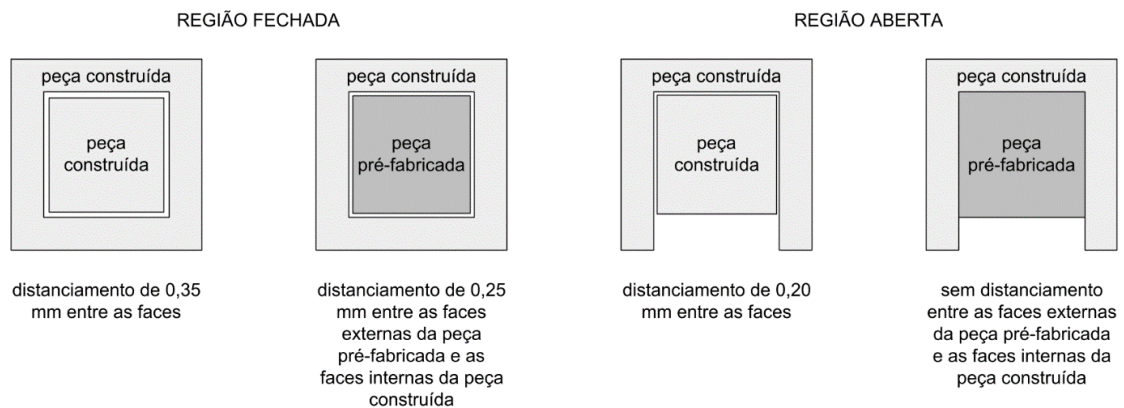
Figura 41 - Fatiamento com fibras paralelas e perpendiculares



Fonte: Elaborada pelo autor.

Adicionalmente, a respeito das peças foi observado experimentalmente que deve haver uma pequena folga entre as estruturas encaixadas para que se tenha o acoplamento adequado. A Figura 42 ilustra a folga adequada para cada tipo de encaixe. Para peças com regiões fechadas, como nos encaixes da célula de carga e do *encoder*, a folga foi de 0,25 mm, tendo em vista que estes dispositivos não exigem constantes acoplamentos e desacoplamentos. Em outras regiões fechadas, nas quais foi observada a necessidade de constantes trocas de peças ou sucessivos acoplamentos e desacoplamentos, como no encaixe do dispositivo de retlineidade do cilindro externo com a coluna do suporte, foi adotado um distanciamento de 0,35 mm por face. Já para o encaixe de peças construídas com regiões abertas foi adotada folga de 0,20 mm por face. Apenas a região de encaixe da caixa de redução do motor DC não foi projetada com folga por conta da necessidade de se manter o dispositivo bem fixado ao suporte.

Figura 42 - Folga recomendada entre peças construídas e pré-fabricadas

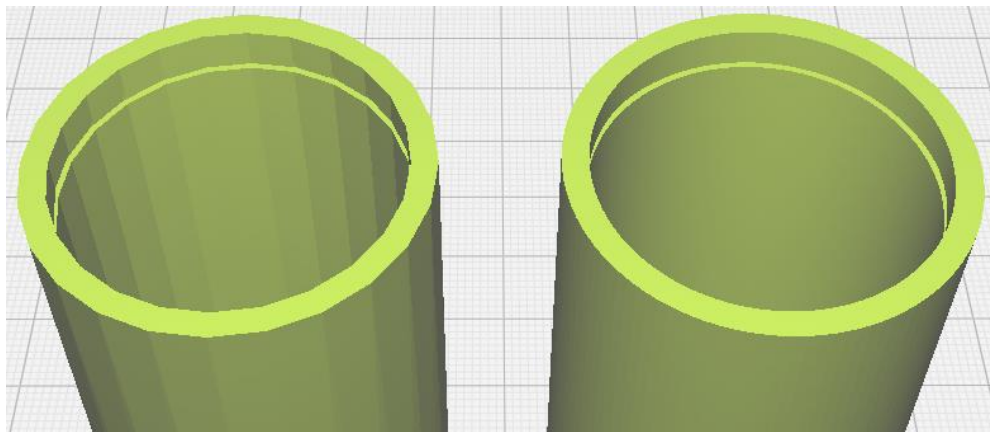


Fonte: Elaborada pelo autor.

### 4.3 Ordem de grandeza da modelagem tridimensional

Ainda a respeito das dimensões, foi observado que as unidades adotadas durante a modelagem tridimensional em *Revit* afetam a qualidade da impressão 3D. A princípio as peças haviam sido modeladas em milímetros, mas foram observados erros durante o processo de fatiamento, optando-se, em seguida, pela modelagem em metros. Por exemplo, as dimensões reais da base do suporte são 85,4 x 85,4 x 15,0 mm. Quando modelados em metros, essas dimensões passam a ser de 85,4 x 85,4 x 15,0 m. Importante mencionar que a escala na modelagem não afeta a escala no fatiamento, desde que no processo de conversão para o formato .stl, as coordenadas utilizadas sejam indicadas para a correta impressão da peça. A Figura 43 a seguir mostra o comparativo entre dois modelos do cilindro externo onde, à esquerda a modelagem foi feita em milímetros e à direita, em metros.

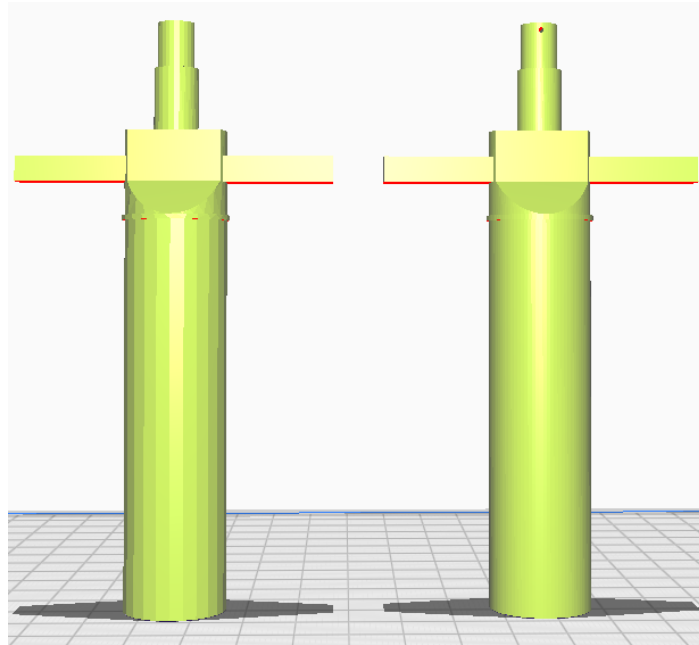
Figura 43 – Modelo tridimensional do cilindro externo



Fonte: Elaborada pelo autor.

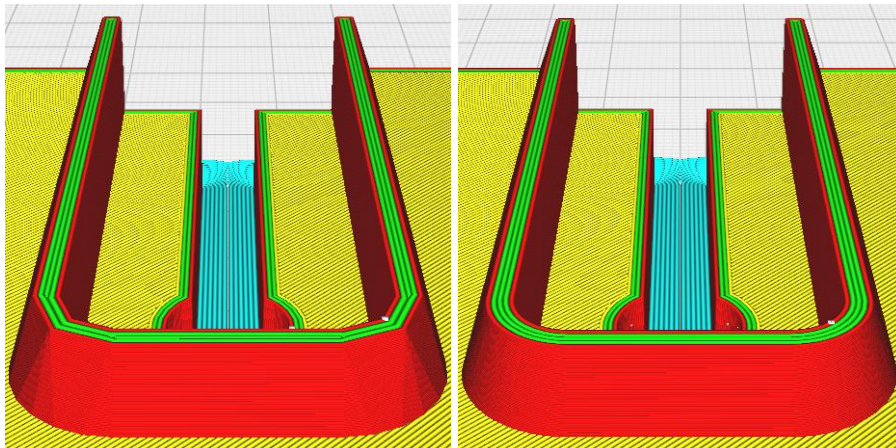
Na figura é possível observar no elemento à esquerda uma menor qualidade na superfície curva do cilindro, caracterizada por uma maior “discretização” da estrutura. Além disso, ao modelar em milímetros há uma dificuldade maior em criar formas de pequenas dimensões, já que o software *Revit* não permite criar extrusões ou vazios cuja espessura seja inferior a 1 mm. Comportamento similar foi constatado em outras superfícies curvas, como pode ser visto no cilindro interno (Figura 44) e no encaixe da caixa de redução do motor DC no Modelo Intermediário (Figura 45). Em tais figuras à esquerda é mostrada a modelagem feita em milímetros e à direita, em metros.

Figura 44 – Modelo tridimensional do cilindro interno



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 45 - Diferenças nas formas curvas no modelo intermediário



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para verificação dessa diferença na qualidade de impressão foram impressos dois cilindros, onde, na Figura 46, o elemento à esquerda foi modelado em milímetros e o elemento à direita, em metros. Como se pode ver, na prática mantém-se a tendência observada nas figuras anteriores.

Figura 46 - Cilindros externos impressos a partir de diferentes modelagens



Fonte: Elaborada pelo autor.

As imperfeições em superfícies curvas causadas pela modelagem em milímetros foi um ponto de preocupação especialmente no que se refere à região de contato dos cilindros com o fluido durante a utilização do protótipo, já que tais imperfeições poderiam comprometer o comportamento do fluido, não sendo possível assegurar, deste modo, a validade das hipóteses adotadas segundo as quais foram desenvolvidas as equações para obtenção da viscosidade. Diferentemente do observado em superfícies curvas, em regiões planas, como os braços de alavanca, não foram observadas diferenças significativas.

#### **4.4 Definição das características do motor e da célula de carga**

Utilizando as Equações 49, 50 e 51 para um fluido com viscosidade conhecida foi possível estimar a faixa de valores esperados para as medições da célula de carga e, conseqüentemente, o torque correspondente. A Tabela 1 mostra, considerando os perfis linear (ignorando e considerando os efeitos na região entre as bases) e não-linear de velocidade, os valores esperados para a força e o torque correspondente a que estaria submetido o cilindro externo ao rotacionar em diferentes velocidades, variando a frequência de rotação ( $f$ ) entre 30 e 600 rotações por minuto, quando ensaiada uma amostra de água a 20° e à pressão de 1 atm, cuja viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) é de 0,0010 Pa.s.

Tabela 1 – Valores esperados para força e torque (água a 20°C e a 1 atm)

f (rpm)	Perfil linear,sb		Perfil linear,cb		Perfil não-linear	
	massa (g)	torque (gf.cm)	massa (g)	torque (gf.cm)	massa (g)	torque (gf.cm)
30	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01
60	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02
90	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03
120	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03
150	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,04
180	0,01	0,04	0,01	0,04	0,02	0,05
210	0,01	0,05	0,02	0,05	0,02	0,06
240	0,02	0,05	0,02	0,05	0,02	0,07
270	0,02	0,06	0,02	0,06	0,02	0,08
300	0,02	0,07	0,02	0,07	0,03	0,09
330	0,02	0,07	0,02	0,07	0,03	0,09
360	0,03	0,08	0,03	0,08	0,03	0,10
390	0,03	0,09	0,03	0,09	0,04	0,11
420	0,03	0,09	0,03	0,10	0,04	0,12
450	0,03	0,10	0,03	0,10	0,04	0,13
480	0,03	0,10	0,04	0,11	0,04	0,14
510	0,04	0,11	0,04	0,12	0,05	0,14
540	0,04	0,12	0,04	0,12	0,05	0,15
570	0,04	0,12	0,04	0,13	0,05	0,16
600	0,04	0,13	0,04	0,14	0,05	0,17

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da Tabela 1 pode-se ver que é necessário utilizar uma célula de carga com boa precisão da medida de massa e que o motor possa apresentar grandes rotações, ou que os fluidos ensaiados tenham viscosidades bem maiores a 0,010 Pa.s. Importante mencionar ainda que devido ao fato do rolamento do eixo de rotação do cilindro interno apresentar algum atrito durante a rotação, impondo um torque resistivo que é de difícil detecção pela célula de carga, podem ocorrer valores um pouco menores que os descritos na tabela durante a prática experimental. Contudo, supõe-se que esta diminuição seja muito pequena.

Como se pode observar, os valores medidos pela célula de carga são proporcionais à rotação imposta ao cilindro externo, o que indica que a leitura da célula é de mais fácil detecção com o aumento da frequência de rotação, ou seja, a célula de carga torna-se mais precisa para esta situação. A precisão das leituras também está relacionada à sensibilidade de detecção do sinal elétrico produzido pelos extensômetros na célula de carga. Portanto, para melhorar a sensibilidade na detecção do sinal elétrico foi usado o módulo HX711 que permite elevar os 10 bits de informação da célula de carga para o valor de 24 bits, possibilitando assim

uma maior discretização do sinal elétrico recebido da célula e, conseqüentemente, aumentando a precisão do dispositivo.

Por fim, da Tabela 1 se observa que não é necessário que o motor tenha grandes capacidades de torque. Assim, considerando os dois aspectos mencionados, vê-se a necessidade de um motor com capacidade de grandes rotações e baixo torque, descartando a escolha por motores de passo ou servomotores, que apresentam baixa rotação e alto valor de torque. Experimentalmente foi observado ainda que rotações superiores a 400 rpm causam perda de estabilidade do cilindro interno, sendo necessário, portanto, um motor que tenha rotações inferiores a esse valor. Por isso foram escolhidos um motor DC de tensão de operação de 3-6V acoplado a uma caixa de redução de 1:48, cuja rotação é de cerca de 200 rpm operando à tensão máxima, e uma célula de carga de capacidade máxima de 100 g. A Figura 47 mostra os modelos do motor DC acoplado à caixa de redução (à esquerda) e da célula de carga de capacidade de 100 g (à direita) escolhidos para utilização no protótipo.

Figura 47 - Motor DC com caixa de redução e célula de carga de 100 g



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.5 Limites do modelo

Considerando as características mencionadas no tópico anterior e utilizando uma fonte de alimentação simétrica na entrada do conjunto motor/caixa de redução obteve-se rotações estáveis até próximo de 400 rpm. Assim, a partir disso foi possível estimar qual o intervalo de valores possíveis de viscosidade que podem ser medidos com o protótipo.

Considerando a célula de carga de 100 g, pode-se medir forças entre  $9,81 \cdot 10^{-5}$  N, equivalente a medição de 0,01 g (o algoritmo desenvolvido para a célula de carga fornece leituras com duas casas decimais de grama) e 0,981 N (equivalente a medição de 100 g). Sabendo-se que os raios dos cilindros interno ( $R_i$ ) e externo ( $R_e$ ) são, respectivamente, de 10



mm e 13 mm, que a altura da camada fluida ( $L$ ) é de 73,14 mm, que o comprimento do braço de alavanca ( $d$ ) é de 31,07 mm, que a distância entre as bases ( $h'$ ) é de 2 mm e que o ângulo entre os vetores  $F$  e  $d$  ( $\varphi$ ) é de  $102,94^\circ$  e usando rotação do motor mínima de 150 rpm e máxima de 400 rpm nas Equações 49, 50 e 51, obtém-se os valores na apresentados na Tabela 2 para a viscosidade dinâmica mínima e máxima para cada uma das hipóteses.

Como a viscosidade é proporcional à força aplicada pelo braço de alavanca e inversamente proporcional à frequência de rotação para qualquer uma das hipóteses, os pares de valores de mínima leitura de força e máxima rotação produzem os valores mínimos de viscosidade; a situação contrária, por sua vez, produz os valores máximos de viscosidade.

Tabela 2 – Viscosidade dinâmica mínima e máxima

Perfil de velocidade	Viscosidade mínima (Pa.s)	Viscosidade máxima (Pa.s)
perfil linear,db	0,00356	9,49627
perfil linear,cb	0,00371	9,88616
perfil não-linear	0,00274	7,30482

Fonte: Elaborada pelo autor.

Embora o torque mínimo que pode ser aferido pela célula de carga seja bem pequeno teoricamente e lembrando que o rolamento ao qual está acoplado o eixo do cilindro interno apresenta uma resistência natural à rotação por conta do atrito de suas próprias estruturas, fluidos com viscosidades muito pequenas podem não apresentar uma força viscosa que produza torque suficiente para vencer o torque resistido pelo rolamento. Com isso, considerar-se-á, a princípio, a viscosidade dinâmica mínima aferível como sendo em torno de 0,0040 Pa.s (4 cP) – valor aproximado da maior viscosidade mínima segundo a Tabela 2. A Tabela 3 mostra alguns fluidos que apresentam viscosidades dentro do intervalo apresentado na Tabela 2, a  $20^\circ\text{C}$ , e que podem ser ensaiados utilizando o protótipo proposto neste trabalho.

Tabela 3 – Fluidos aplicáveis para experimentação no protótipo

Amostra	$\mu$ (Pa.s) <sup>1</sup>
Mercúrio	0,0170
Óleo de oliva	0,0810
Óleo de motor SAE 10W30	0,1700
Glicerina	1,5200

Fonte: Elaborada pelo autor.

<sup>1</sup> Obtidos de Çengel e Cimbala (2012).

#### 4.6 Modelo construído

Concluído o ajuste do modelo e a definição das características adequadas do motor e célula de carga, então, deu-se prosseguimento à impressão das peças finais do protótipo. Na Figura 48 é mostrado o cilindro interno já acoplado ao rolamento em vistas frontal, lateral e superior. Na figura é possível observar, dentre outras coisas, a marcação utilizada para verificar a distância entre as bases dos cilindros.

Figura 48 - Cilindro interno acoplado ao rolamento



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 49 é mostrado o cilindro externo. Na imagem do centro pode-se ver as marcações para verificação de volume e, à direita, o detalhe da região de encaixe do cilindro com o disco para leitura da velocidade angular.

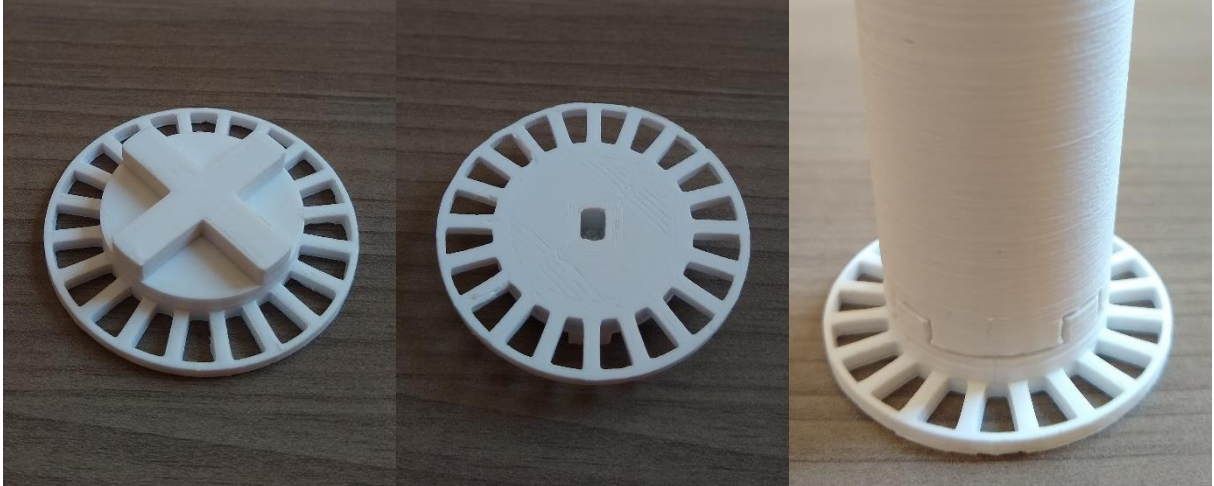
Figura 49 – Cilindro externo



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 50 mostra o disco de rotação para leitura da frequência angular numa vista superior (à esquerda) e inferior (à direita). Mostra ainda o detalhe do encaixe entre o disco e o cilindro externo.

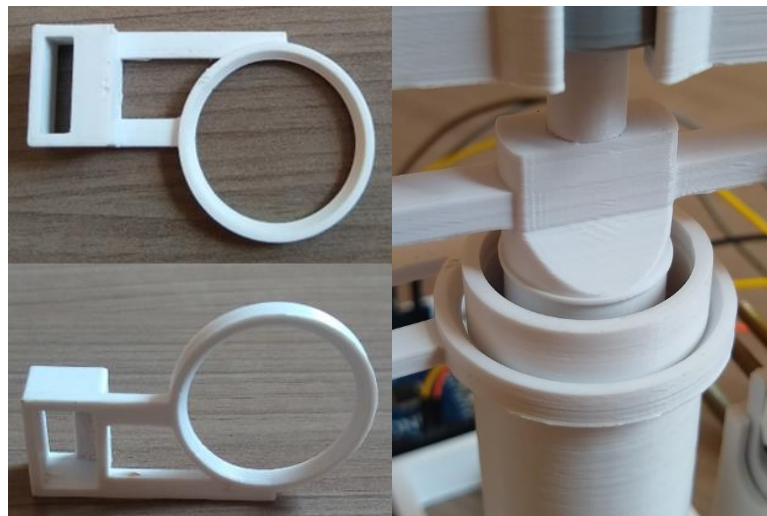
Figura 50 – Disco para leitura da velocidade angular



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 51 mostra o dispositivo de retlineidade do cilindro externo em vistas superior e inferior e um detalhe do encaixe do dispositivo com o cilindro.

Figura 51 – Dispositivo de retlineidade do cilindro externo

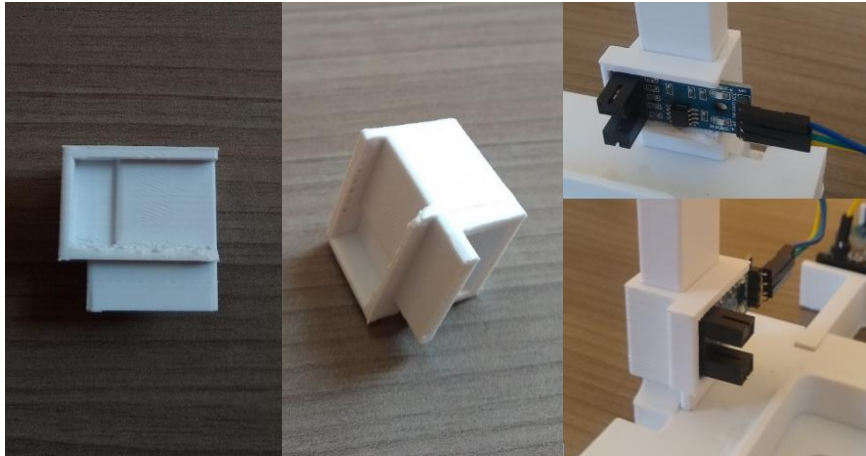


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 52 mostra o dispositivo de encaixe do *encoder*. À direita pode-se ver como é feito o acoplamento do *encoder* no dispositivo e como este se encaixa na coluna do suporte.

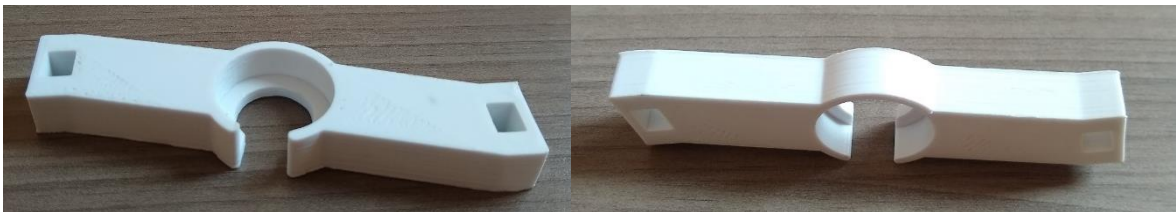
Por sua vez, as Figura 53 e 54 mostram a estrutura de encaixe do rolamento e a base do suporte, respectivamente.

Figura 52 - Dispositivo de encaixe do encoder



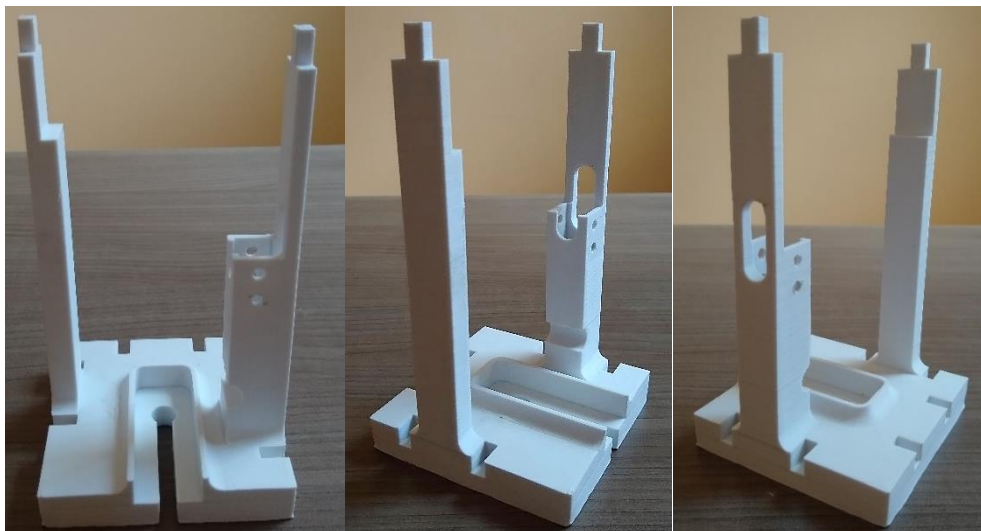
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 53 - Estrutura de encaixe do rolamento



Fonte: Elaborada pelo autor.

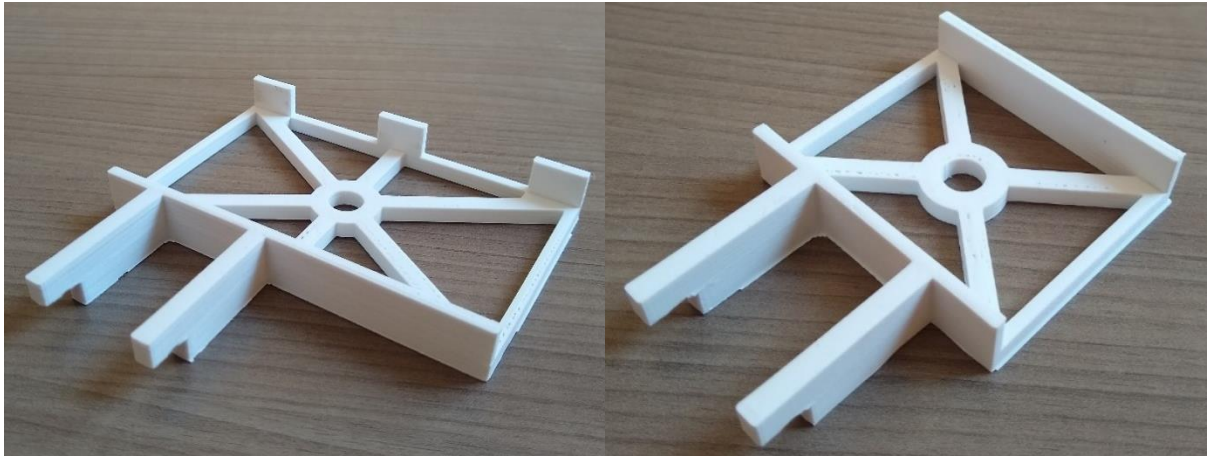
Figura 54 - Base do suporte



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 55 mostra os dispositivos auxiliares de encaixe da *protoboard* (à esquerda) e da placa *Arduino* (à direita).

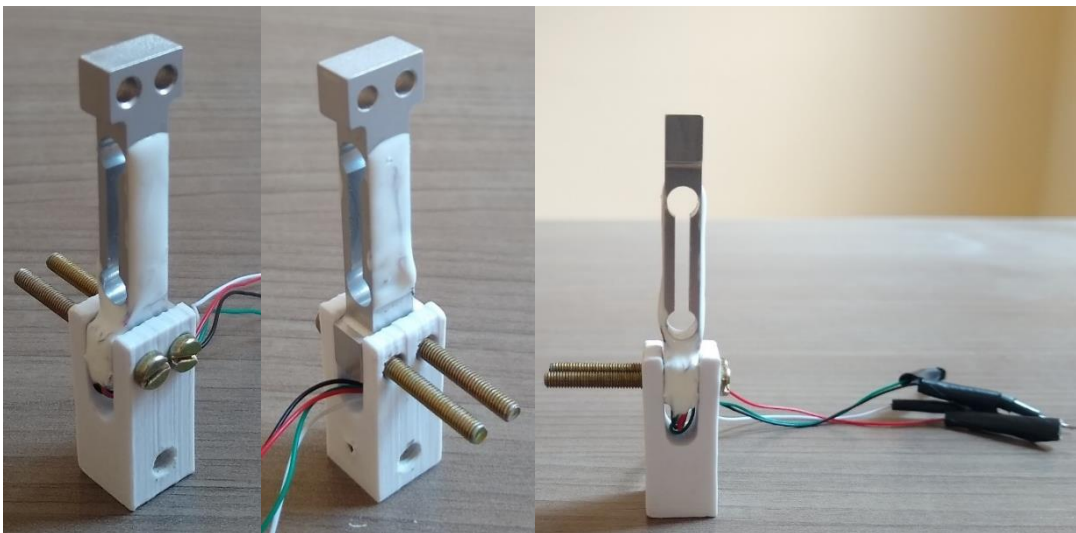
Figura 55 - Suportes da protoboard e da placa Arduino



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 56 mostra a célula de carga de capacidade máxima de 100 g de medição acoplada ao calço da célula. Neste ponto é importante ressaltar que, por observação experimental, os parafusos mostrados na figura, utilizados para prender a célula ao calço, não podem ficar muito apertados já que, neste caso, dada a sensibilidade dos extensômetros, esforços residuais poderiam fazer com que a célula realizasse medições imprecisas ou mesmo incorretas durante sua utilização.

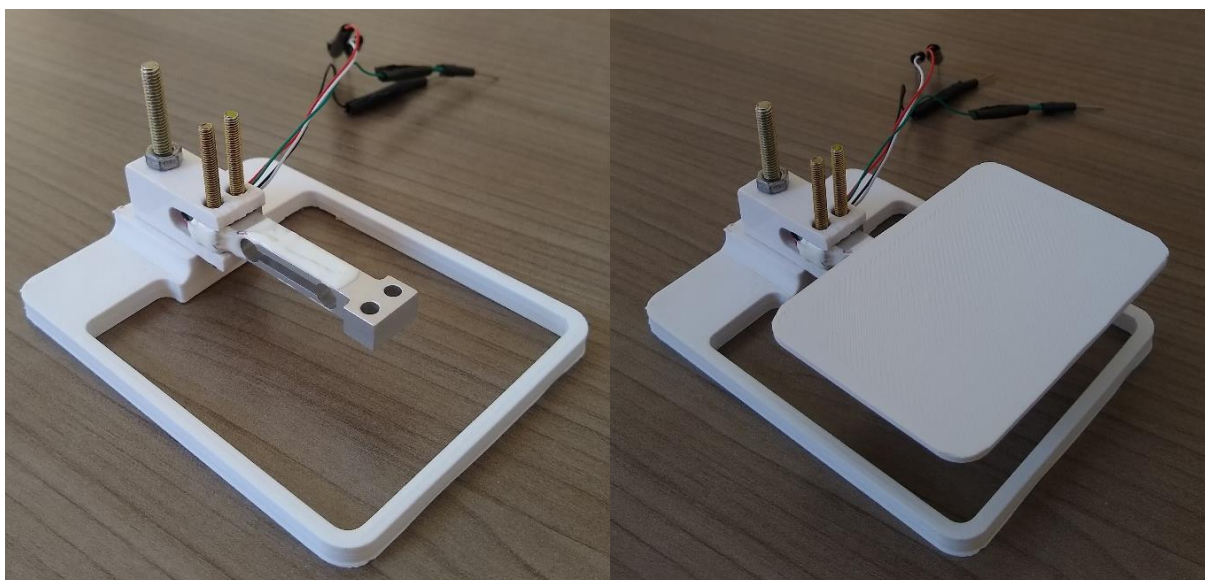
Figura 56 - Célula de carga e calço da célula



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 57 mostra o dispositivo auxiliar de calibração da célula de carga. Pelas razões já discutidas anteriormente, no procedimento de calibração, é importante que os objetos sejam colocados sobre a bandeja, não sendo recomendado colocá-los diretamente sobre a célula, mesmo quando isso for possível.

Figura 57 - Dispositivo auxiliar de calibração

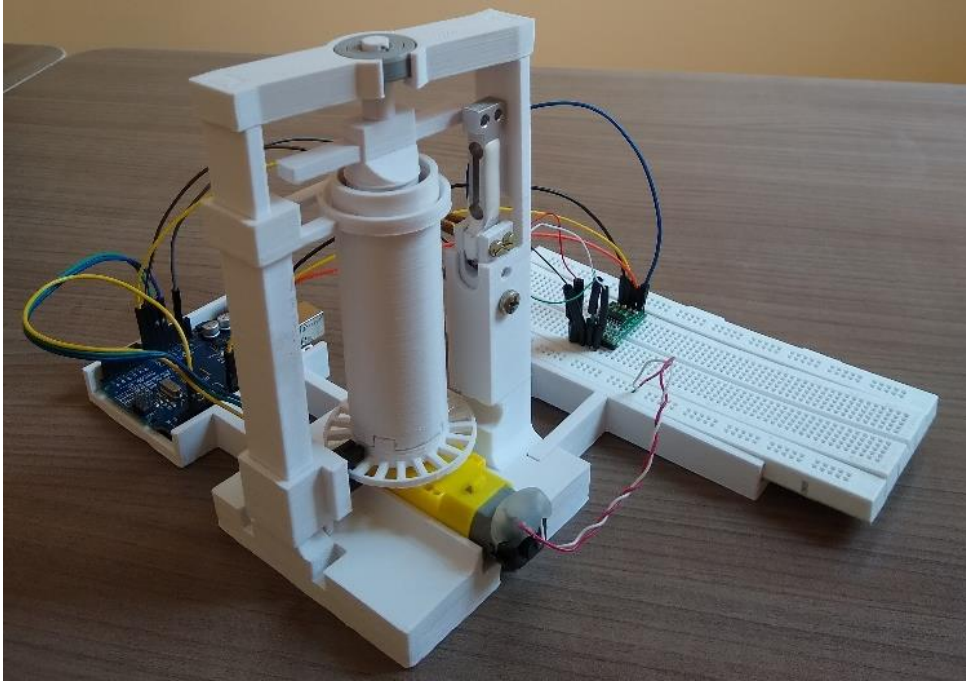


Fonte: Elaborada pelo autor.

Nas figuras são observadas pequenas imperfeições na base das peças e em regiões suspensas. Estas imperfeições são apenas refugo das estruturas utilizadas para manter a estabilidade das peças durante o processo de impressão, fixando-as à mesa ou auxiliando a construção das estruturas suspensas e não afetam as funções para as quais os modelos foram desenvolvidos.

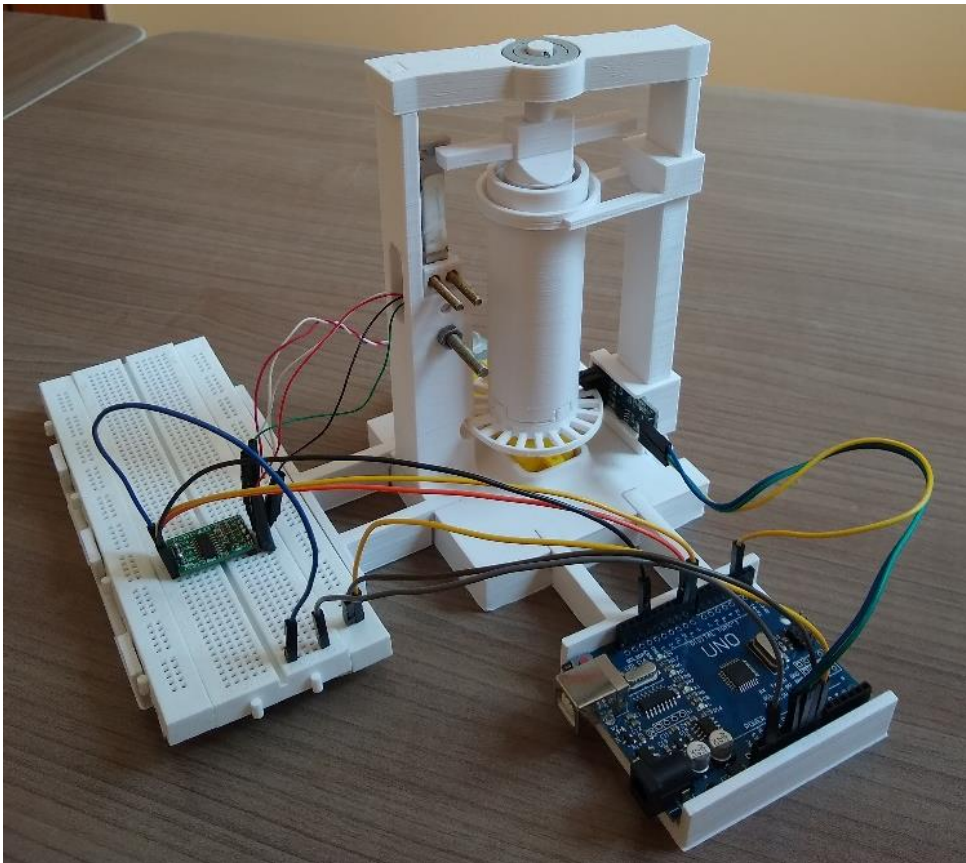
Finalmente, as Figuras 58 e 59 mostram o protótipo completamente montado. Na primeira imagem destacam-se os dispositivos de encaixe, o motor acoplado à caixa de redução e o encaixe da célula de carga, presa por parafusos ao braço do suporte. Já na segunda imagem são destacados a *proto board* e a placa *Arduino*, além da disposição dos fios dos dispositivos de leitura e movimento e *jumpers* utilizados nas ligações.

Figura 58 - Protótipo montado (vista frontal)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 59 - Protótipo montado (vista anterior)

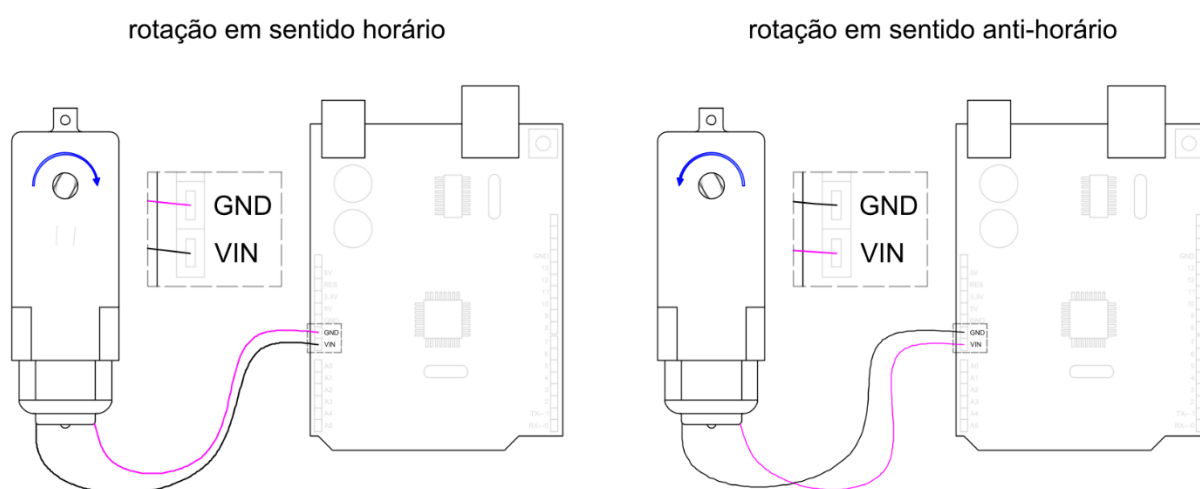


Fonte: Elaborada pelo autor.

O arranjo experimental completo, incluindo a disposição dos *jumpers* e outros fios de dados e alimentação utilizados no protótipo são mostrados no esquema do Apêndice B. É importante que seja utilizada uma fonte de alimentação externa para alimentação do motor DC, de maneira independente da porta de 5V da placa *Arduino*, de forma a evitar danos na placa. Neste trabalho foi utilizada uma fonte de 9V.

Como se pode ver na Figura 60, a disposição dos fios do motor DC indica o sentido de rotação do eixo (e do cilindro externo). Portanto, caso se deseje girar o eixo do motor e, por conseguinte, o cilindro externo em sentido contrário ao observado, basta trocar de posição os fios que vão para a porta GND do *Arduino* (terra) e para a porta de V.in (alimentação de entrada).

Figura 60 - Sentido de rotação do eixo do motor DC



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.7 Resultado da calibração da célula de carga

Ao realizar uma primeira medição com a célula de carga com a finalidade de calibrar a carga nula obteve-se um valor médio de -7,85 g para 20 leituras consecutivas, como mostra a Tabela 4. Arredondado o valor médio de RAW obtido da medição (795422) para 795420 e atribuindo-o à variável “ZEROVAL” no algoritmo, ao realizar uma segunda medição obteve-se o valor médio de -0,01 g para a mesma quantidade de leitura. Considerando que o erro é muito pequeno, já que está na casa centesimal de grama, deu-se a célula de carga como calibrada quanto ao valor nulo.



Tabela 4 – Calibração da massa 0 grama da célula de carga.

Leitura	Observado		Corrigido	
	RAW	Massa (g)	RAW	Massa (g)
1	795425	-7,85	795299	-0,01
2	795380	-7,86	795367	0,00
3	795329	-7,86	795349	0,00
4	795415	-7,85	795206	-0,01
5	795335	-7,86	795449	0,00
6	795343	-7,86	795254	-0,01
7	795321	-7,86	795325	-0,01
8	795400	-7,85	795463	0,00
9	795474	-7,85	795178	-0,01
10	795449	-7,85	795302	-0,01
11	795395	-7,86	795178	-0,01
12	795513	-7,85	795330	-0,01
13	795501	-7,85	795283	-0,01
14	795396	-7,86	795331	-0,01
15	795388	-7,86	795436	0,00
16	795452	-7,85	795301	-0,01
17	795501	-7,85	795320	-0,01
18	795413	-7,85	795348	0,00
19	795516	-7,85	795314	-0,01
20	795489	-7,85	795408	0,00
média	795422	-7,85	795322	-0,01

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida, para a calibração do valor máximo de medição da célula de carga, atribui-se o valor de 97,5 à variável “PESOBASE”, que é o valor em gramas referente à massa da bandeja do dispositivo auxiliar de calibração (aproximadamente 7,68 g) acrescida da massa dos objetos utilizados (aproximadamente 89,82 g).

Ao realizar a medição obteve-se um valor médio de 97,96 g para 20 leituras consecutivas, como mostra a Tabela 5. Arredondado o valor médio de RAW obtido da medição (2408437) para 2408430 e atribuindo-o à variável “CALIBVAL” no algoritmo, ao realizar uma nova medição obteve-se o valor médio de 97,51 g para a mesma quantidade de leitura. Observa-se, portanto, que o erro na leitura da célula de carga é de aproximadamente  $\pm 0,01$  g, mostrando que o dispositivo auxiliar de calibração apresenta boa precisão e acurácia.

Tabela 5 – Calibração da máxima leitura da célula de carga

Leitura	Observado		Corrigido	
	RAW	Massa (g)	RAW	Massa (g)
1	2408303	97,95	2408567	97,51
2	2408441	97,96	2408551	97,51
3	2408360	97,95	2408679	97,52
4	2408381	97,95	2408586	97,51
5	2408357	97,95	2408681	97,52
6	2408474	97,96	2408609	97,51
7	2408467	97,96	2408629	97,51
8	2408487	97,96	2408623	97,51
9	2408455	97,96	2408660	97,51
10	2408471	97,96	2408638	97,51
11	2408401	97,96	2408577	97,51
12	2408497	97,96	2408606	97,51
13	2408532	97,96	2408575	97,51
14	2408460	97,96	2408465	97,50
15	2408450	97,96	2408569	97,51
16	2408475	97,96	2408619	97,51
17	2408339	97,95	2408494	97,50
18	2408481	97,96	2408459	97,50
19	2408479	97,96	2408509	97,50
20	2408434	97,96	2408455	97,50
média	2408437	97,96	2408578	97,51

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como verificação adicional, foi medida ainda a massa da bandeja através do sistema e comparado com o valor medido por meio de uma balança de precisão Marte Mod. AD3300 (Figura 61). Os valores obtidos são mostrados na Tabela 63.

Figura 61 - Medição da massa da bandeja



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 6 – Medição da massa da bandeja  
do dispositivo auxiliar de calibração

Leitura	RAW	massa (g)
1	922190	7,67
2	922164	7,67
3	922184	7,67
4	922233	7,68
5	922125	7,67
6	922032	7,66
7	921982	7,66
8	921742	7,65
9	922776	7,71
10	922091	7,67
11	922329	7,68
12	922073	7,67
13	921979	7,66
14	922020	7,66
15	922146	7,67
16	922246	7,68
17	922453	7,69
18	922280	7,68
19	922286	7,68
20	922196	7,67
média	922176	7,67

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a calibração e instalação da célula de carga no suporte, foi observado que havia indicação de valores negativos da ordem de 2,90 gramas no Monitor Serial, como mostra a Figura 62. Isso ocorre porque a calibração foi feita usando a célula de carga na posição horizontal e desconsiderando a deflexão devida ao peso próprio (a célula tem massa entre 6 e 7 gramas). Quando instalada no protótipo, a célula fica em posição vertical e essa deflexão deixa de existir, o que faz sentido a medição de valores negativos. Como a calibração foi feita usando uma equação linear (Figura 31), a célula foi recalibrada, colocando o valor de RAW médio para -2,90 g na variável ZEROVAL no algoritmo do *Arduino* e descontando a diferença do valor de RAW na variável CALIBVAL. Graficamente, esse procedimento é equivalente a mover verticalmente a linha da função na Figura 63.

Figura 62 – Monitor Serial com o protótipo desligado

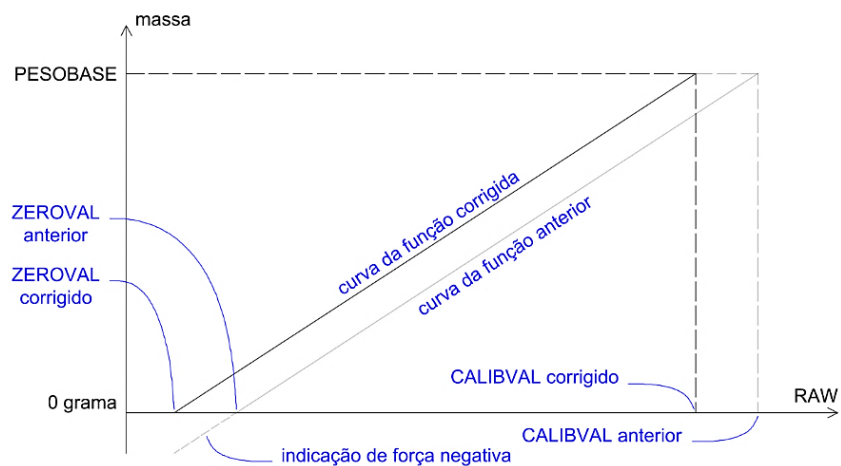
```

RAW: 747359 | Massa: -2.91 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747381 | Massa: -2.90 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747361 | Massa: -2.90 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747353 | Massa: -2.91 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747256 | Massa: -2.91 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747391 | Massa: -2.90 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747441 | Massa: -2.90 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747574 | Massa: -2.89 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747516 | Massa: -2.90 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747671 | Massa: -2.89 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747637 | Massa: -2.89 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747601 | Massa: -2.89 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747508 | Massa: -2.90 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747560 | Massa: -2.89 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747617 | Massa: -2.89 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747598 | Massa: -2.89 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747593 | Massa: -2.89 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747542 | Massa: -2.89 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747313 | Massa: -2.91 gramas | Rotação: 0 RPM
RAW: 747217 | Massa: -2.91 gramas | Rotação: 0 RPM

```

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 63 - Curva de calibração corrigida



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.8 Medição da viscosidade

Dos fluidos disponíveis apresentados na Tabela 3 foram realizados testes de viscosidade utilizando azeite de oliva, óleo de motor SAE 10W30 e glicerina. Nas tabelas 7, 8 e 9 são mostradas, respectivamente, para as amostras de azeite de oliva, óleo de motor SAE 10W30 e glicerina, a leitura, o estado do protótipo (se desligado ou ligado), a indicação de RAW (para verificações adicionais), a medição de massa, o torque equivalente, a rotação e uma condição adicional que indica quando o braço de alavanca toca a célula de carga. Este último ponto tem maior relevância no estudo de fluidos de baixa viscosidade.

A Tabela 7 mostra as medições feitas para uma amostra de azeite de oliva, cuja viscosidade é de aproximadamente 0,0810 Pa.s ou 81 cP, de acordo com as informações da Tabela 3. Pode-se ver que, dada a maior viscosidade do azeite, o braço de alavanca encosta na célula de carga imediatamente após ligado o protótipo. A massa média medida foi de 1,23 g (levando a um torque de 3,73 gf.cm), desvio-padrão de 0,02 g e a rotação média de 200 rpm.

Tabela 7 - Dados obtidos para a amostra de azeite de oliva

Leitura	Estado	RAW	m (g)	T (gf.cm)	f (rpm)	Condição
1	desligado	747320	-0,01	0,00	0	braço de alavanca não toca a célula de carga
2		747261	-0,01	0,00	0	
3		747291	-0,01	0,00	0	
4		747341	-0,01	0,00	0	
5		747313	-0,01	0,00	0	
6		747256	-0,01	0,00	0	
7		747173	-0,01	0,00	0	
8	ligado	767549	1,22	3,70	204	braço de alavanca toca a célula de carga
9		767693	1,23	3,73	201	
10		767915	1,25	3,79	205	
11		768343	1,27	3,85	203	
12		768021	1,25	3,79	200	
13		767947	1,25	3,79	201	
14		767544	1,22	3,70	202	
15		767391	1,21	3,67	197	
16		767245	1,21	3,67	196	
17		767385	1,21	3,67	200	
18		767292	1,21	3,67	199	
19		767418	1,22	3,70	198	
20		767333	1,21	3,67	198	
21		767533	1,22	3,70	201	
22		767875	1,24	3,76	200	
23		767861	1,24	3,76	199	
24		767697	1,23	3,73	199	
25	767717	1,23	3,73	198		
26	767783	1,24	3,76	201		
27	767480	1,22	3,70	200		
28	desligado	747495	0,01	0,03	0	braço de alavanca não toca a célula de carga
29		747472	0,01	0,03	0	
30		747456	0,01	0,03	0	
31		747450	0,01	0,03	0	
32		747489	0,01	0,03	0	
33		747486	0,01	0,03	0	
34		747347	0,00	0,00	0	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por sua vez, a Tabela 8 mostra as medições feitas para uma amostra de óleo de motor SAE 10W30, cuja viscosidade é de 0,1700 Pa.s ou 170 cP, de acordo com as informações da Tabela 3. A massa média medida foi de 2,63 g (levando a um torque de 7,96 gf.cm), desvio-padrão de 0,02 g e a rotação média de 197 rpm.

Tabela 8 - Dados obtidos para a amostra de óleo de motor SAE 10W30

Leitura	Estado	RAW	m (g)	T (gf.cm)	f (rpm)	Condição
1	desligado	747599	0,01	0,03	0	braço de alavanca não toca a célula de carga
2		747608	0,01	0,03	0	
3		747488	0,01	0,03	0	
4		747521	0,01	0,03	0	
5		747436	0,00	0,00	0	
6		747561	0,01	0,03	0	
7		747271	-0,01	0,00	0	
8	ligado	790467	2,60	7,88	195	braço de alavanca toca a célula de carga
9		790395	2,60	7,88	191	
10		791229	2,65	8,03	200	
11		791329	2,65	8,03	203	
12		790972	2,63	7,97	201	
13		790634	2,61	7,91	196	
14		790759	2,62	7,94	203	
15		790589	2,61	7,91	196	
16		790717	2,62	7,94	197	
17		791052	2,64	8,00	195	
18		791095	2,64	8,00	200	
19		791064	2,64	8,00	196	
20		791050	2,64	8,00	201	
21		791175	2,64	8,00	199	
22		791181	2,64	8,00	200	
23		790864	2,62	7,94	193	
24		791108	2,64	8,00	201	
25	790521	2,60	7,88	195		
26	790592	2,61	7,91	195		
27	791082	2,64	8,00	198		
28	desligado	747435	0,00	0,00	0	braço de alavanca não toca a célula de carga
29		747282	-0,01	0,00	0	
30		747343	-0,01	0,00	0	
31		747392	0,00	0,00	0	
32		747327	-0,01	0,00	0	
33		747333	-0,01	0,00	0	
34		747340	-0,01	0,00	0	

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 9 mostra os valores obtidos para uma amostra de glicerina, cuja viscosidade é, da Tabela 3, 1,5200 Pa.s ou 1520 cP. As leituras 8, 9 e 10 não foram consideradas para efeito de cálculo do torque e rotação já que, nessas leituras, devido à alta viscosidade, o cilindro interno não apresentava estabilidade, o que foi alcançado a partir da leitura 11.

Tabela 9 - Dados obtidos para a amostra de glicerina

Leitura	Estado	RAW	m (g)	T (gf.cm)	f (rpm)	Condição
1	desligado	747965	0,01	0,03	0	braço de alavanca não toca a célula de carga
2		747983	0,01	0,03	0	
3		748070	0,01	0,03	0	
4		748079	0,01	0,03	0	
5		748080	0,00	0,00	0	
6		748077	0,01	0,03	0	
7		747963	-0,01	0,00	0	
8	ligado	1038502	17,56	53,23	204	braço de alavanca toca a célula de carga
9		1035068	17,36	52,63	206	
10		1030294	17,07	51,75	203	
11		1020078	16,44	49,84	205	
12		1018981	16,38	49,66	207	
13		1019926	16,44	49,84	212	
14		1019469	16,41	49,75	204	
15		1019981	16,44	49,84	202	
16		1019946	16,44	49,84	202	
17		1019475	16,41	49,75	204	
18		1019060	16,38	49,66	206	
19		1019479	16,41	49,75	208	
20		1019482	16,41	49,75	210	
21		1019027	16,38	49,66	209	
22		1020022	16,44	49,84	206	
23		1019075	16,38	49,66	198	
24		1018963	16,38	49,66	205	
25	1019521	16,41	49,75	199		
26	1020012	16,44	49,84	204		
27	1019487	16,41	49,75	199		
28	desligado	748418	0,03	0,09	0	braço de alavanca não toca a célula de carga
29		748516	0,03	0,09	0	
30		748405	0,03	0,09	0	
31		748467	0,03	0,09	0	
32		748412	0,03	0,09	0	
33		748429	0,03	0,09	0	
34		748402	0,03	0,09	0	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base nas leituras, a massa média obtida foi de 16,41 g (levando a um torque de 49,75 gf.cm), desvio-padrão de 0,02 g e a rotação média de 204 rpm.

Após os experimentos foi realizado um estudo inicial para verificar a viscosidade medida a partir de valores apresentados nas Tabelas 7, 8 e 9 para as hipóteses do perfil linear desconsiderando a região da base, do perfil linear considerando a região da base e o do perfil não linear. O que se observou inicialmente foi que os valores de massa medidos pela célula de carga foram próximos dos valores esperados, ora menores, ora maiores, a depender da hipótese adotada. A Tabela 10 mostra resumidamente os valores de massa esperada e os valores medidos experimentalmente.

Tabela 10 - Valores de massa esperados e valores medidos

Amostra	Valores esperados de massa (g)			Valores observados (g)
	Perfil linear,db	Perfil linear,cb	Perfil não-linear	
Azeite de oliva	1,14	1,18	1,48	1,23
Óleo SAE 10W30	2,36	2,45	3,07	2,63
Glicerina	21,84	22,70	28,39	16,39

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme dito anteriormente, esperava-se que os valores medidos de massa pudessem ser inferiores aos valores teoricamente esperados, já que o rolamento poderia interferir na rotação do cilindro interno. O que se observou, no entanto, foram valores tanto menores quanto maiores, o que indica que o torque das forças resistivas geradas no rolamento parece não interferir na rotação do cilindro interno. A seguir são mostrados na Tabela 11, para cada uma das hipóteses, os valores de viscosidade aferida para os três fluidos considerando o torque e rotação mostrados nas Tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 11 - Viscosidade medida e valores de referência

Perfil de velocidade	Azeite de oliva		Óleo SAE 10W30		Glicerina	
	$\mu$ (Pa.s)	Erro (%)	$\mu$ (Pa.s)	Erro (%)	$\mu$ (Pa.s)	Erro (%)
Perfil linear,db	0,0876	8,12	0,1894	11,39	1,1416	-24,89
Perfil linear,cb	0,0843	4,01	0,1822	7,16	1,0982	-27,75
Perfil não-linear	0,0674	-16,83	0,1457	-14,31	0,8782	-42,23
Valores de referência	0,0810	-	0,1700	-	1,5200	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir das informações da Tabela 11, pode-se ver que o perfil linear que considera o efeito da camada fluida entre as bases dos cilindros apresenta valores de viscosidade mais



próximos dos valores reais de viscosidade para o azeite de oliva e o óleo de motor, com erro de aferição de 4% e 7%, respectivamente. Já para a glicerina, a hipótese que melhor se adequa é a que desconsidera o fluido na região entre as bases. Por conta disso, assume-se que a primeira hipótese descreve melhor o comportamento dos fluidos em geral. O valor da viscosidade da glicerina com erro de aproximadamente 28% para a mesma hipótese deve-se, por conta da maior viscosidade deste fluido, à dificuldade em manter esse material à mesma temperatura que os demais, isto é, 20°C, apresentando, *provavelmente*, temperatura pouco maior que o indicado, o que explicaria a diminuição da viscosidade.

Idealmente seria necessário realizar experimentos com o maior número de amostras possíveis de diversos fluidos, ensaiando-os em um viscosímetro produzido industrialmente e no protótipo, comparando-se os valores obtidos por cada um deles. Isso possibilitaria entender melhor as limitações do protótipo e realizar um ajuste fino da função, se necessário. Entretanto, devido às limitações do Câmpus, não foi possível realizar testes utilizando um viscosímetro comercial.

#### 4.9 Análise de custo de construção do protótipo

Finalmente, um dos pontos que deve ser levado em consideração na elaboração de projetos desta natureza é o custo envolvido na construção do modelo. A Tabela 12 mostra o custo de aquisição dos dispositivos eletrônicos de leitura e movimento e dos dispositivos de comando, além dos *jumpers* utilizados para conectar os dispositivos e a fonte de alimentação de 9V utilizada nos experimentos.

Tabela 12 - Quantidade de dispositivos eletrônicos e custo de aquisição

Componente	Quantidade	Custo (R\$)
Célula de carga de 100 g	1	46,90
<i>Encoder</i>	1	18,49
Fonte de alimentação 9V	1	25,00
<i>Jumpers</i>	10	24,90
Módulo HX711	1	16,49
Motor DC + caixa de redução	1	15,90
Placa <i>Arduino</i> UNO R3	1	109,99
<i>Protoboard</i>	1	17,90
<b>Total</b>		<b>275,57</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por sua vez, a Tabela 13 mostra o custo relacionado à impressão 3D de cada um dos componentes do protótipo utilizando os valores obtidos do software *Ultimaker Cura* logo após o fatiamento de cada uma das peças. A tabela apresenta a massa ( $m$ ) total da peça, incluindo as estruturas auxiliares utilizadas durante o procedimento de impressão, o comprimento ( $L$ ) de filamento utilizado na impressão da peça e, por fim, o custo referente à impressão da peça com base no valor do filamento, ignorando o consumo de energia da impressora. Configurando, no software, o material como sendo ABS e o preço de 1 kg de filamento como sendo R\$109,00, tem-se:

Tabela 13 - Custo de impressão dos componentes do protótipo

Componente	m (g)	L (m)	Custo (R\$)
Base do suporte	62,0	8,80	6,73
Calço da célula de carga	3,0	0,41	0,32
Cilindro externo	20,0	2,86	2,19
Cilindro interno	20,0	2,79	2,14
Disco p/ leitura da vel. angular	5,0	0,71	0,54
Disp. auxiliar de calibração (bandeja)	9,0	1,22	0,93
Disp. auxiliar de calibração (suporte)	10,0	1,41	1,08
Disp. de reticidade do cil. externo	5,0	0,65	0,50
Estrutura de encaixe do rolamento	8,0	1,17	0,89
Rolamento	2,0	0,30	0,23
Suporte da placa <i>Arduino</i>	17,0	2,42	1,85
Suporte da <i>protoboard</i>	22,0	3,16	2,42
Suporte do <i>encoder</i>	5,0	0,71	0,55
<b>Totais</b>	<b>188,0</b>	<b>26,61</b>	<b>20,37</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, o custo total de construção do protótipo é, de acordo com as tabelas anteriores, de R\$ 295,94. Comparando-se com viscosímetros rotacionais de mercado que têm preço da ordem de R\$25.700,00, de acordo com resultado do Pregão Presencial SESI/SENAI nº 276/2017, o custo necessário para se produzir o protótipo apresentado neste trabalho representa, em média, menos de 1,2% do custo de aquisição dos dispositivos comerciais.

## 5 CONCLUSÃO

Reconhecida a importância das práticas experimentais no contexto dos critérios estabelecidos pelas Diretrizes Curriculares Nacionais para os cursos de engenharia, da elaboração de ações que tenham por objetivo aprimorar o processo de ensino-aprendizagem e o desenvolvimento intelectual e profissional dos estudantes e de buscar formas alternativas que atenuem os problemas que envolvem a aquisição de instrumentos de laboratório, este trabalho buscou desenvolver técnicas e ferramentas que possibilitem a criação de protótipos de baixo custo que possam ser utilizados em práticas experimentais. Para isso, verificou a viabilidade da aplicação de impressão 3D e *Arduino* na construção de um viscosímetro rotacional.

Com base nos resultados, pode-se inferir que as peças construídas através de impressão 3D apresentam qualidade suficiente para serem utilizadas na montagem de protótipos, mostrando boa precisão das dimensões, inclusive de regiões curvas, e boa resistência do material, contanto que sejam dimensionadas em metros no software de construção do modelo tridimensional e construídas de modo que as linhas de impressão estejam orientadas perpendicularmente à direção dos esforços aplicados, quando necessário. De modo geral, é necessário também que as estruturas construídas por impressão 3D tenham pelo menos 2 mm de espessura para que se garanta a resistência do material.

Para funcionamento do protótipo podem ser utilizados motores DC acoplados a caixas de redução e alimentados por fontes externas entre 9V e 12V para a rotação do cilindro externo, ou uma fonte simétrica quando se queira variar a rotação de maneira controlada. Também podem ser usados dispositivos emissores de pulso, como um *encoder* com acoplador óptico, para leitura da frequência de rotação do cilindro externo. Para a medição do torque podem ser utilizadas células de carga que tenham baixa capacidade de carga, como as que são utilizadas em balanças de precisão. Como as leituras de massa equivalente ao torque empregado são pequenas, é importante que não se utilize células de carga de capacidades superiores a 300 g, uma vez que células dessa natureza tornam-se menos precisas e, com isso, agregam maior erro às leituras.

No ensaio de viscosidade, a hipótese para um perfil de velocidade linear e que considera os efeitos da camada entre as bases dos cilindros apresentou maior consistência dos valores medidos de viscosidade, sendo esta, portanto, escolhida como a que melhor descreve o comportamento dos fluidos utilizados nos experimentos. Os valores de viscosidade obtidos pela hipótese apresentam erros de cerca de 4%, 7% e 28% para as amostras de azeite, óleo de motor SAE 10W30 e glicerina, respectivamente, sendo que neste último houve maior dificuldade em

manter o fluido na temperatura adequada, o que eventualmente explica o maior erro observado. Assim, recomenda-se que para ensaios de viscosidade não sejam utilizados fluidos cuja viscosidade dinâmica seja inferior a 0,0040 Pa.s. Para o ensaio de fluidos que apresentam viscosidades superiores a 1,5200 Pa.s deve-se analisar a estabilidade do cilindro interno durante o funcionamento do protótipo.

O custo de impressão das peças, ignorando consumo de energia, é muito pequeno e um único filamento de ABS pode ser usado para construir até 5 protótipos completos. Por sua vez, a aquisição de *jumpers*, placa *Arduino*, *protoboard* e demais dispositivos de leitura e movimento necessários são da ordem de R\$275,00, fazendo com que o custo total de produção do protótipo seja de cerca de R\$300,00, o que corresponde a 1,2% do custo de aquisição de um viscosímetro de mercado, que custa cerca de R\$25.000,00.

Embora o protótipo não apresente a robustez experimental de viscosímetros rotacionais de mercado, considerando a finalidade para a qual foi proposto, conclui-se que a plataforma *Arduino* e a impressão 3D mostram-se como ferramentas úteis na construção de protótipos que podem ser utilizados em laboratórios, para fins didáticos, em alternativa a equipamentos profissionais de custo elevado e que o protótipo pode ser utilizado para medição da viscosidade de fluidos newtonianos, desde que tais fluidos tenham viscosidade dentro do intervalo específico estabelecido nesse trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ABMES. Associação Brasileira de Mantenedoras de Ensino Superior. v. 600, n. 61, p. 1–3, 2019.
- AXT, R.; MOREIRA, M. A. O Ensino Experimental e a Questão do Equipamento de Baixo Custo. **Revista de Ensino de Física**, v. 13, p. 97–103, 1991.
- BARBERÀ, O.; VALDÉS, P. El trabajo práctico en la enseñanza de las ciencias: una revisión. **Enseñanza de las Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas**, v. 14, n. 3, p. 365–379, 1996.
- BECKER, Á.; WERNER, C. Visão de Ciência presente nas Diretrizes Curriculares Nacionais para os cursos de Engenharia. **Ensino & Pesquisa**, v. 16, n. 1, p. 74–88, 2018.
- CARVALHO, L. DE A.; TONINI, A. M. Uma análise comparativa entre as competências requeridas na atuação profissional do engenheiro contemporâneo e aquelas previstas nas diretrizes curriculares nacionais dos cursos de engenharia. **Gestão e Produção**, v. 24, n. 4, p. 829–841, 2017.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2012.
- CONCEIÇÃO, E. DA. **Apostila Instrumentação Industrial**, 2005. Documento eletrônico. Disponível em <<https://azdoc.tips/documents/apostila-de-instrumentacao-industrial-senai-5c1882a7c6539>>. Acesso em 16 de mar. 2022.
- DESTEFANI, B. V.; SOUZA, M. T. DE. **Medição de Temperatura e Vazão Volumétrica em Escoamento Interno, com Arduino**. 24 p. Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2015.
- FERRONI, E. H. et al. A Plataforma Arduino e suas aplicações. **Revista UIIPS**, v. 3, p. 133–148, 2015.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física - Vol. 1**. 9. ed. Rio de Janeiro: Grupo Editorial Nacional, 2012.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- KLEBA, J. B.; RUFINO, S. Novas DCNS de engenharia, extensão curricular e engenharias engajadas: inovações e desafios da educação. **COBENGE**, 2021.
- MULTILOGICA-SHOP. **Arduino: Guia Iniciante**. v. 2, 2017.
- NASCIMENTO, C. R. Ensaio em reômetro rotacional tipo cilindros coaxiais. **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**, p. 425, 2007.
- OLIVEIRA, A. R. E. Os desafios atuais para a formação dos engenheiros brasileiros. **Cadernos fisenge**, p. 1–24, 2007.

RANDA, Y. **Construção de Dinamômetro Para Medição de Torque e Potência de MCI de Pequeno Porte**. Joinville, 2016. 69 p. Monografia (Graduação em Engenharia Automotiva) – Universidade Federal de Santa Catarina.

Resultado do Pregão Presencial SESI/SENAI nº 276/2017. v. 00, p. 2017, 2017.

SILVA, J. V. L. DA; MAIA, I. A. Desenvolvimento de dispositivos de tecnologia assistiva utilizando impressão 3D. **I Simpósio Internacional de Tecnologia Assistiva**, p. 33–39, 2014.

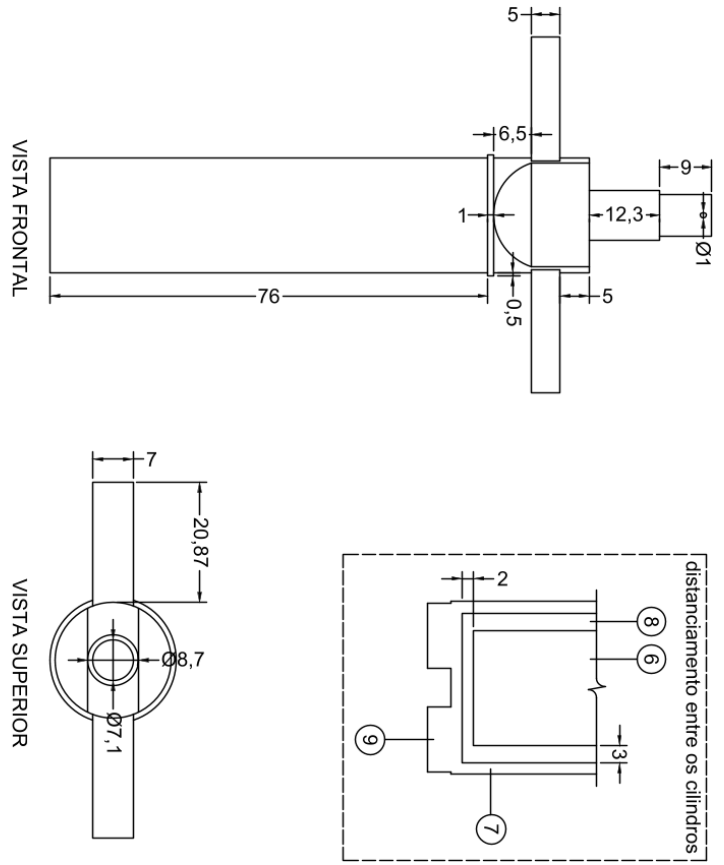
SUTILI, F. K. Metodologias ativas na formação do engenheiro do século XXI: desafios e reflexões. **Olhar de Professor**, v. 25, p. 1–23, 2022.

ZIER, A. F. et al. **Estudo da prototipagem rápida por meio da impressão 3d e seu efeito na redução de custos e prazos dos projetos de produto**. p. 301–318, 2019.

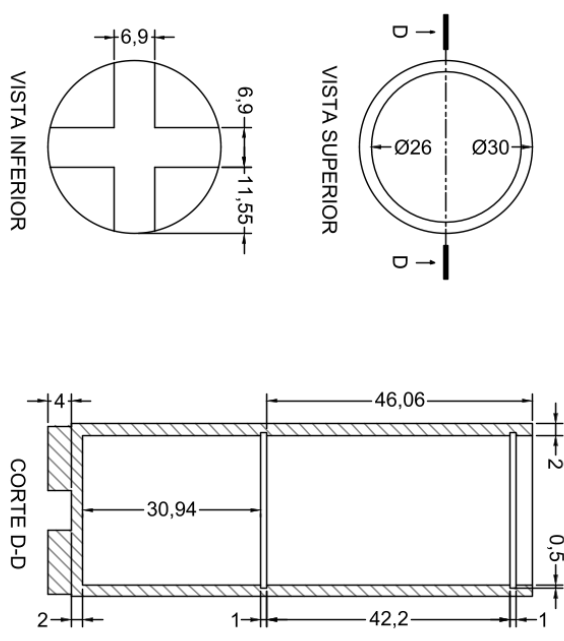
ZYTKUEWISZ, M. A. B.; BEGO, A. M. Crítica à experimentação tradicional e a importância do erro no processo de ensino e aprendizagem de ciências. **Revista Iluminart**, 2018.

APÊNDICE A – DIMENSÕES DOS COMPONENTES DO PROTÓTIPO

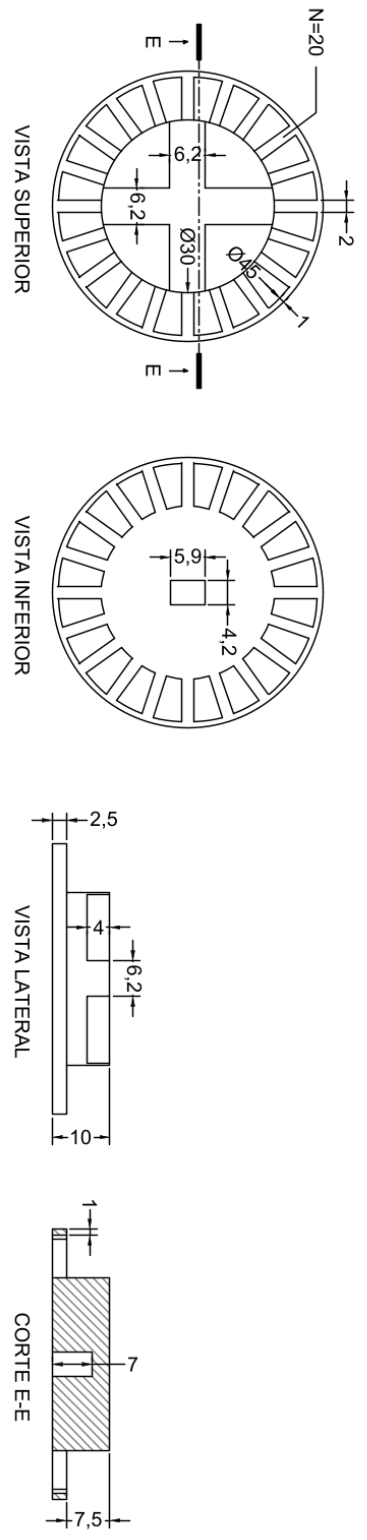
D7 DIMENSÕES DO CILINDRO INTERNO (mm)



D8 DIMENSÕES DO CILINDRO EXTERNO (mm)



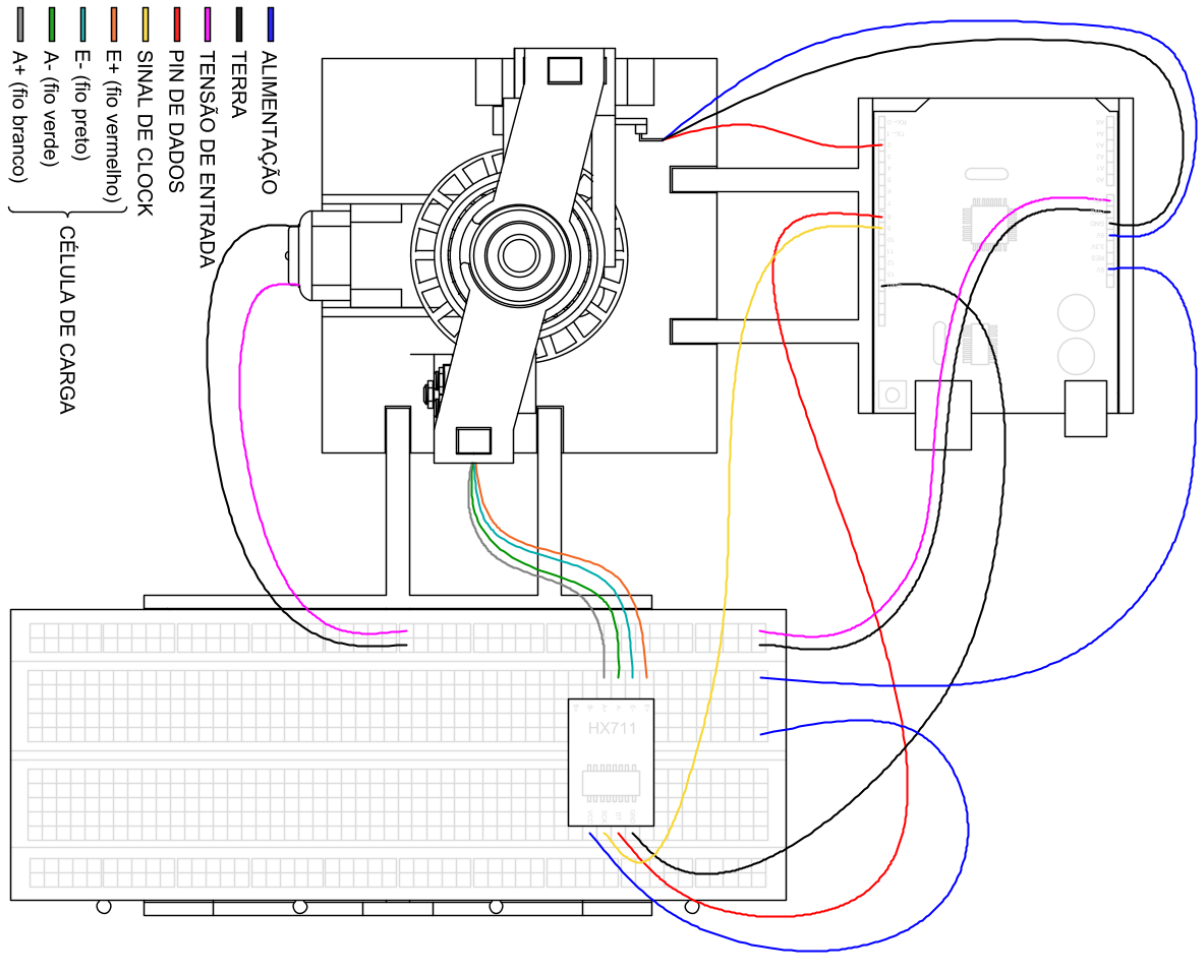
D9 DIMENSÕES DO DISCO DE ROTAÇÃO PARA LETURA DE VELOCIDADE ANGULAR (mm)



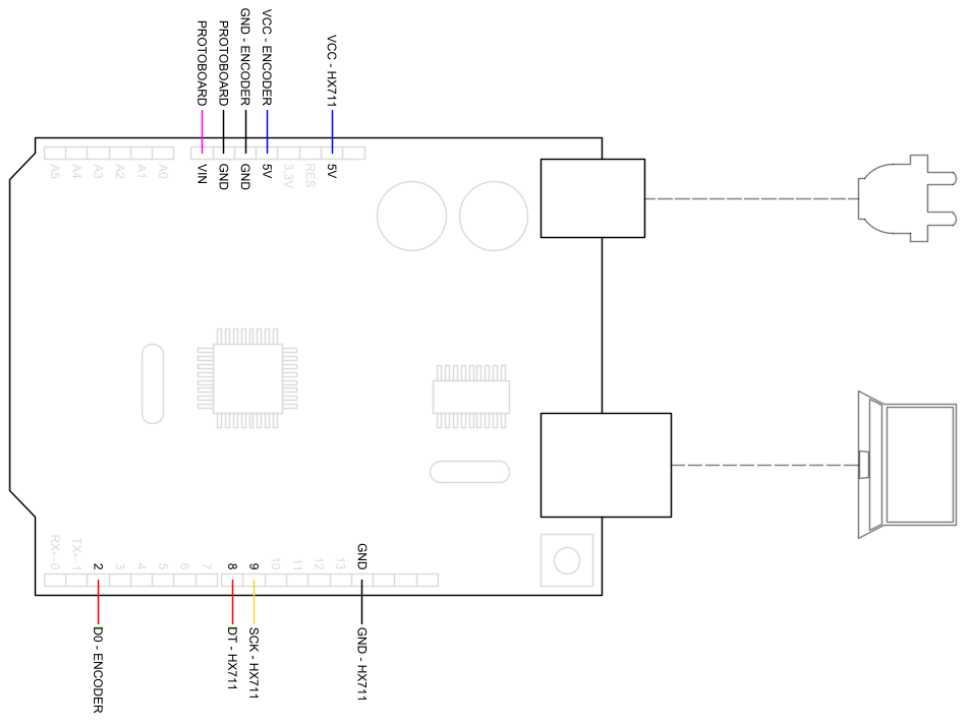




## APÊNDICE B – ARRANJO EXPERIMENTAL COMPLETO



- ALIMENTAÇÃO
  - TERRA
  - TENSÃO DE ENTRADA
  - PIN DE DADOS
  - SINAL DE CLOCK
  - E+ (fio vermelho)
  - E- (fio preto)
  - A- (fio verde)
  - A+ (fio branco)
- CÉLULA DE CARGA



## APÊNDICE C – ALGORITMO DO ENCODER

```

//ADAPTADO DE USINA INFO & WR KITS
//LINKS: www.wrkits.com.br | youtube.com/canalwrkits

//Definição das variáveis globais

int          rpm;
volatile byte pulsos;
unsigned long timeold;

unsigned int pulsos_por_volta = 20; //número de obstáculos (ou furos) no
disco utilizado para leitura da velocidade

// Interrupção

void contador() {

    //incrementa contador
    pulsos++; //incrementa o contador de pulsos
}

void setup() {

    Serial.begin(115200); //inicializa a comunicação serial

    pinMode(2, INPUT); //definição do pino como entrada de dados/comandos

    //Interrupcao 0 - pino digital 2
    //Aciona o contador a cada pulso
    attachInterrupt(0, contador, RISING);
    pulsos = 0;
    rpm = 0;
    timeold = 0;
}

void loop() {

    //atualiza contador a cada segundo

    if (millis() - timeold >= 1000)
    {

        //desabilita interrupção durante o cálculo

        detachInterrupt(0);
        rpm = (60 * 1000 / pulsos_por_volta ) / (millis() - timeold) * pulsos;
        timeold = millis();
        pulsos = 0;

        //mostra o valor de RPM no serial monitor

        Serial.print("RPM = ");
        Serial.println(rpm, DEC);
        //Habilita interrupcao
        attachInterrupt(0, contador, RISING);
    }
}

```

## APÊNDICE D – ALGORITMO PARA LEITURA DA CÉLULA DE CARGA

```
//ADAPTADO DE BOBSIEN P&D
//LINK: https://www.youtube.com/watch?v=Ehk7Zh043Cw

#include <HX711.h> //Inclui a biblioteca do módulo HX711 para validar as
funções internas do algoritmo

#define ZEROVAL 795420 //Valor RAW de 0 grama
#define CALIBVAL 2408430 //Valor RAW do peso base
#define PESOBASE 97.5 //Peso base de calibração em gramas

const int LOADCELL_DOUT_PIN = 8; //atribui o pin de dados à porta 8 do
Arduíno
const int LOADCELL_SCK_PIN = 9; //atribui o pin do sinal de clock à porta 9
do Arduíno

long long BUFF[25] = {0}; //Estabelece um buffer rotativo (array) com 25
posições
byte BUFFL = 0; //armazena o tamanho do buffer a cada iteraçãõ

HX711 scale; //define o objeto da biblioteca

long ReadRAW(); //realiza a leitura dos valores RAW
float ConvertVal(long RAWVAL); //converte o valor do sinal elétrico
recebido (RAW) em um valor em gramas

void setup() {

    Serial.begin(115200); //inicializa a comunicação serial
    scale.begin(LOADCELL_DOUT_PIN, LOADCELL_SCK_PIN); //Inicializa os pinos
de dado e sinal de clock
    BUFFL = sizeof(BUFF) / sizeof(BUFF[0]); //calcula o tamanho do buffer
rotativo em bytes e divide pelo menor valor obtido
}

void loop() {

    //informações mostradas no monitor serial
    Serial.print("RAW: ");
    long RAW = ReadRAW();
    Serial.print(RAW);
    Serial.print(" gramas: ");
    Serial.println(ConvertVal(RAW));
    delay(1000);
}

float ConvertVal(long RAWVAL) {

    float unit = (float) PESOBASE / (float) (ZEROVAL - CALIBVAL);
    return (float) (ZEROVAL - RAWVAL) * unit;
}

long ReadRAW() {

    long long ACC = 0; //acumulador de valores para gerar a média
    for (short z = 0; z < BUFFL; z++) {
        while (!scale.is_ready()); //verifica se o módulo HX711 está pronto
para efetuar a leitura
        long reading = scale.read();
    }
}

```

```
//deslocamento do buffer

for (short i = 0; i < BUFFL - 1; i++) {
    BUFF[i] = BUFF[i+1];
}

BUFF[BUFFL - 1] = reading;
}

//laço para acumular os valores lidos

for (short i = 0; i < BUFFL; i++) {
    ACC = ACC + BUFF[i];
}

return (long) ACC / BUFFL;
}
```

## APÊNDICE E – ALGORITMO UNIFICADO DO VISCOSÍMETRO

```

#include <HX711.h> //Inclui a biblioteca do módulo HX711 para validar as
funções internas do algoritmo

#define ZEROVAL 747470 //Valor RAW de 0 grama
#define CALIBVAL 2360480 //Valor RAW do peso base
#define PESOBASE 97.5 //Peso base de calibração em gramas

const int LOADCELL_DOUT_PIN = 8; //atribui o pin de dados à porta 8 do
Arduino
const int LOADCELL_SCK_PIN = 9; //atribui o pin do sinal de clock à porta 9
do Arduino

long long BUFF[25] = {0}; //Estabelece um buffer rotativo (array) com 25
posições
byte BUFFL = 0; //armazena o tamanho do buffer a cada iteração

HX711 scale; //define o objeto da biblioteca

long ReadRAW(); //Realiza a leitura dos valores RAW
float ConvertVal(long RAWVAL); //converte o valor do sinal elétrico
recebido (RAW) em um valor em gramas

int          rpm;
volatile byte pulsos;
unsigned long timeold;

//Altere o numero abaixo de acordo com o seu disco encoder
unsigned int pulsos_por_volta = 20;

//
=====
// --- Interrupção ---
void contador()
{
  //Incrementa contador
  pulsos++;
}

//
=====
// --- Configurações Iniciais ---

void setup() {
  Serial.begin(115200); //inicializa a comunicação serial
  scale.begin(LOADCELL_DOUT_PIN, LOADCELL_SCK_PIN); //Inicializa os pinos
de dado e sinal de clock
  BUFFL = sizeof(BUFF) / sizeof(BUFF[0]); //calcula o tamanho do buffer
rotativo em bytes e divide pelo menor valor obtido

  pinMode(2, INPUT); //pino de dados do Encoder

  //Interrupcao 0 - pino digital 8
  //Aciona o contador a cada pulso
  attachInterrupt(0, contador, RISING);
  pulsos = 0;
  rpm = 0;
  timeold = 0;

```

```

}

void loop() {

    //atualiza contador a cada segundo
    if (millis() - timeold >= 1000)
    {
        //Desabilita interrupção durante o cálculo
        detachInterrupt(0);
        rpm = (60 * 1000 / pulsos_por_volta ) / (millis() - timeold) * pulsos;
        timeold = millis();
        pulsos = 0;

        //mostra o valor de RPM no serial monitor
        Serial.print("Rotação: ");
        Serial.print(rpm, DEC);
        Serial.println(" RPM");
        //Habilita interrupcao
        attachInterrupt(0, contador, RISING);
    }

    //informações mostradas no monitor serial
    Serial.print("RAW: ");
    long RAW = ReadRAW();
    Serial.print(RAW);
    Serial.print(" | Massa: ");
    Serial.print(ConvertVal(RAW));
    Serial.print(" gramas | ");
}

float ConvertVal(long RAWVAL) {

    float unit = (float) PESOBASE / (float) (ZEROVAL - CALIBVAL);

    return (float) (ZEROVAL - RAWVAL) * unit;
}

long ReadRAW() {
    long long ACC = 0; //acumulador de valores para gerar a média
    for (short z = 0; z < BUFFL; z++) {
        while (!scale.is_ready()); //verifica se o módulo HX711 está pronto
        para efetuar a leitura
        long reading = scale.read();

        //deslocamento do buffer
        for (short i = 0; i < BUFFL - 1; i++) {
            BUFF[i] = BUFF[i+1];
        }
        BUFF[BUFFL - 1] = reading;
    }

    //laço para acumular os valores lidos
    for (short i = 0; i < BUFFL; i++) {
        ACC = ACC + BUFF[i];
    }
    return (long) ACC / BUFFL;
}

```

## APÊNDICE F – PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA

Calibração do valor 0 grama:

Passo 1 – Acionar a célula de carga através do *Arduino*, sem a bandeja e sem qualquer objeto sobre a célula e realizar a leitura dos valores de RAW no Monitor Serial do *Arduino*;

Passo 2 – Colocar o valor médio obtido de RAW na variável “ZEROVAL” no algoritmo e enviar o código novamente para a placa;

Passo 3 – Verificar, após o envio, se a célula de carga está aferindo valores próximos a 0 grama no Monitor Serial (se não forem observados valores próximos ao esperado, deve-se substituir o novo valor médio de RAW apresentado, inserindo-o na variável “ZEROVAL”, até que se alcance a precisão desejada).

Calibração do valor 100 gramas (ou valor próximo correspondente):

Passo 4 – Colocar um objeto cuja massa seja, quando somada à massa da bandeja, igual a 100 g e realizar a leitura dos valores de RAW no Monitor Serial do *Arduino* (não sendo possível utilizar um objeto de valor de massa igual 100 g quando somado à massa da bandeja, então, deve-se utilizar um objeto cuja massa seja próxima da capacidade máxima, mas não superior a isso, alterando, neste caso, o valor da variável “PESOBASE” e inserindo o valor da massa exata do conjunto utilizado);

Passo 5 – Colocar o valor médio obtido de RAW na variável “CALIBVAL” no algoritmo e enviar o código novamente para a placa;

Passo 6 – Verificar, após o envio, se a célula de carga está aferindo valores próximos ao esperado no Monitor Serial (se não forem observados valores próximos ao esperado, deve-se substituir o novo valor médio de RAW apresentado, inserindo-o na variável “CALIBVAL”, até que se alcance a precisão desejada).