



Guilherme Sant' Anna Barbosa

**Projeto, Construção e Teste de um Medidor de Torque
Rotativo com Faixa de Medição Ajustável**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de
Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Igor Braga de Paula

Rio de Janeiro
Junho de 2023

Dedicatória

Em memória do meu tio Binho.

A minha filha Helena.

Agradecimentos

Primeiramente começo agradecendo à Deus.

Ao professor Igor pelos ensinamentos e dedicação com o projeto.

Ao Márcio que fez o possível e o impossível para o projeto acontecer.

Ao professor Will do departamento de matemática, que investiu muito tempo me ensinando o básico que eu precisava. Aqui está uma amostra do resultado.

Ao João Marins, pelas aulas de inglês. Obrigado pela paciência e dedicação em me ajudar. E pela amizade durante a universidade e o trabalho.

Aos amigos que a universidade me deu, Guilherme Rodrigues, Yasmin Amaro, Joshua Santos e Gabriel Vieira. Obrigado pela parceria e carinho dentro e fora da universidade

A mãe do Gabriel, dona Detha, que por muito tempo me enviou marmitta garantindo a minha permanência na universidade, jamais me esquecerei desse gesto, mudou a minha vida. Obrigado por me tratar como um filho.

A minha esposa Beatriz, que conheci dentro do campus, obrigado por compartilhar a vida comigo e me fazer melhor. Agradeço também pelo incentivo e cuidado.

A minha filha Helena que ajudou a caminhar mais do que eu pensava ser possível.

Por fim, as minhas referências, minha mãe Barbara e meu irmão Lucas que sempre me apoiaram de todas as formas, que mesmo sem enfrentar as dificuldades que tive, sempre acreditaram que eu conseguiria.

Resumo

O presente trabalho consiste no projeto, fabricação e calibração de um sensor de torque rotativo com faixa de medição ajustável. Esse tipo de sensor é muito útil para medição de torque em equipamentos rotativos, como por exemplo turbinas hidrocínéticas e motores. Atualmente, existem no mercado medidores com faixa de medição. O custo do dispositivo e o tempo de entrega no país, são em geral impeditivos para diversas aplicações. Neste projeto desenvolveu-se um equipamento de baixo custo. O projeto mecânico do sensor foi realizado utilizando a análise de elementos finitos. O dispositivo proposto contempla uma faixa de medição para baixo torque, variando entre 0,3 Nm a 4 Nm. O sensor consiste em basicamente dois eixos unidos com uma chapa de alumínio entre eles instrumentada com extensômetros, o qual capta a deformação da chapa e converte o sinal em tensão. Foram confeccionadas cinco curvas de calibração estática, sendo uma para cada espessura de chapa. Através de uma curva de calibração obtida para cada chapa, é possível associar a leitura de tensão com o torque associado. Os resultados óbitos mostram que o medidor proposto é capaz de operar em diferentes faixas. Entretanto, os erros são mais elevados em faixas de torque mais baixas.

Palavras-chave

Sensor de torque; Torque rotativo; Faixa de medição ajustável.

Abstract

The present work consists of the design, fabrication, and calibration of a rotary torque sensor with adjustable measuring range. This type of sensor is very useful for measuring torque in rotating equipment, such as hydrokinetic turbines and motors. Currently, there are measuring devices available in the market with fixed measuring ranges. The cost of these devices and the delivery time to the country are generally prohibitive for various applications. In this project, a low-cost equipment was developed. The mechanical design of the sensor was carried out using finite element analysis. The proposed device includes a measuring range for low torque, ranging from 0.3 Nm to 4 Nm. The sensor consists essentially of two shafts connected by an aluminum plate instrumented with strain gauges, which capture the deformation of the plate and convert it into an electrical signal. Five static calibration curves were created, one for each plate thickness. By using a calibration curve obtained for each plate, it is possible to associate the voltage reading with the corresponding torque. The obtained results show that the proposed meter is capable of operating in different ranges. However, errors are higher in lower torque ranges.

Keywords

Torque sensor; Rotary torque; Adjustable measurement range.

Sumário

1	Introdução	10
1.1	Contextualização	10
1.2	Objetivo	11
2	Revisão Bibliográfica	12
3	Metodologia	15
4	Análise Estrutural e Validação	16
4.1	Análise de Malha	17
4.2	Análise da Variação da Espessura de Chapa	18
4.3	Resultados	19
4.4	Seleção de Materiais	21
5	Instrumentação e Calibração das Chapas	24
6	Bancada de Testes	27
7	Resultados	31
7.1	Chapa de 0,75 mm	33
7.2	Chapa de 1,0 mm	34
7.3	Chapa de 1,5 mm	36
7.4	Chapa de 2,0 mm	37
7.5	Chapa de 2,5 mm	39
8	Conclusão	41
9	Referências	43

Lista de Figuras

Figura 1 - Ponte de Wheatstone.....	14
Figura 2 – Esquemático com dois eixos, extensômetros e a chapa.	15
Figura 3 - Esquemático 2D da chapa metálica.	16
Figura 4 - Gráfico de convergência de malha.....	18
Figura 5 - Condições de contorno de simulação. (Chapa de 1,5 mm).....	19
Figura 6 - Simulação 3D - Análise da tensão máxima na chapa de 1,5 mm.	20
Figura 7 - Simulação 2D - Análise da tensão máxima na chapa de 1,5 mm.	20
Figura 8 - Gráfico comparativo das tensões máximas teóricas e numéricas x espessura de chapa para os valores de torque definidos na tabela 1.....	21
Figura 9 - Chapa com extensômetros colados.	24
Figura 10 - Esquemático da ponte de Wheatstone aplicado à chapa.	24
Figura 11 - Módulo conversor HX711 (a esquerda) e Arduino Uno (a direita).	25
Figura 12 - Protótipo virtual.	27
Figura 13 -Protótipo virtual em vista explodida.....	27
Figura 14 - Protótipo real.....	28
Figura 15 - Braço de alavanca em material PLA.	28
Figura 16 - Blocos para calibração estática do sensor de torque.	29
Figura 17 - Bancada de testes - calibração estática.....	30
Figura 18 - Curva de calibração estática com chapa de 0,75 mm.....	33
Figura 19 - Gráfico do erro das medições em relação ao ajuste para a chapa de 0,75 mm.	33
Figura 20 - Curva de calibração estática com chapa de 1,0 mm.....	34
Figura 21 - Gráfico do erro das medições em relação ao ajuste para a chapa de 1,0 mm.	35
Figura 22 - Curva de calibração estática com chapa de 1,5 mm.....	36
Figura 23 - Gráfico do erro das medições em relação ao ajuste para a chapa de 1,5 mm.	36
Figura 24 - Curva de calibração estática com chapa de 2,0 mm.....	37

Figura 25 - Gráfico do erro das medições em relação ao ajuste para a chapa de 2,0 mm.	38
Figura 26 - Curva de calibração estática com chapa de 2,5 mm.....	39
Figura 27 - Gráfico do erro das medições em relação ao ajuste para a chapa de 2,5 mm.	40

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Resultados das análises teóricas e simulações.	19
Tabela 2 - Discrepância entre os valores simulados em 2D e 3D e o valor teórico para cada chapa.	21
Tabela 3 - Dados da Liga de Alumínio 2024-T6 e valores médios de deformação.	22

1 Introdução

1.1 Contextualização

Medir e controlar o torque em eixos é importante para diversas aplicações de engenharia, pois é uma maneira de evitar danos a máquinas e equipamentos. Mais precisamente, a medição dinâmica de torque é essencial em processos que envolvem transferência de energia em máquinas rotativas como, por exemplo, motores, geradores, turbinas dentre outros. É importante ressaltar a dificuldade em medições dinâmicas, o simples fato de ter um eixo em constante movimento, sendo necessário manter a alimentação e controle de dados adquiridos para as medições é uma tarefa extremamente difícil, principalmente se a medição for em tempo real (BORGES & SOBRINHO, 2015).

No contexto de geração de energia com turbinas hidrocínéticas, é interessante trabalhar com sensores que possuem faixa de medição ajustável, pois a potência no eixo é proporcional a velocidade do escoamento elevada ao cubo. Com isso, é de esperar que os medidores de torque e velocidade atinjam facilmente o limite das suas escalas em testes que consideram diferentes faixas de velocidade.

Nos motores em geral, a medição do torque dinâmico advindo precisa ser mensurada em diversas escalas, pois ao variar a velocidade de rotação, o torque varia e é preciso medir com precisão não só para garantir a integridade do equipamento e prever possíveis falhas, mas também assegurar que os esforços gerados são compatíveis com as configurações de entrada.

Atualmente, os medidores de torque rotativos disponíveis no mercado não permitem o ajuste da faixa de medição e existe uma necessidade no mercado de realizar medições, não apenas de torque, mas de outras grandezas, sem precisar adquirir vários sensores para uma mesma grandeza a ser medida. No arranjo proposto no âmbito deste trabalho, o elemento sujeito a deformação será construído com uma chapa

metálica fina, a qual pode ser trocada de acordo com a necessidade do torque.

1.2 Objetivo

O objetivo do projeto é desenvolver um medidor de torque de baixo custo, com faixa de medição variável, de forma que a faixa de medição possa ser ajustada conforme a necessidade do equipamento ou componente testado, sem a necessidade de trocar todo o sensoriamento. Para tal, objetiva-se modelar e fabricar diferentes chapas metálicas finas que serão sensoriadas com extensômetros (*strain gauges*) a fim de medir a deformação na chapa utilizada. Conhecendo a deformação e força aplicada, obtém-se o torque associado.

No presente trabalho, escolheu-se a seguinte faixa de torque: [0,5, 1, 2, 3, 4] Nm, e as respectivas espessuras de chapa: [0,75, 1, 1,5, 2, 2,5] mm. Quanto à modelagem das chapas metálicas, foram realizadas simulações estruturais e estas foram comparadas com a análise teórica a fim de validar o conceito de mecânica dos sólidos. Após a modelagem das chapas, estas foram fabricadas, sensoriadas, calibradas e finalmente testadas para obtenção das curvas de calibração.

2 Revisão Bibliográfica

Dentro das aplicações práticas de engenharia é muito comum o uso de sistemas rotativos. Nessas condições, deseja-se quantificar a transmissão de momento nos eixos e engrenagens. Sistemas rotativos como motores elétricos e à combustão, juntas robóticas e turbinas são exemplos de onde um sensor de torque rotativo pode ser empregado. Para quantificar o torque nesses sistemas existem diversos arranjos comercialmente disponíveis (BORGES, 2015).

Um método simples de medição de torque em motores e geradores é através da potência elétrica e da velocidade de rotação. De posse dessas informações é possível estimar o torque associado. Entretanto, as incertezas com esse método são, geralmente, altas devido as perdas por efeito Jaule, mas é um método relativamente simples para se obter uma ordem de grandeza na medição do torque (HBM Publication: Measuring Torque Correctly, 1989).

O sensor Hall é um semicondutor que fornece um sinal elétrico com uma proporcionalidade entre a amplitude e a intensidade do campo magnético, de forma que a medição de torque é feita pela frenagem eletromagnética. Esse sensor tem a vantagem de a medição ser feita sem que o sensor esteja em contato direto com o rotor ou eixo. A desvantagem consiste na sensibilidade do sensor aos movimentos radiais do eixo também, dessa forma, qualquer desalinhamento é captado pelo sensor pode e comprometer o resultado esperado (ANTUNES, 2012).

A medição do torque pode ser feita de forma indireta, esse princípio consiste na força de reação exercida pela fonte ou absorvida por algum elemento mecânico, onde o sensor permanece estático em relação ao sistema girante. Um estudo conduzido por (MORRIS, 2001), apontou que o torque em um eixo pode ser medido através de um sensor de ângulo de torção. O sistema de medição consiste em um transmissor e um receptor laser o qual é capaz de emitir pulsos ópticos que permite mensurar o ângulo de torção que um eixo de comprimento conhecido é submetido. O eixo

possui dois discos com as superfícies listradas em preto e branco e com espaçamento L entre os discos. A emissão da luz é feita por fibra óptica e as listras são responsáveis por refletir ou interromper o sinal luminoso, de modo que quando o eixo não está submetido a torque, os discos permanecem em fase e o grau de defasagem é zero. Quando o eixo é submetido a um torque, o grau de defasagem é conhecido e assim, o torque se torna conhecido.

Existe ainda, uma técnica de medição direta de torque utilizando-se sensores piezoelétricos. O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 pelos irmãos Curie, onde os mesmos estudaram sobre o efeito da pressão em cristais de quartzo. O efeito consiste em aplicar uma força mecânica sobre o elemento cerâmico de forma a gerar um campo elétrico, de modo que o contrário acontece, ao aplicar uma carga no elemento, ocorre um deslocamento mecânico. A vantagem desta técnica é que o próprio elemento gera a tensão e não precisa ser alimentado, entretanto é necessário um aparato para traduzir e transferir as informações como telemetria (BRITO,1994).

Outra forma muito usual de medição de torque é utilizando a técnica de medição direta, que consiste em fixar um transdutor ou mais em um eixo girante, esse método é conhecido como in-line, tais transdutores convertem a deformação do eixo em sinal elétrico (NETO, 2009). Extensômetros (strain gauges) são transdutores comumente usados para medição direta de torques estático e dinâmico. A fim de auxiliar a transmissão do sinal, os extensômetros são posicionados na configuração de ponte de Wheatstone. A ponte de Wheatstone foi popularizada por Charles Wheatstone, em 1858, onde realizou medições de resistência elétricas com alta resolução. A figura abaixo ilustra o arranjo para resistores ou extensômetros.

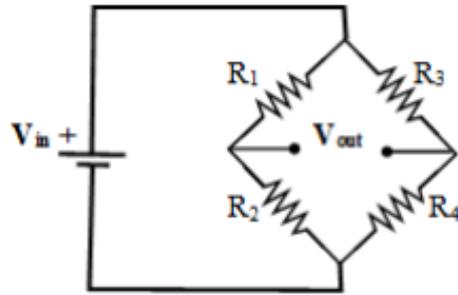


Figura 1 - Ponte de Wheatstone.

O circuito acima representado, é excitado por uma fonte de tensão elétrica de entrada V_{in} e o a diferença dos potenciais elétricos de saída V_{out} é observada pela deformação do eixo.

No presente trabalho serão utilizados extensômetros para medição direta de torque nas chapas metálicas na configuração de ponte de Wheatstone, essa técnica já está bem difundida e consolidada na literatura, como já mencionado anteriormente, porém a literatura não apresenta medidores com faixa ajustável, dessa forma, o presente trabalho contribuirá de forma relevante ao validar o equipamento.

3 Metodologia

A fim de fabricar as chapas metálicas onde se deseja medir as deformações e assim medir o torque no eixo, foi necessário dimensionar as chapas e selecionar o material de modo que fosse possível realizar as medições dentro das faixas especificadas anteriormente.

A modelagem e a simulação estrutural das chapas metálicas foram feitas através do *software* SolidWorks®, as simulações foram feitas tanto em 2D, que é uma análise mais simplificada, quanto em 3D e estes foram comparados com uma análise teórica para que fosse possível validar tanto o 2D quanto o 3D. Tais análises estão mais detalhadas no capítulo a seguir.

Após o dimensionamento das chapas, estas foram fabricadas na oficina do Laboratório de Engenharia de Fluidos (LEF) e então instrumentadas com os extensômetros e toda eletrônica que faz a comunicação do sensor com a placa de aquisição de dados. Finalmente, as chapas foram calibradas e assim pôde-se dar início aos testes. Todo processo de calibração e testes foram realizados no LEF.

A seguir é ilustrado um esquemático com dois eixos, a chapa e os extensômetros desenhados no SolidWorks® que representa o conceito do projeto abordado neste trabalho.

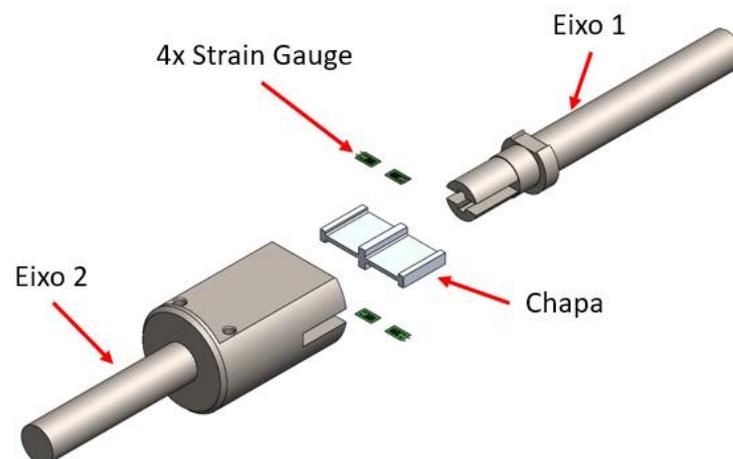


Figura 2 – Esquemático com dois eixos, extensômetros e a chapa.

4 Análise Estrutural e Validação

As análises estruturais foram feitas para 5 espessuras de chapas diferentes com os objetivos de avaliar a integridade de cada e saber se a deformação causada pelo giro do eixo é suficiente para medição com o extensômetro. Abaixo, um esquemático da chapa.

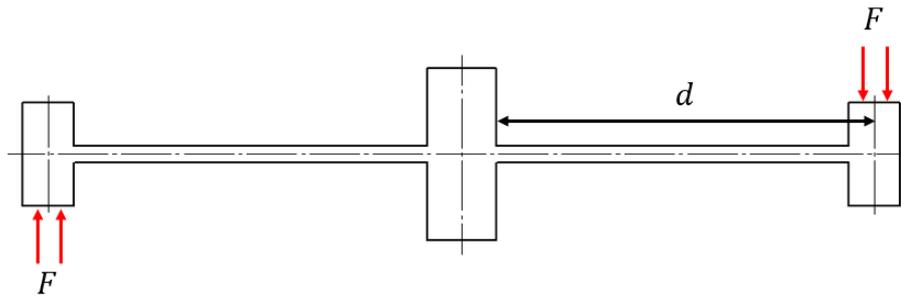


Figura 3 - Esquemático 2D da chapa metálica.

Os cálculos analíticos foram feitos utilizando-se os conceitos de mecânica dos sólidos. Para comparar as análises teóricas com as simulações foi escolhido como parâmetro a tensão máxima na chapa. Dessa forma utilizou-se a seguinte equação para obter a tensão máxima:

$$\sigma_{max} = k_t \cdot \frac{M_{max} \cdot y/2}{I} \quad (1)$$

Onde, σ_{max} [MPa] é a tensão máxima na chapa, M_{max} [Nm] é o momento máximo gerado por uma força na chapa, $y/2$ [m] é a altura do eixo neutro, I [m⁴] é o momento de inércia da chapa e o k_t é o concentrador de tensão devido à mudança de seção na chapa. Sendo assim, foi possível obter a tensão máxima para cada chapa e comparar os resultados com as simulações.

O momento máximo M_{max} [Nm], pode ser calculado pela seguinte equação:

$$M_{max} = F \cdot d \quad (2)$$

No qual, $F [N]$ é a força aplicada e $d [m]$ é a distância entre o engaste (região fixa) e a força.

O momento de inércia $I [m^4]$ da seção transversal da chapa é representado pela equação a seguir:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (3)$$

Onde $b [m]$ é a largura da chapa e $h [m]$ é a espessura da chapa.

O valor de k_t é obtido através de um gráfico que pode ser encontrado no Apêndice. A concentração de tensão varia com os parâmetros dimensionais da chapa, como espessura e arredondamento de cantos vivos (filete), dessa forma, cada chapa terá uma concentração de tensão que advém de sua geometria.

A fim de simplificar as simulações e economizar o custo computacional, foram simuladas apenas a metade das chapas, devido à simetria explicitada na figura acima. Desse modo, foi possível economizar tempo de simulação e o custo computacional.

No presente trabalho foram realizadas simulações 2D e 3D para cada chapa, com o intuito de verificar se os cálculos analíticos estão coerentes, de modo que, dentro de uma faixa de incerteza os valores encontrados nas simulações estejam bem próximos dos valores analíticos e assim, validar o conceito estrutural do projeto.

4.1 Análise de Malha

A análise de malha é uma etapa muito importante para validar os modelos analítico e simulados, pois é o modo de garantir que não haverá interferência numérica no resultado. Sendo assim, foram realizadas diversas simulações para chapa de 1,0 mm, onde a malha foi desde a mais grosseira possível até a mais refinada, garantido que não haja nenhum tipo de alteração no resultado devido à erro numérico.

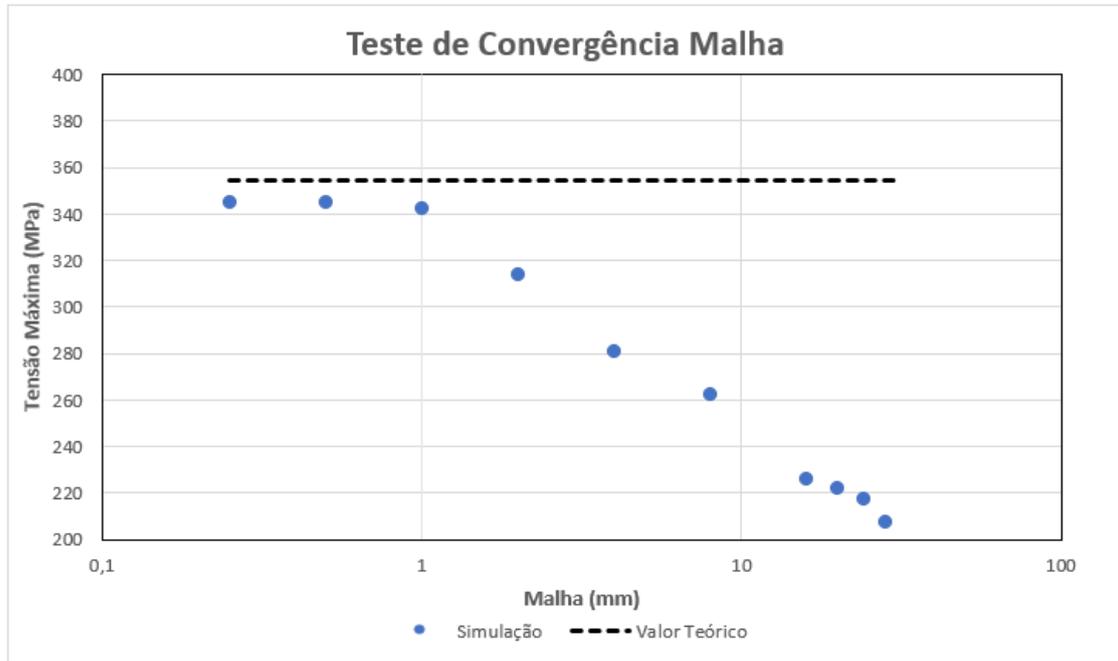


Figura 4 - Gráfico de convergência de malha.

Após algumas simulações para compreender a convergência da malha, pode-se perceber pelo gráfico acima que uma malha entre 0,25 mm e 1,0 mm é suficiente para se obter um resultado sem interferência numérica. Essa análise pode ser extrapolada para as demais chapas, de maneira que, ao realizar as análises nessa faixa, a malha estará refinada o suficiente para um resultado confiável.

4.2 Análise da Variação da Espessura de Chapa

Conforme já explicitado anteriormente, o presente trabalho tem o objetivo de atender uma faixa de torque variando-se apenas as espessuras das chapas. Dessa forma, os torques e espessuras mencionados na seção 1.2 foram utilizados para configurar as simulações. Além dessas, outras condições de contorno foram adotadas para as simulações.

Tomando como exemplo a chapa de 1,5 mm, pode-se observar que há duas regiões com setas verdes e uma região com setas roxas. As setas verdes indicam as regiões que são consideradas fixas, enquanto que as setas roxas indicam a região onde a carga foi aplicada. Essas configurações de região fixa e aplicação de carga são as mesmas nas demais espessuras, visto que a geometria das chapas só varia na

espessura. Vale ressaltar também que as análises foram feitas com simetria, visando assim, economizar no custo computacional.

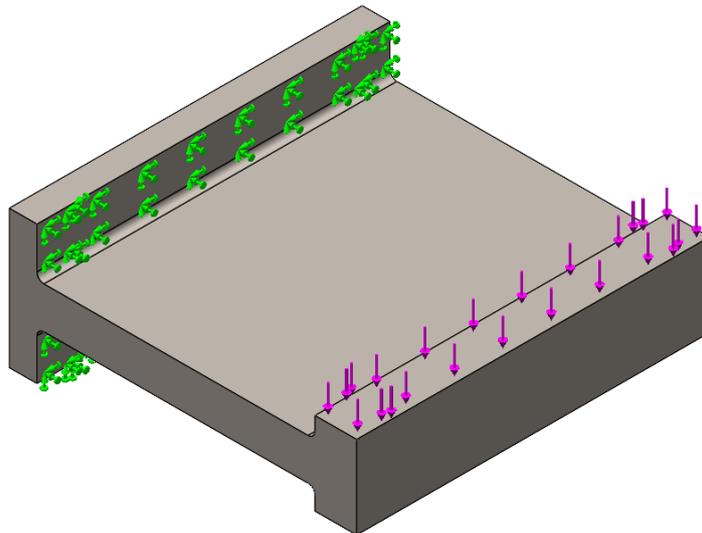


Figura 5 - Condições de contorno de simulação. (Chapa de 1,5 mm).

A seguinte subseção apresenta os resultados obtidos para cada espessura de chapa através das simulações, bem como o erro relativo ao valor teórico encontrado.

4.3 Resultados

A tabela abaixo apresenta os resultados obtidos de forma analítica e através das simulações 2D e 3D.

Tabela 1 - Resultados das análises teóricas e simulações.

Torque [Nm]	Esp. da Chapa [mm]	Análise Teórica [MPa]	Simulação 2D [MPa]	Simulação 3D [MPa]
0,5	0,75	294	300	282,6
1	1	354,3	366	345
2	1,5	315	321,8	301,7
3	2	256,9	280,8	268,3
4	2,5	226,8	237,5	222,5

A figura a seguir ilustra o resultado obtido através das simulações em 2D e 3D para a chapa de 1,5 mm. Os resultados das demais espessuras

são similares considerando o par torque e espessura, os valores serão apresentados em tabelas.

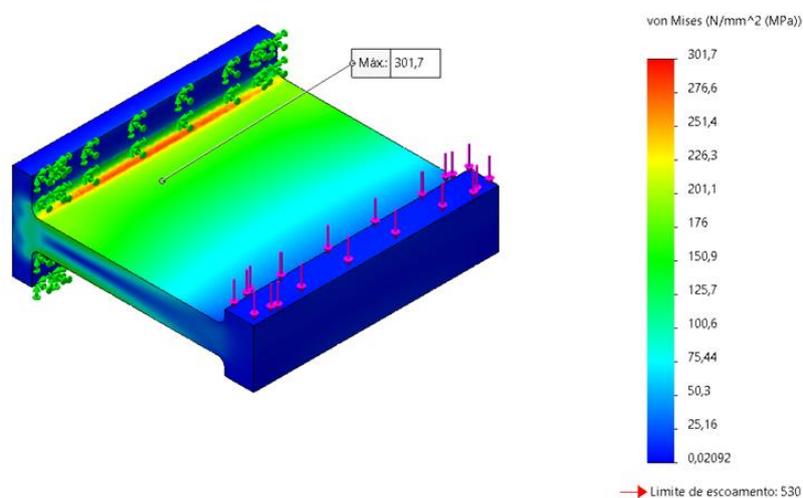


Figura 6 - Simulação 3D - Análise da tensão máxima na chapa de 1,5 mm.

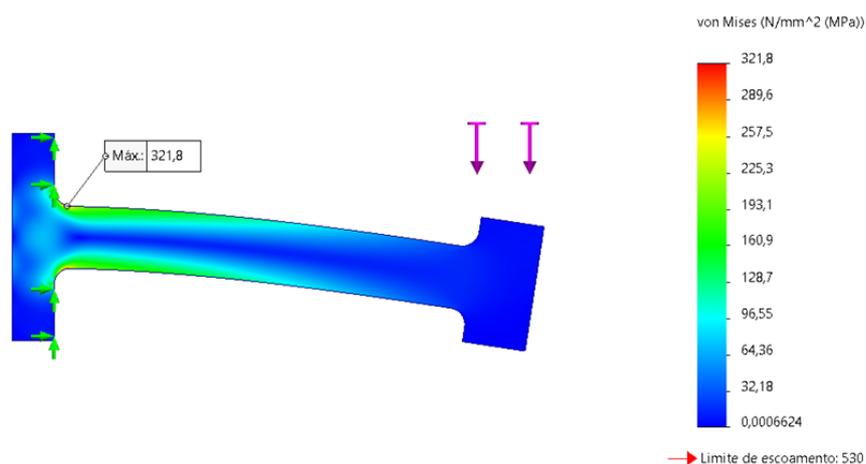


Figura 7 - Simulação 2D - Análise da tensão máxima na chapa de 1,5 mm.

Como se pode observar, os valores obtidos pelas simulações estão na mesma faixa que os valores encontrados na análise teórica. Neste projeto está sendo considerado uma tolerância no erro de 10%, pois as análises numéricas aqui feitas tem o intuito de validar os conceitos teóricos aplicados ao projeto, assim, uma tolerância de $\pm 10\%$ atende bem a proposta aqui apresentada.

O gráfico abaixo apresenta os resultados de todas as chapas analisadas e em seguida os erros relativos de cada análise.

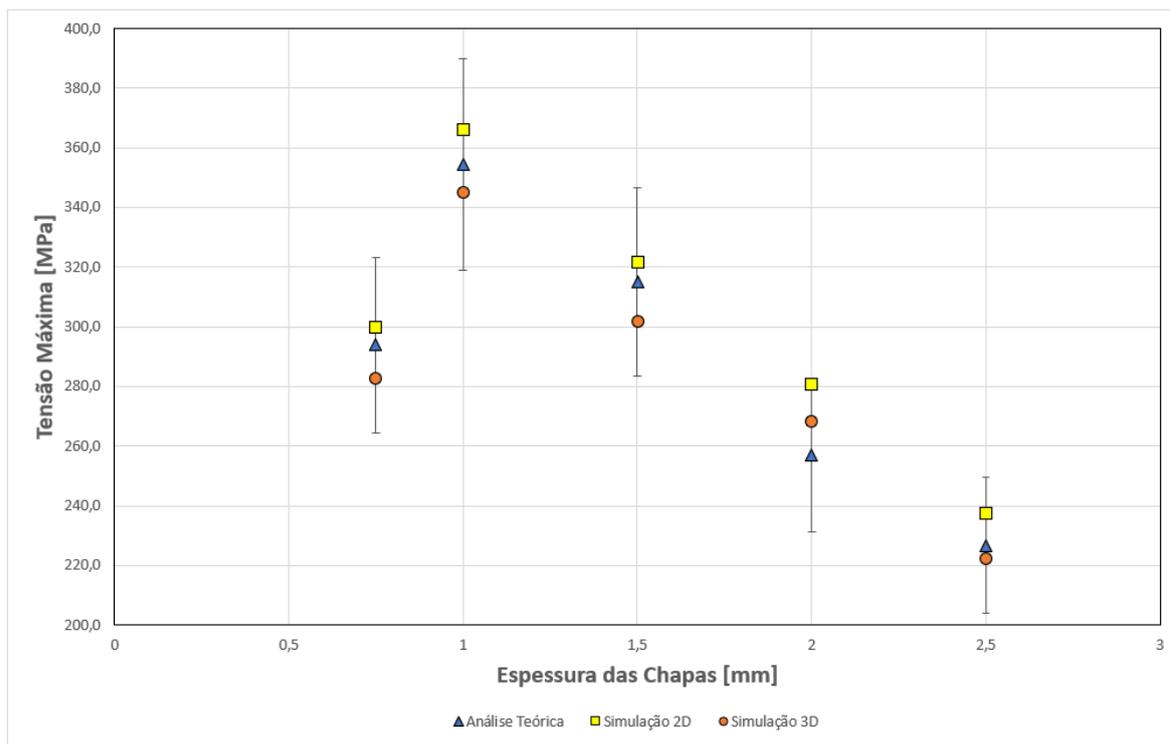


Figura 8 - Gráfico comparativo das tensões máximas teóricas e numéricas x espessura de chapa para os valores de torque definidos na tabela 1.

Tabela 2 - Discrepância entre os valores simulados em 2D e 3D e o valor teórico para cada chapa.

Torque [Nm]	Esp. da Chapa [mm]	Erro Teórico x 2D [%]	Erro Teórico x 3D [%]
0,5	0,75	2,05	3,87
1	1	3,29	2,63
2	1,5	2,17	4,21
3	2	9,31	4,44
4	2,5	4,73	1,88

Pode-se observar pela tabela acima que os valores encontrados nas simulações convergem muito bem, exceto a simulação 2D para a chapa de 2 mm. Desta forma valida-se o modelo teórico e o numérico utilizado.

4.4 Seleção de Materiais

Após a validação do modelo foi feita uma busca por materiais que suportem a carga de trabalho para o sensor e que ao mesmo tempo tenha

uma deformação no regime elástico que seja possível mensurar. Dentre os materiais analisados estiveram aços de médio e alto carbono, plásticos de engenharia e ligas de alumínio. Os parâmetros analisados desses materiais foram o limite de escoamento e o módulo de elasticidade (módulo de Young).

Conforme já mencionado anteriormente, o sensor usado para medição da deformação é o extensômetro e para uma boa leitura é necessária uma deformação de fundo de escala mínima de 1000 *microstrains*. Ao analisar os materiais foi considerado primeiramente a questão técnica, que envolve o material suportar as cargas de trabalho e conseguir a deformação mínima para que o extensômetro consiga executar uma boa leitura e o último critério utilizado foi o preço do material. Os aços são os mais baratos, mas possuem um módulo de elasticidade muito elevado o que dificulta a leitura do extensômetro. Já os plásticos de engenharia que suportam as cargas e possuem baixo módulo de elasticidade são caros. Finalmente, as ligas de alumínio conseguem atender bem os requisitos, além de terem boa resistência contra corrosão. Apesar do projeto não contemplar um ambiente agressivo quanto à corrosão, a umidade do ambiente leva a corrosão dos materiais e isso causaria uma mudança na leitura do extensômetro, uma vez que região de medição seja afetada pela corrosão. A seguir é apresentada uma tabela com as análises de deformação para cada chapa utilizando-se a liga de Alumínio 2024-T6.

Tabela 3 - Dados da Liga de Alumínio 2024-T6 e valores médios de deformação.

Liga de Alumínio 2024-T6	
Limite de Escoamento: 415 MPa	
Módulo de Elasticidade: 72400 MPa	
Esp. da Chapa [mm]	Deformação [microstrains]
0,75	1298,7
1	1558,1
1,5	1377,4
2	1264,2

2,5	1087,3
-----	--------

Vale ressaltar que os valores apresentados para deformação na tabela acima são uma média da região onde o *strain gauge* é posicionado.

5 Instrumentação e Calibração das Chapas

O procedimento de instrumentação das chapas consiste em lixar e limpar as superfícies das chapas onde o extensômetro será aplicado, se tratando de alumínio, é importante colar o extensômetro imediatamente após limpeza, pois o rápido acúmulo de óxido na superfície pode causar algum erro de leitura. A imagem abaixo ilustra o extensômetro colado na chapa, a resistência de cada extensômetro é de 350 ohms e o fator de calibração (*gauge factor*) é de 2,1 adimensional.

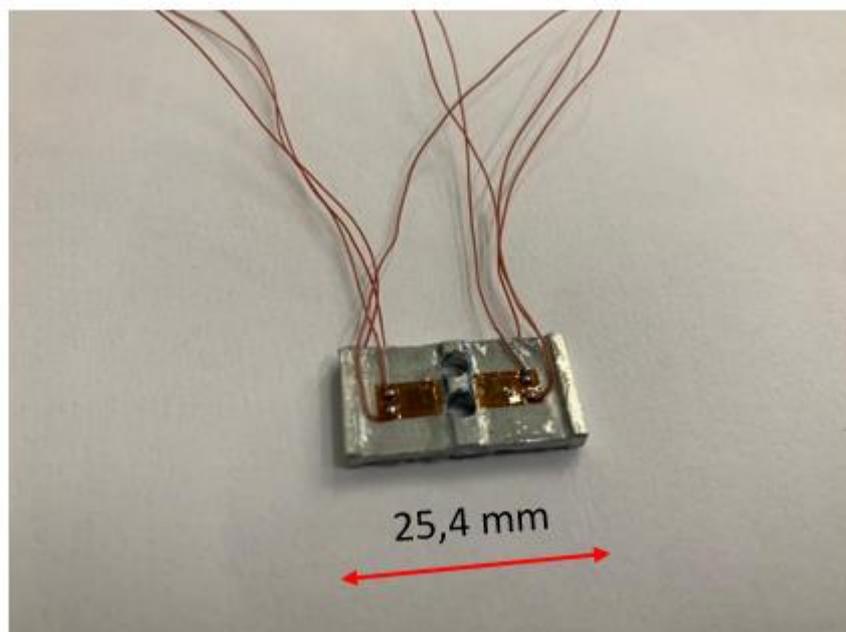


Figura 9 - Chapa com extensômetros colados.

Após a fixação dos sensores, foi construída a ponte de Wheatstone, conforme o esquemático abaixo.

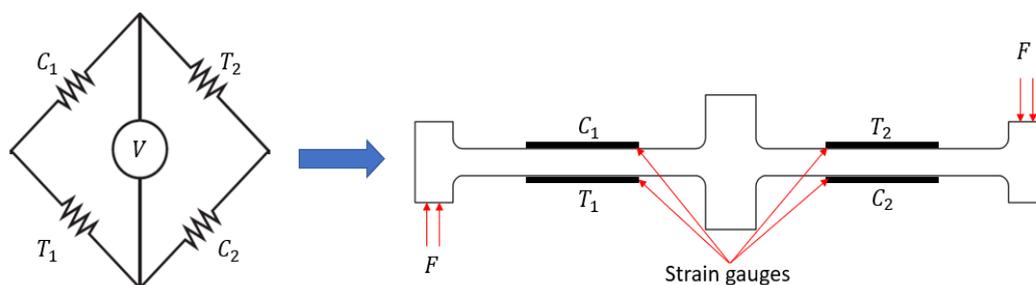


Figura 10 - Esquemático da ponte de Wheatstone aplicado à chapa.

A figura acima representa a ponte de Wheatstone montada na chapa, quando todo sistema estiver em movimento, a chapa sofre ação de um binário fazendo a chapa comprimir ou tracionar, conforme exemplificado na figura. C_1 e C_2 representam as compressões na parte superior e inferior da chapa respectivamente, de forma análoga, T_1 e T_2 representam a tração.

A ponte de Wheatstone montada na chapa é ligada a um módulo conversor analógico para digital (ADC) modelo HX711 24-bit com tensão e corrente de operação iguais a 5 V e 1 mA, respectivamente. O módulo conversor é então conectado a um *slip ring* que garante contato elétrico durante a rotação do sistema. O *slip ring* é um componente que faz a comunicação da placa conversora com o Arduino, esse componente é necessário para garantir o contato elétrico durante as medidas dinâmicas, onde o sensor estará em movimento rotativo. Fora da caixa do sensor, há um Arduino Uno que recebe o sinal digital que sai do conversor e é conectado a um computador onde é feito o controle e aquisição de dados obtidos pelo sensor. A figura a seguir ilustra a placa conversora e o Arduino utilizados na instrumentação.



Figura 11 - Módulo conversor HX711 (a esquerda) e Arduino Uno (a direita).

O software utilizado para IHM (Interface Homem Máquina) foi o IDE Arduino®.

Para realização da montagem mecânica do equipamento, foram projetadas molas de compressão e utilizados rolamentos. As molas tem a função de exercer uma pré carga nos rolamentos e manter os eixos unidos, garantindo assim um bom funcionamento de todo o conjunto. Os

rolamentos foram dimensionados para eixos de 3/8", porém, o *slip ring* possui o diâmetro interno um pouco menor, para evitar a usinagem de um novo eixo, optou-se por utilizar dois rolamentos de cada lado do sensor (ver Figura 14) a fim de garanti que os eixos estejam bem apoiados e evitando ao máximo o desalinhamento que poderia afetar as medições.

O procedimento de calibração pode ser dividido em duas etapas, sendo elas uma calibração estática e uma dinâmica. A calibração estática fora feita utilizando pesos de massa conhecida e aplicados ao eixo, cujo o braço de alavanca é o raio. Dessa forma, com o raio e peso conhecidos, é possível saber o torque aplicado ao sistema e adquirir a resposta do extensômetro, que por sua vez, está associada a uma tensão. A calibração dinâmica consiste em adquirir os dados com todo o sistema em movimento. Aplicando velocidade e torque conhecidos, a deformação do extensômetro é associada a uma tensão, assim como na calibração estática. A curva de calibração pode ser obtida variando os pesos na calibração estática e variando a velocidade e o torque aplicado na calibração dinâmica, deste modo, é possível construir uma curva de calibração com as incertezas associadas. No presente trabalho apenas a calibração estática foi feita a fim de validar todos os conceitos aplicados no protótipo e obter as curvas de calibração para cada chapa.

6 Bancada de Testes

O protótipo foi fabricado na oficina do LEF e posteriormente instrumentado e calibrado. As figuras abaixo mostram o projeto realizado no software SolidWorks® e o protótipo fabricado.

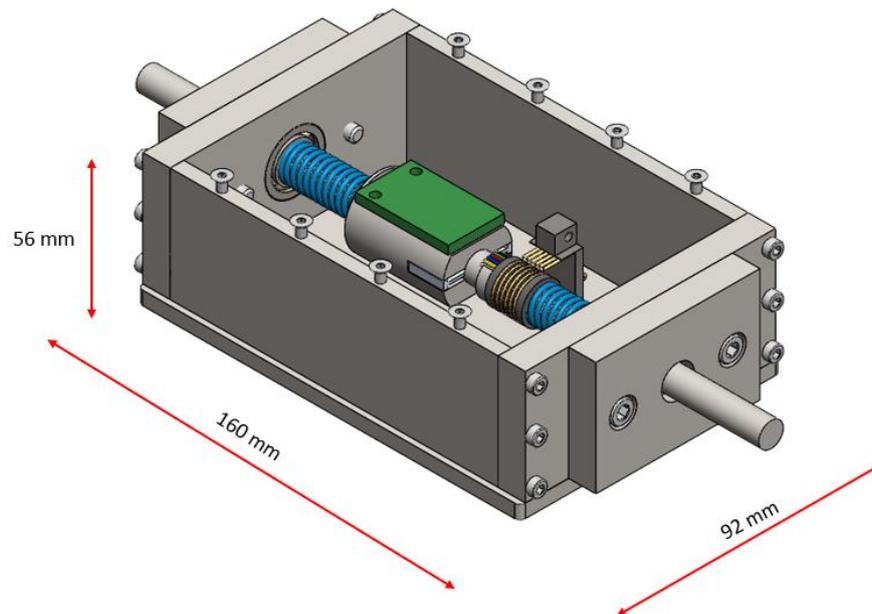


Figura 12 - Protótipo virtual.

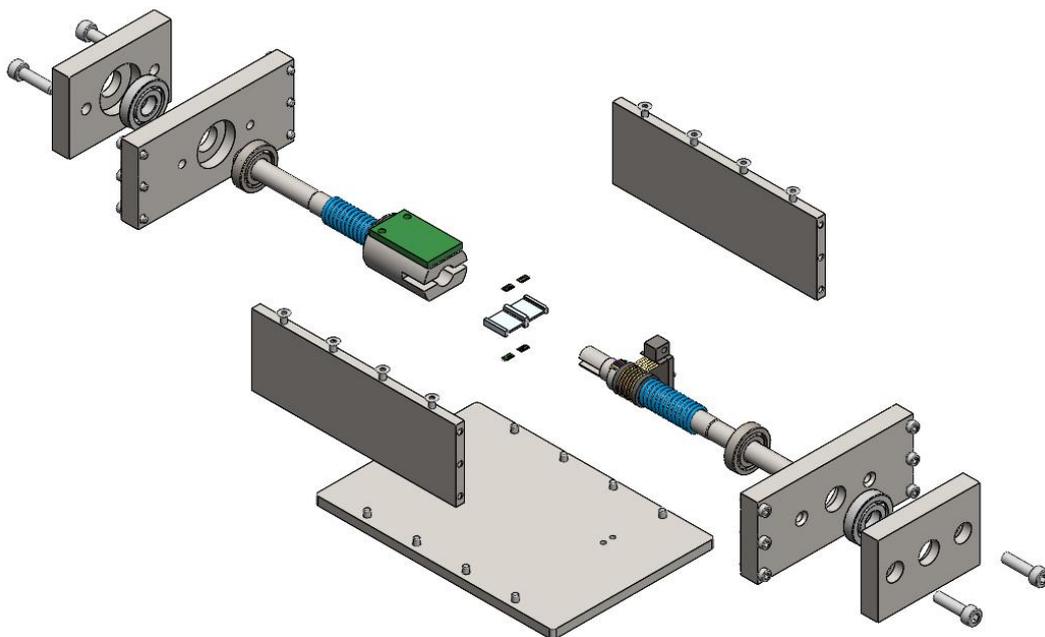


Figura 13 -Protótipo virtual em vista explodida.

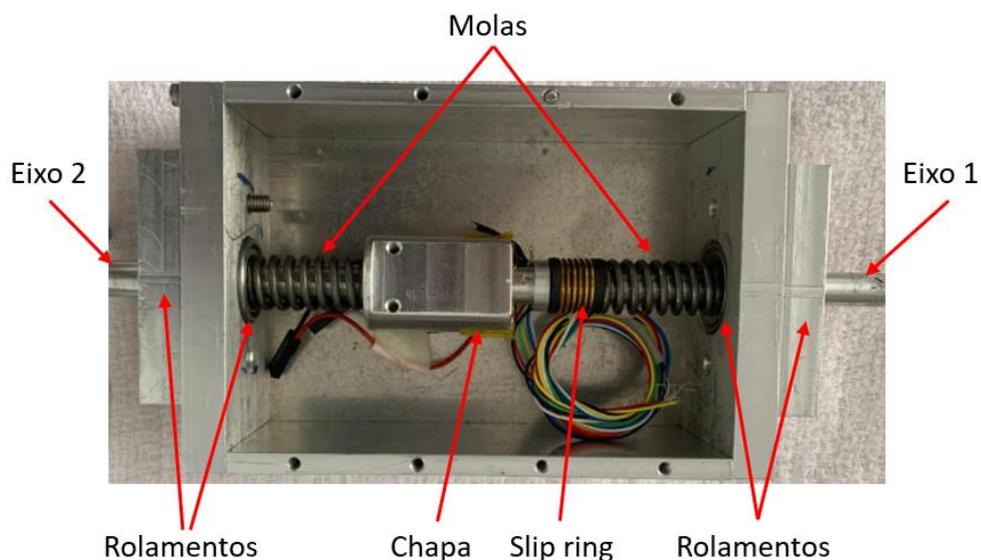


Figura 14 - Protótipo real.

Após a fabricação do protótipo, montou-se uma bancada testes para execução das primeiras calibrações. Além dos componentes exibidos na Figura 14, foram necessários outros materiais para a calibração, como por exemplo, o braço e alavanca utilizado. Os eixos possuem o diâmetro de $3/8''$ (9,53 mm), para aplicar um torque mensurável, seria necessária uma carga elevada que poderia danificar o protótipo, assim, optou-se por fabricar uma peça impressa, no material PLA, com intuito de aumentar o braço de alavanca e diminuir as cargas para medição do torque. O braço de alavanca possui 65 mm de comprimento.



Figura 15 - Braço de alavanca em material PLA.

A aplicação da carga foi feita com blocos de aço, suas massas foram medidas no laboratório LEF com o auxílio de uma balança, modelo LC10 da Marte que possui uma resolução de 2 gramas. A figura abaixo ilustra os blocos utilizados no processo de calibração, bem como a bancada montada.



Figura 16 - Blocos para calibração estática do sensor de torque.

As massas dos blocos, incluindo a bandeja, variam de 0,100 até 0,804 kg. Foram feitas diversas combinações de modo a atender a cada chapa, sendo menos massa para as chapas com espessura menor e aumentando a carga conforme a espessura.

A figura a seguir apresenta a etapa de calibração estática com todo o conjunto montado e aquisitando os dados lidos do extensômetro. Na figura também são ilustrados o Arduino Uno® utilizado bem como o módulo conversor HX711, além de um alicate de pressão para travar o giro do eixo.

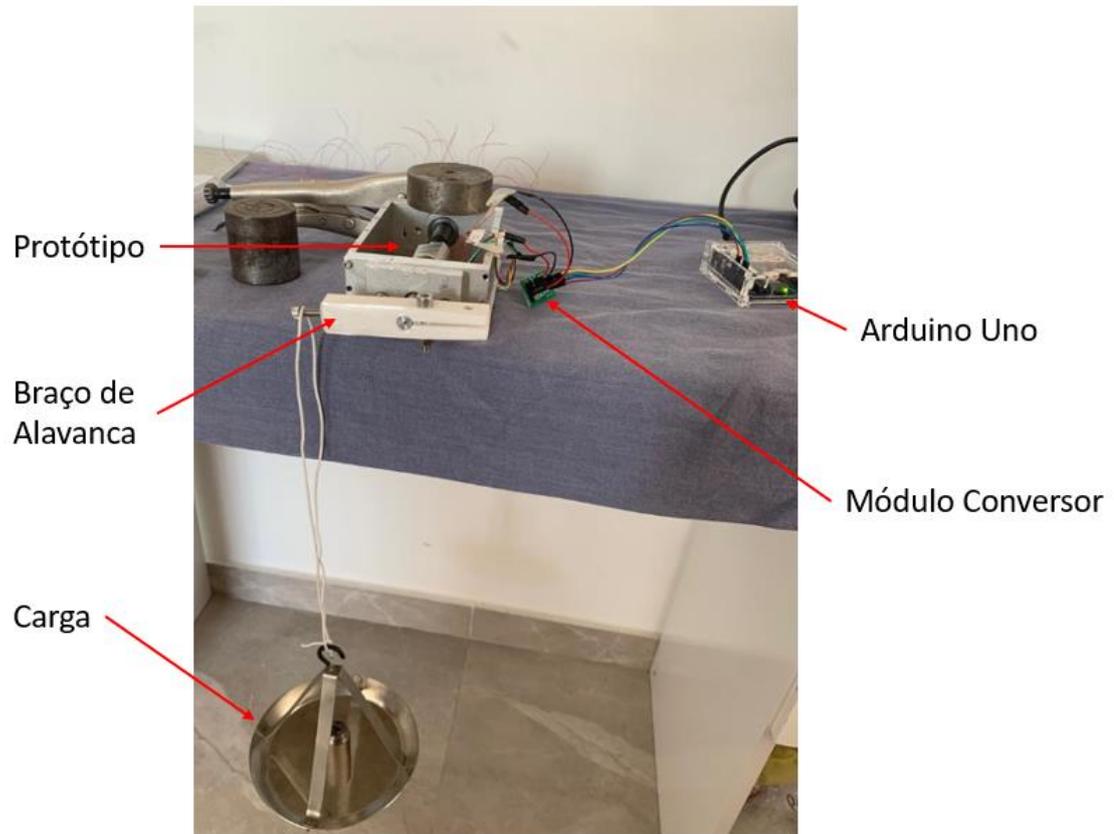


Figura 17 - Bancada de testes - calibração estática.

A configuração acima representa a calibração estática no sentido anti-horário enquanto que ao rotacionar 180 graus o braço de alavanca, a medição é considerada no sentido horário. Para fins de medição e apresentação das curvas e gráficos, o sentido horário foi adotado como positivo e o anti-horário como negativo.

7 Resultados

Nesta seção são apresentadas as curvas de calibração para cada espessura de chapa abordada no presente trabalho bem como os gráficos com os erros entre o torque medido e o torque associado ao ajuste.

Foi realizada uma análise de incerteza dos tipos A e B a análise do tipo é baseada nos dados aquisitados, destes dados foram extraídos o desvio padrão, e então calculada a incerteza padrão do tipo A, conforme a equação abaixo.

$$u_A = \sum \frac{T_{med} - T_{ajuste}}{N - 2} \quad (4)$$

Onde u_A [Nm] é a incerteza padrão tipo A, T_{med} [Nm] é o torque medido e o T_{ajuste} [Nm] é o torque dado pelo ajuste dos pontos através do método de mínimos quadrados e N é o número de medições.

A incerteza padrão do tipo B é dada pela resolução da balança, mencionada no capítulo anterior e do posicionamento da carga no braço de alavanca (ver Figura 17). Existe uma incerteza no posicionamento do fio que sustenta a carga na ponta do parafuso que faz parte do braço de alavanca, apesar de ser uma variação muito pequena que depende basicamente do passo do parafuso, optou-se por considerar. Assim, as equações abaixo descrevem as incertezas padrão da balança e do posicionamento.

$$u_{B_{balança}} = r_b \cdot R \cdot g \quad (5)$$

$$u_{B_{posição}} = p \cdot m \cdot g \quad (6)$$

No qual $u_{B_{balança}} [Nm]$ e $u_{B_{posição}} [Nm]$ são as incertezas padrão tipo B da balança e do posicionamento, respectivamente. $r_b [kg]$ é a resolução da balança, $R [m]$ é o braço de alavanca e $g [m/s^2]$ é a aceleração gravitacional, $p [m]$ é o passo do parafuso e $m [kg]$ é a respectiva massa utilizada na calibração.

De posse das equações (4), (5) e (6) é calculada a propagação de incerteza e o valor multiplicado por 2, segundo a tabela *t-student* para obter 95% de confiabilidade, conforme a equação abaixo.

$$u = \pm 2 \cdot \sqrt{u_A^2 + u_{B_{balança}}^2 + u_{B_{posição}}^2} \quad (7)$$

Dessa forma, é possível representar os resultados como uma banda de incerteza, onde as curvas de ajuste para os gráficos apresentados nas próximas subseções são acrescidas $\pm u [Nm]$.

Para cada chapa foram feitas duas calibrações, sentido horário e sentido anti-horário, tomando por referência a medição executada na Figura 17. Ainda, para cada chapa foram plotados os pontos de carregamento e descarregamento para as curvas de calibração, tornando mais visível a histerese em cada ciclo. Para cada curva foram feitos cinco carregamentos e cinco descarregamentos. Por fim, foi plotado um gráfico, para cada chapa, que ilustra o erro relacionado às medições de carregamento e descarregamento com a curva de ajuste central.

7.1 Chapa de 0,75 mm

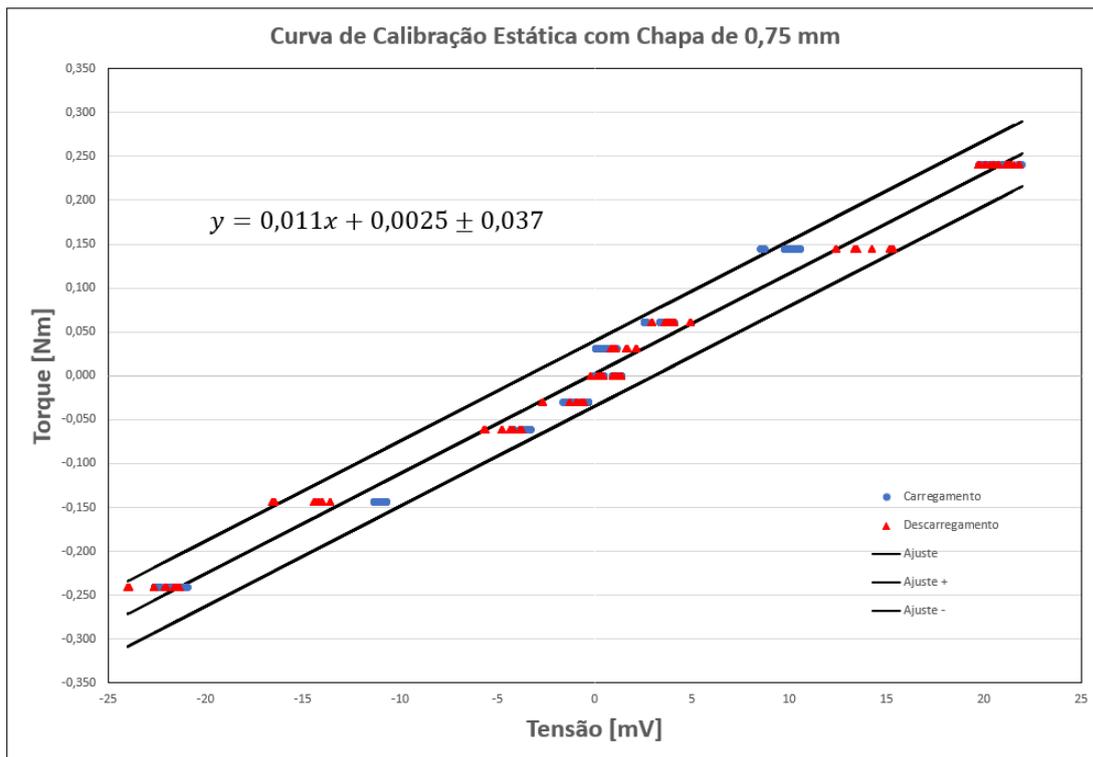


Figura 18 - Curva de calibração estática com chapa de 0,75 mm.

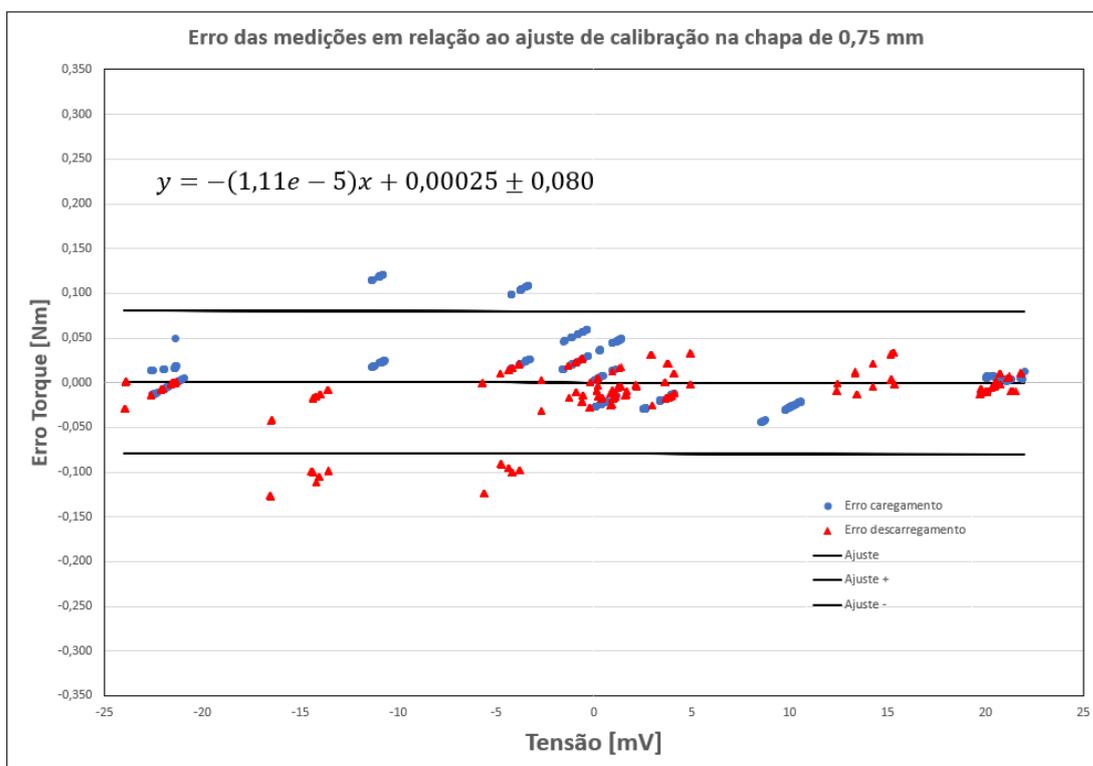


Figura 19 - Gráfico do erro das medições em relação ao ajuste para a chapa de 0,75 mm.

As curvas obtidas para a chapa de 0,75 mm de espessura apresentam grande dispersão nos dados adquiridos, isso se deve principalmente à sensibilidade e fragilidade da chapa, por ser muito fina, qualquer carga imposta, vibração ou qualquer outro tipo de perturbação acarreta na variação da medição. Note que para um torque da ordem de $\pm 0,150$ Nm tanto para o sentido horário quanto para o anti-horário, ocorre histerese e os pontos se distanciam significativamente enquanto que para um torque maior, apesar de ocorrer o espalhamento, a medição é mais confiável. Além disso, os ruídos podem ter tido grande influência para calibração dessa curva, conforme Figura 19. Apesar de ser possível mensurar torques na ordem de 0,05 Nm a incerteza associada é muito elevada devido ao espalhamento dos pontos, o que não garante boa confiabilidade para a medição.

7.2 Chapa de 1,0 mm

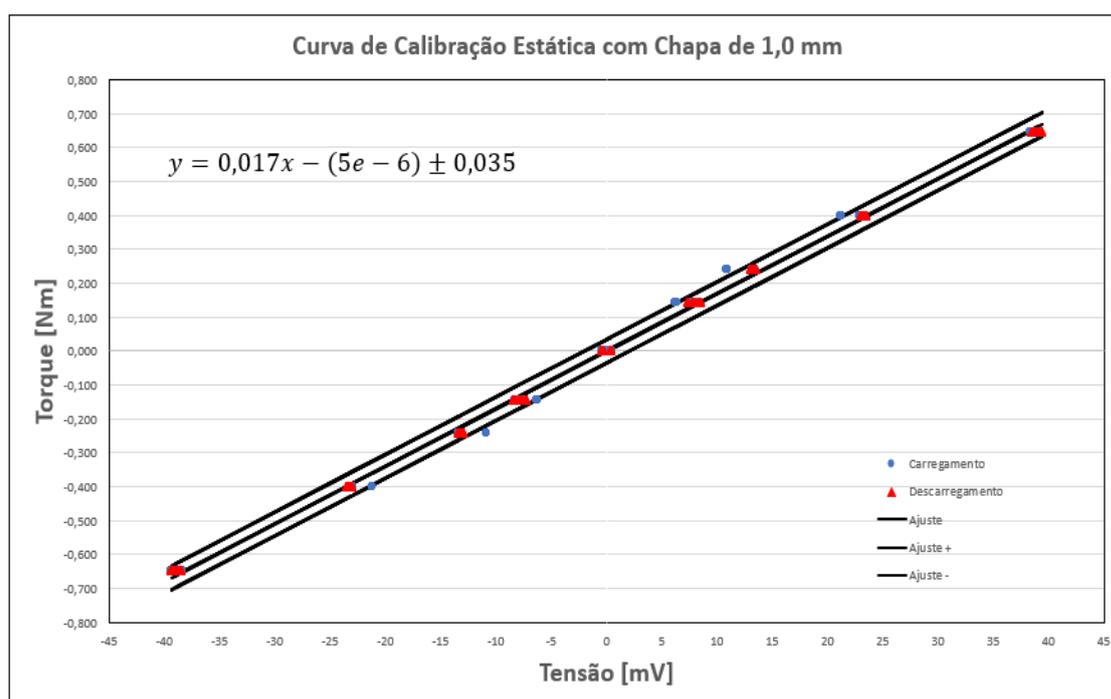


Figura 20 - Curva de calibração estática com chapa de 1,0 mm.

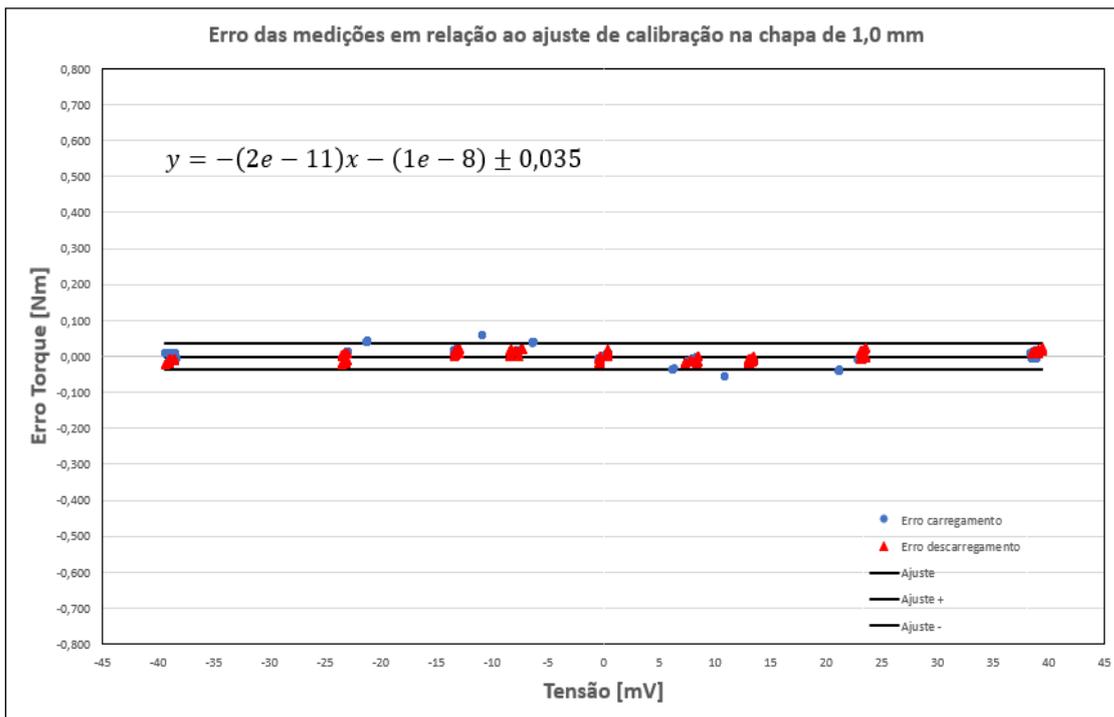


Figura 21 - Gráfico do erro das medições em relação ao ajuste para a chapa de 1,0 mm.

A curva de calibração para a chapa de 1,0 mm apresentou bom resultado, e apesar de haver espalhamento, o que é esperado, essa dispersão foi menor se comparado com a chapa de 0,75 mm. Ainda em comparação com a chapa de 0,75 mm, é notório que ocorre histerese, porém os pontos se espalham menos, o que torna a medição mais confiável.

7.3 Chapa de 1,5 mm

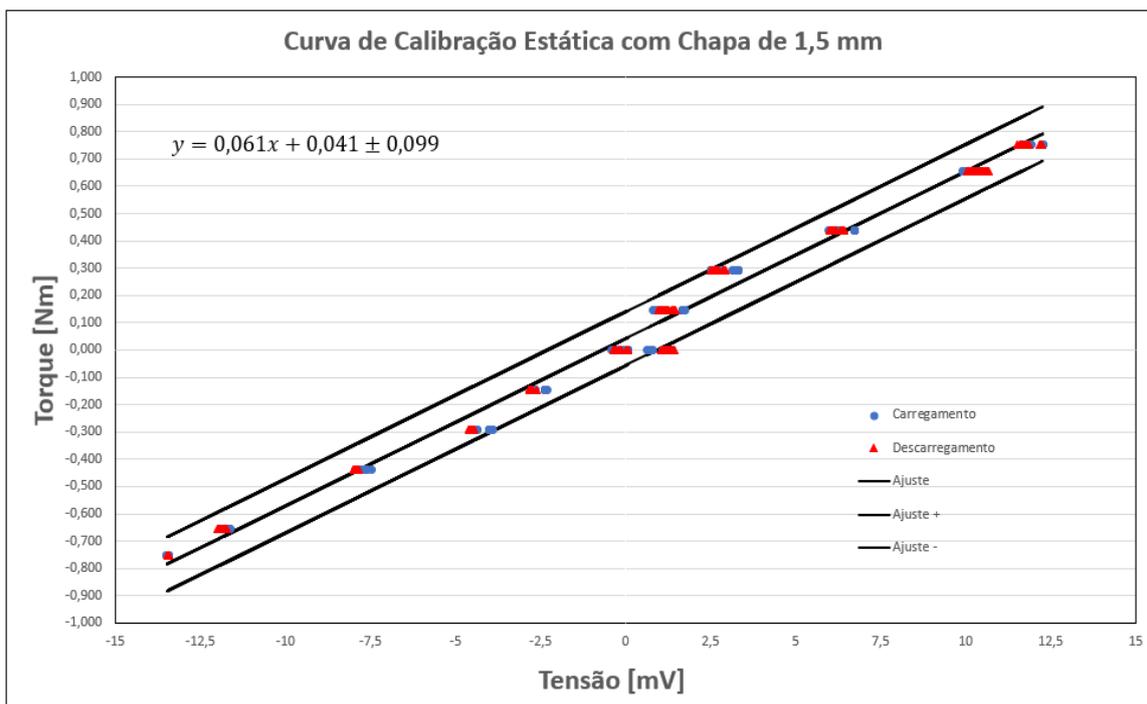


Figura 22 - Curva de calibração estática com chapa de 1,5 mm.

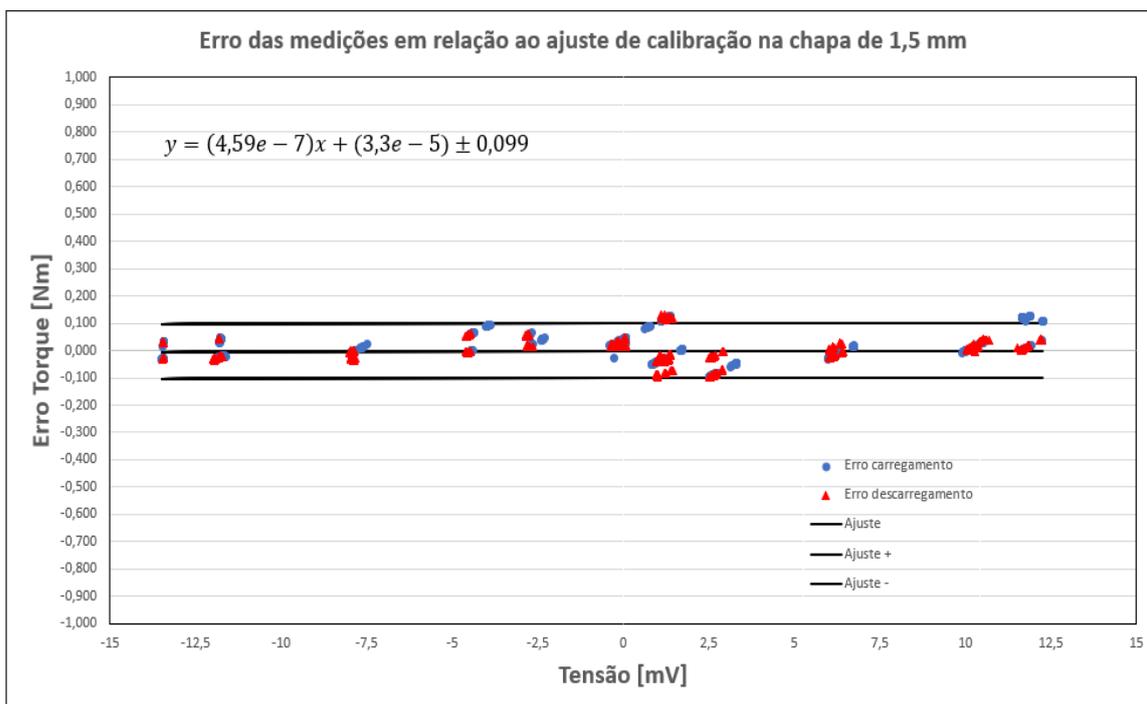


Figura 23 - Gráfico do erro das medições em relação ao ajuste para a chapa de 1,5 mm.

A curva de calibração para a chapa de 1,5 mm também apresentou boa resposta nas medições, o que pode ser visualizado pela Figura 22.

Porém, para faixa de torque entorno de 0,300 N.m a medição possui um afastamento significativo em relação ao ajuste, isto pode ser visto na Figura 23. Outro fato relevante que ocorre durante as medições é o afastamento dos pontos para torque igual a zero, exceto na chapa de 1,0 mm, todas as chapas apresentam um desvio do zero, que pode ser interpretado como torque residual nas chapas, ou seja, sempre que há um carregamento e um descarregamento, o torque não retorna para zero.

7.4 Chapa de 2,0 mm

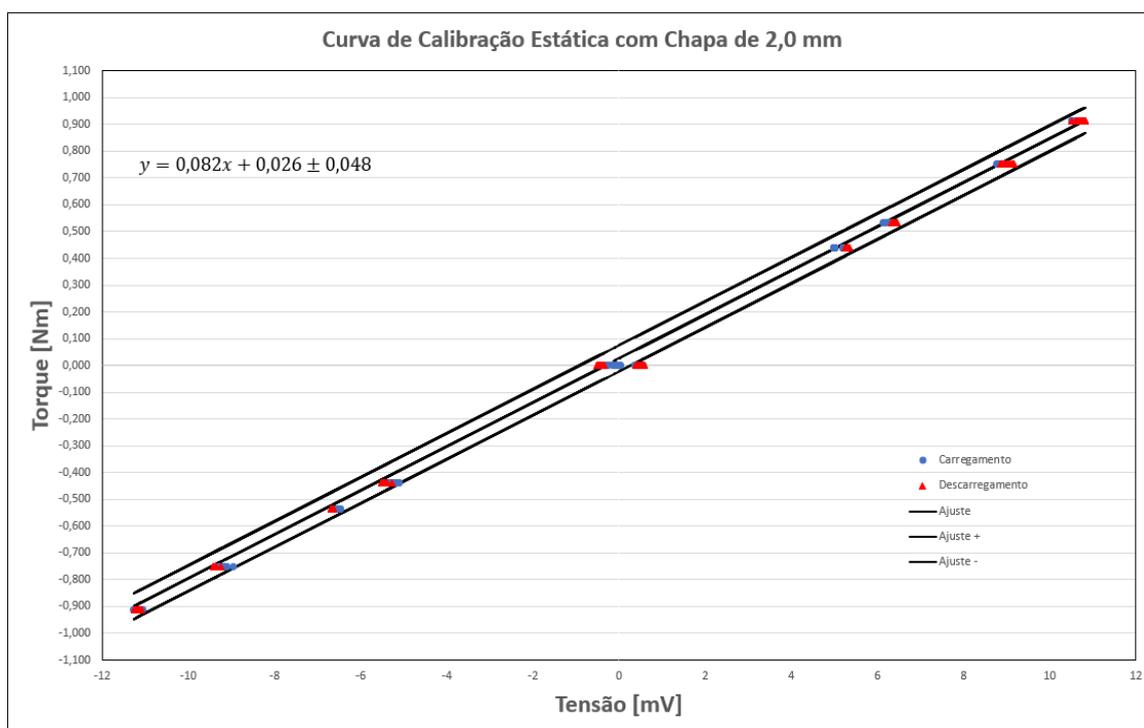


Figura 24 - Curva de calibração estática com chapa de 2,0 mm.

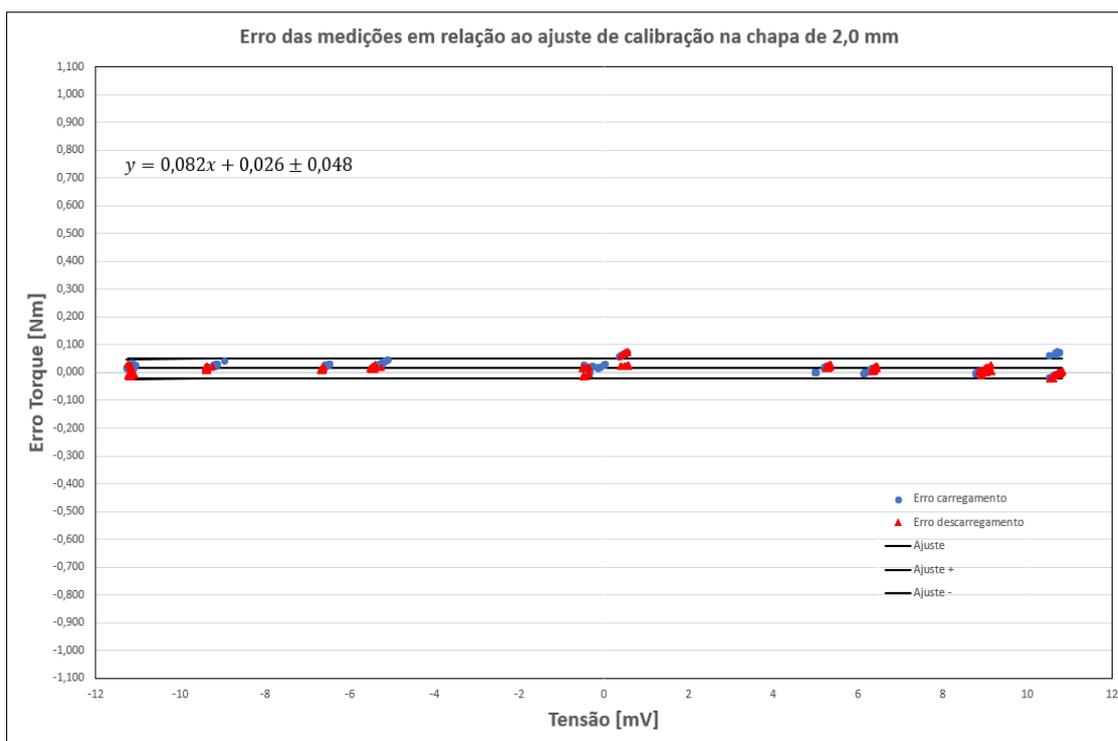


Figura 25 - Gráfico do erro das medições em relação ao ajuste para a chapa de 2,0 mm.

A Figura 24 apresenta a curva de calibração para a chapa de 2.0 mm, a qual apresentou bons resultados quanto às medições. Conforme já mencionado anteriormente nas chapas demais chapas, é perceptível a histerese, onde os pontos de descarregamento se afastam dos pontos de carregamento, contudo quanto maior o torque, o afastamento dos pontos de carregamento e descarregamento diminuem significativamente. Ainda sobre a curva de calibração, o torque residual também afeta as medições em chapas maiores, é possível visualizar esta discrepância na Figura 25.

7.5 Chapa de 2,5 mm

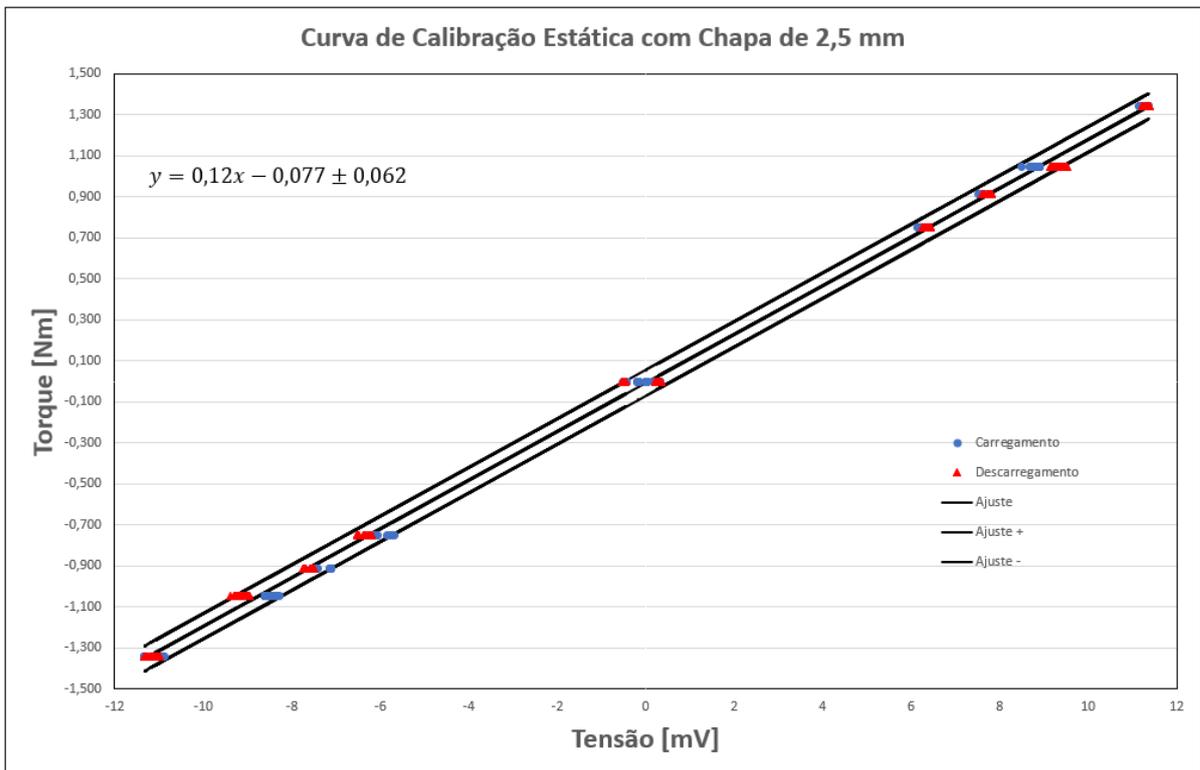


Figura 26 - Curva de calibração estática com chapa de 2,5 mm.

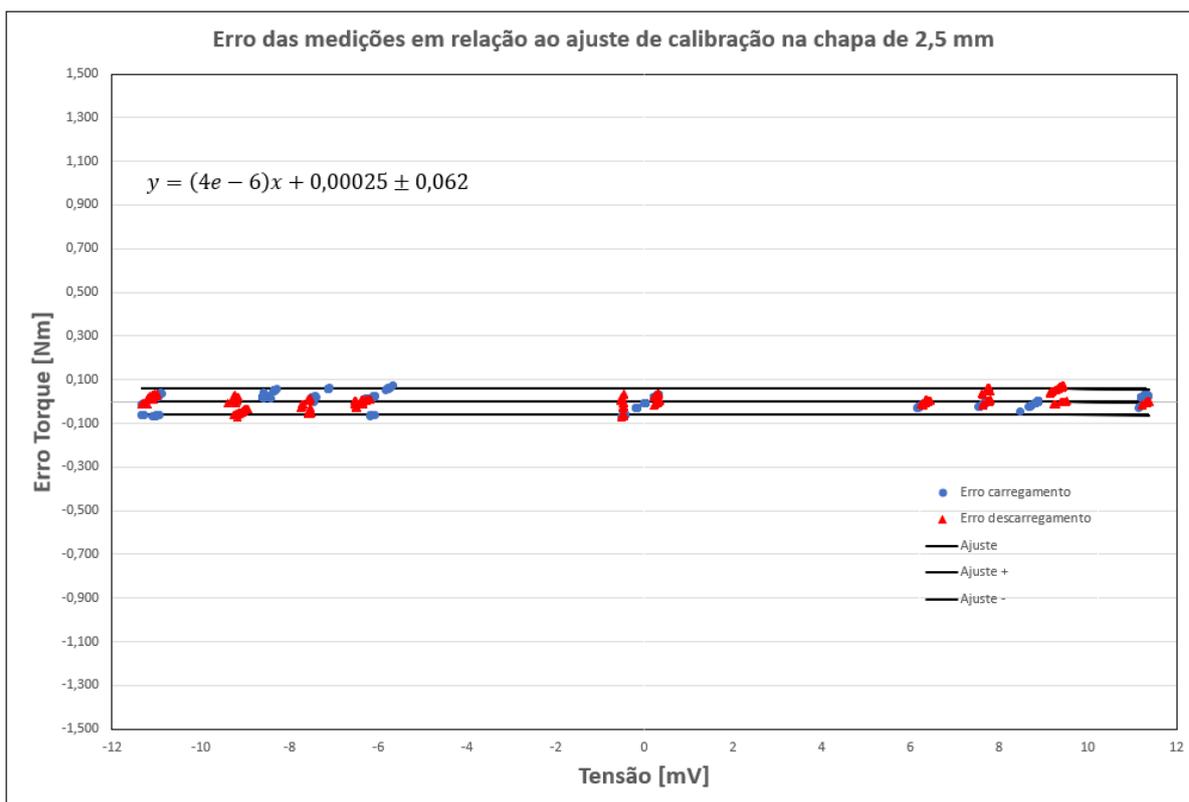


Figura 27 - Gráfico do erro das medições em relação ao ajuste para a chapa de 2,5 mm.

Diferente das demais chapas estudadas no presente trabalho, a chapa de 2,5 mm foi a única a apresentar mais histerese em um sentido do que em outro. De acordo com a Figura 26 que os pontos de descarregamento na parte negativa do gráfico (sentido anti-horário) apresentam maior afastamento dos pontos de carregamento do que os dados na parte positiva do gráfico, o que pode ser observado pela Figura 27. Não há uma explicação clara para essa diferença, o que é esperado é que os dados apresentem simetria pelo fato de ser a mesma bancada de teste para ambos sentidos. Ainda assim, os resultados da curva de calibração podem ser considerados bons para boa parte das medições.

8 Conclusão

Os objetivos traçados para o presente trabalho foram concluídos de forma satisfatória. Desde a modelagem e simulação das chapas até os testes para curva de calibração.

O protótipo construído apresentou bons resultados de acordo com a proposta inicial do projeto, que consistia em basicamente construir um sensor simples apenas com uma chapa sensoriadas com extensômetros e que fosse possível substituir a chapa por mais ou menos espessa conforme a necessidade de medição. O projeto denotou bom desempenho quanto ao custo, pois a usinagem de peças em aço e alumínio são consideravelmente inferiores à um sensor rotativo que não possui ampla faixa de medição como o proposto neste trabalho.

Os resultados das curvas de calibração apresentaram-se erros razoáveis, tendo em vista que esses foram os primeiros testes com o dispositivo. Tratando-se de um sensor rotativo a calibração estática não é o suficiente para aplicação do equipamento, porém pode ser entendido como uma primeira validação pelo fato das curvas apresentarem o comportamento linear como esperado. É importante ressaltar que apesar da proposta de medição com até 4 Nm, conforme explicitados nos objetivos do trabalho, por uma questão mecânica da bancada, não foi possível alcançar esse valor em torque. Embora a chapa tenha sido projetada para suportar a carga no regime elástico, devido ao fato do braço de alavanca ser pequeno, seria necessária uma carga muito alta para alcançar o torque de 4 Nm, o que poderia acarretar em carregamentos de flexão nos eixos. Isso implicaria diretamente na medição do torque, pois não seria possível garantir que o torque medido seria apenas devido a um carregamento simples.

Apesar do projeto ter funcionado em um primeiro momento, conforme já mencionado, existe a necessidade de traçar curvas de calibração dinâmica. Assim, o protótipo apresentado no presente trabalho precisa de melhorias na construção mecânica e na bancada de testes.

Inicialmente algumas melhorias podem ser implementadas como, por exemplo, trocar o material da caixa e dos eixos por alguma liga inox, lembrando que tanto a caixa como os eixos foram fabricados em alumínio, que é um material com resistência bastante inferior à do aço. É importante que o material seja inox para evitar ao máximo a corrosão e fragilizar os eixos com o passar do tempo. A chapa ainda precisa ser em alumínio devido ao módulo de elasticidade do material que garante a deformação necessária para uma boa aquisição da deformação com os extensômetros. Ainda sobre as melhorias no protótipo, as dimensões das chapas e eixos podem ser acrescidas a fim de facilitar a colagem dos extensômetros e melhorar a montagem de todo conjunto. Quanto as melhorias na bancada de teste, um acoplador mecânico metálico pode ser utilizado como braço de alavanca invés de utilizar uma peça feita por impressão 3D, além de ser necessário o aumento do comprimento do braço de alavanca. Pelo fato do braço de alavanca ser pequeno, existe dificuldade de testes com torques maiores, conforme já explicado anteriormente. Outra possível melhoria no projeto mecânico é diminuir a folga nas chapas menores, a Figura 18 apresentou maior espalhamento dos dados, devido não só a sensibilidade da chapa por ser muito fina, mas também devido as folgas mecânicas.

Para trabalhos futuros é importante implementar as melhorias citadas neste capítulo de forma a melhorar a aquisição de dados e diminuir as dificuldades de montagem e desmontagem, uma vez que, o diferencial do sensor é a facilidade na troca das chapas para assim, obter diversas faixas de medição. Ademais, o principal foco dos próximos trabalhos deve ser a medição dinâmica para confecção das curvas de calibração para uma completa validação do projeto.

9 Referências

- [1] BORGES, J. C. S. **Estudo e Desenvolvimento De Um Transdutor De Torque Para Eixos Rotativos Por Meio De Sensores De Efeito Hall**. 2015.
- [2] BRITO, I. V., FREIRE, E. O. & HOU, M. **Projeto De Um Sensor De Torque Sem Fio Para Eixos Girantes**. 2019.
- [3] BRITO, R. M. **Sistema Eletro-Eletrônico Para Medição Direta de Torque em Dispositivos Girantes Utilizando Extensômetros de Resistência Elétrica**. 1994.
- [4] HBM-Publication: **The Route to Measurement Transducers – A Guide to the Use of the HBM K Series Foil Strain Gauges and Accessories** (1989).
- [5] MORRIS, A. S. **Measurement and Instrumentation Principles**. 2001.
- [6] NETO, B. M. S. **Desenvolvimento De Uma Bancada Para Medição Automatizada De Potência Mecânica Em Motores Elétricos De Alta Rotação E Baixo Torque**. 2009
- [7] PILKEY, W.D. et al. **Peterson's Stress Concentration Factors**. Fourth edition. 2020.
- [8] SUH, J., LEE, J. & LEE, J. **Development and Application of Motor-Equipped Reaction Torque Sensor with Adjustable Measurement Range and Sensitivity**. 2020.