



# Projeto de dinamômetro para torneamento

**Palavras-Chaves: Usinagem, Extensômetro, Sensor, Tensão, Circuito, Ponte de Wheatstone.**

**Autores:**

**GUILHERME NUNES SOARES, FCA - UNICAMP**

**Prof. Dr. DANIEL IWAO SUYAMA (Orientador), FCA - UNICAMP**

**Prof. Dr. ALESSANDRO LUCAS DA SILVA (Co-Orientador), FCA - UNICAMP**

---

## 1. INTRODUÇÃO

O entendimento sobre o comportamento e a ordem de grandeza dos esforços de corte no processo de usinagem é importante uma vez que eles afetam a potência necessária para o corte, que é fundamental para a calibração do motor deste equipamento, a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Para tanto faz-se o uso de um dinamômetro, dispositivo capaz de medir a força que é aplicada sobre um objeto, porém estes equipamentos possuem elevado valor e se tornam inviáveis alguns projetos e pequenas fábricas.

Extensômetro (*Strain Gauge*) é o nome do componente capaz de medir a deformação mecânica que ocorre na direção longitudinal de sua grade de medição, por meio de mudança na resistência elétrica que, por sua vez, provoca um desequilíbrio mensurável no circuito da ponte elétrica no qual o extensômetro está conectado (KEIL, 2017). Entretanto, nota-se que em medições de alta precisão o sinal elétrico gerado pelo extensômetro em resposta à deformação é geralmente muito fraco, além de estar sujeito a interferências e ruídos elétricos, especialmente em ambientes industriais ou de laboratório, onde se faz o uso de cabos longos, podendo introduzir perdas de sinal e distorções.

Para solucionar este problema, se faz necessário a construção de um circuito intitulado de *Ponte de Wheatstone*, que possui uma configuração projetada para aumentar a sensibilidade da medição. Quando a ponte está equilibrada, a saída é ajustada para ser zero. Qualquer variação na resistência do sensor ou nas resistências conhecidas resulta em uma pequena diferença de potencial na saída, que pode ser amplificada ou detectada por um circuito amplificador operacional. Este componente foi projetado para amplificar sinais elétricos aplicados a suas entradas de maneira altamente controlada e previsível através do ganho de tensão.

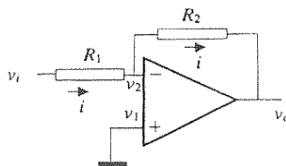
Dentre as diferentes montagens existentes para utilização do amplificador operacional (AmpOp) está a montagem inversora, que é composta por um circuito amplificador operacional que produz uma saída que é uma versão invertida e amplificada do sinal de entrada. Ele é configurado usando um amplificador operacional e dois resistores, onde a inversão ocorre devido à realimentação do sinal de saída para o terminal inversor do amplificador. O ganho de tensão do amplificador inversor é determinado pela relação entre os resistores e apresenta uma simetria entre a relação entrada-saída e com o valor da razão entre as resistências de realimentação de entrada do circuito (CAMPILHO, 2000).

Assim, o objetivo deste trabalho é a construção de um protótipo de dinamômetro extensométrico, potencializado por um circuito amplificador de sinal. Além da programação capaz de converter variação de potencial elétrico em variação de tensão mecânica.

## 2. METODOLOGIA

O amplificador operacional com montagem inversora segue o modelo disponibilizado na Fig. 1 e apresenta um ganho de tensão determinado pela relação entre os dois resistores  $R_1$  e  $R_2$ , de acordo com a Equação 1 (CAMPILHO, 2000).

**Figura 1** - Amplificador Operacional inversor.



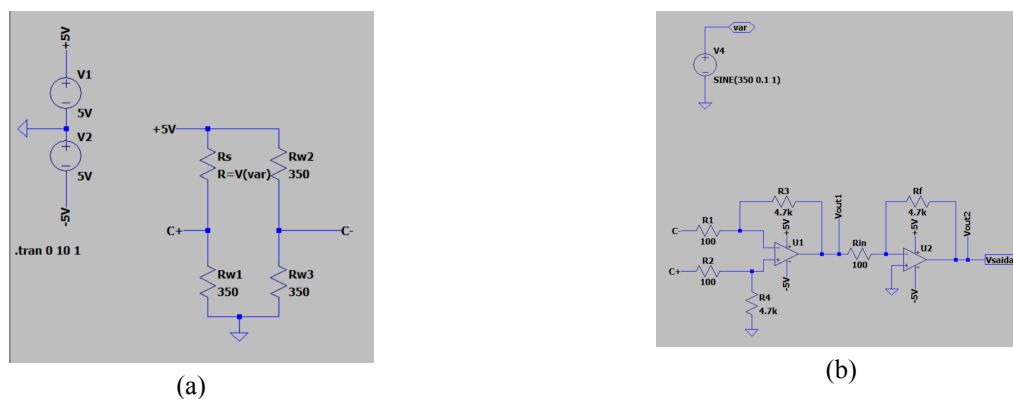
Fonte: adaptado de CAMPILHO, 2000.

$$\frac{v_o}{v_i} = - \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

O primeiro protótipo foi montado logo após o estudo do amplificador e, para tanto, utilizaram-se dois apoios de madeira e uma barra chata de aço com 400 mm de comprimento, 26 mm de largura e 7,2 mm de espessura, nela estava acoplado um extensômetro com resistência de 350 ohms. Ademais, foi necessário uma fonte de tensão digital ajustada em 5V, um amplificador diferencial LM 358 produzido pela Texas Instrument e 7 resistores elétricos, 3 resistores com resistência de 350Ω necessários para construção da ponte de Wheatstone e 2 resistores de 100Ω e 2 de 4700Ω para compor a configuração inversora do amplificador.

Destaca-se que o amplificador operacional utilizado, LM 358 (Texas Instruments), é um amplificador operacional duplo, isto é, ele contém dois amplificadores operacionais independentes em um único chip, o que economiza espaço e potencializa o ganho de tensão.

Em seguida, utilizou-se o software LTSpice para elaboração de um circuito virtual, para auxiliar na compreensão do funcionamento do circuito e dos resultados que deveriam ser obtidos. A montagem completa está na Fig. 2, onde é possível ver a fonte de tensão, a ponte de Wheatstone, o resistor variável que representa o extensômetro e os dois estágios do amplificador operacional, A e B, assim como o valor da resistência de todos os resistores.



**Figura 2** - Fonte de tensão e ponte de Wheatstone (a). Resistor variável e montagem inversora do amplificador operacional (b). Fonte: LTSpice.

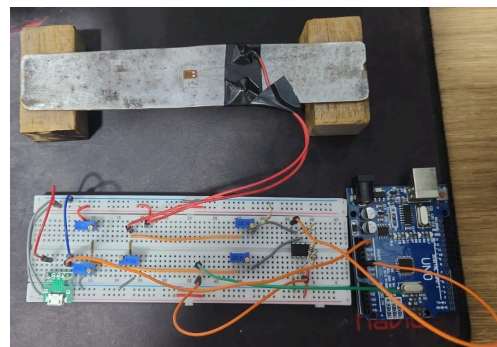
Para otimizar o tempo e facilitar o processo de testes e ajustes fora de laboratório, foi iniciada uma nova montagem e, para tanto, adquiriu-se materiais alternativos de menor custo, mantendo a funcionalidade essencial dos componentes utilizados em laboratório. Esta abordagem permitiu a continuidade do desenvolvimento e testes do circuito fora do ambiente de laboratório, garantindo assim a eficiência no cumprimento das etapas do projeto. A fonte

de alimentação utilizada em laboratório é do modelo dual rail, fornecendo duas tensões de alimentação simétricas, uma positiva e uma negativa, em relação a um ponto comum, que geralmente é o terra. Este tipo de fonte é necessária para operação adequada do LM 358, já que o mesmo necessita de um ponto de operação que, com esta fonte, pode ser estabelecido em zero volts. Assim o amplificador pode amplificar sinais que variam simetricamente em torno de 0V. Para contornar a necessidade do uso de uma fonte de valor elevado, foi montado um protótipo de alimentação que simula a funcionalidade dual rail, como o representado na Figura 2 (a), utilizando duas fontes de tensão de 5V, uma sendo um carregador de celular e outra, uma placa Arduino Uno R3.

Outra alteração foi a substituição dos resistores presentes no circuito por potenciômetro (trimpots), um tipo de resistor ajustável que permite a calibração fina de circuitos eletrônicos e facilita o ajuste para o equilíbrio da ponte. Por fim, utilizou-se um novo material para realizar o experimento, com propriedades dimensionais e mecânicas de acordo com a Tabela 1, além de dois suportes de madeira, com dimensão de 5,5 cm x 2,8 cm x 2,5 cm. Para este modelo, o extensômetro foi acoplado no centro da chapa metálica, apenas com a finalidade de entender a funcionalidade do sistema, a Fig. 4 contempla uma visão geral da montagem do modelo.

| Propriedade             | Valor                  |
|-------------------------|------------------------|
| Comprimento             | 175 mm                 |
| Largura                 | 34 mm                  |
| Espessura               | 1 mm                   |
| Material                | Aço Carbono            |
| Densidade               | 7850 kg/m <sup>3</sup> |
| Módulo Elástico         | 200 GPa                |
| Coefficiente de Poisson | 0,3                    |

**Tabela 1** - Propriedades da chapa metálica.



**Figura 4** - Montagem prática composta pelo sensor acoplado a chapa metálica, circuito amplificador e duas fontes de tensão.

Para encontrar o melhor local para conectar o sensor com a chapa metálica, utilizou-se o software ANSYS APDL (ANSYS Parametric Design Language) que permite a criação de modelos paramétricos, assim como a definição de geometrias, aplicação de cargas e condições de contorno para executar análises complexas de forma programática. Dessa forma, a condição de contorno utilizada foi a de viga biapoada e, como a estrutura analisada é bidimensional seriam observados três graus de liberdade (gdl), deslocamento vertical, horizontal e rotação perpendicular, porém existe a restrição do deslocamento vertical e rotacional, mantendo o deslocamento horizontal livre.

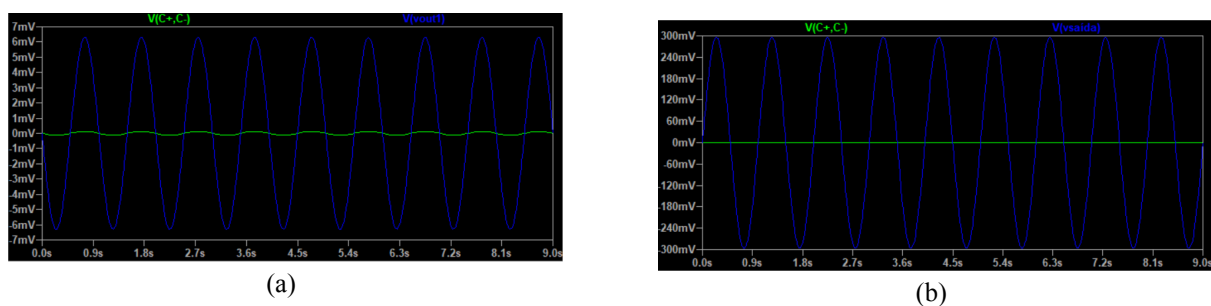
A barra foi separada em dez elementos, onze nós e o cálculo analítico do software é responsável por encontrar o deslocamento de cada elemento, permitindo comparar o

deslocamento de cada nó e, o local ideal para a aplicação do sensor se encontra onde for computado o maior módulo de deslocamento. Ademais, os trabalhos desenvolvidos por Vitor Orsoli Vieira Soares (Modelagem e Simulação Numérica Aplicada a Projeto de Sensores de Força para Processos de Usinagem) e Anna Karolina Dos Santos (Projeto e construção de um sistema de aquisição de dados de baixo custo para o estudo do comportamento mecânico de ferramentas) auxiliaram no desenvolvimento deste projeto.

### 3. RESULTADOS

Seguindo a teoria referente a funcionalidade do amplificador operacional com a configuração inversora, o ganho de sinal obtido na saída do aparelho deve seguir a relação dos dois resistores utilizados na montagem, no caso, a relação entre o resistor de  $4700 \Omega$  e  $100 \Omega$ , o que representa um ganho de 47 vezes.

Para uma melhor visualização dos dados, foi imputado uma função de variação para o extensômetro no formato de senoide, logo, nota-se que saída da ponte apresenta uma pequena variação, na escala de  $10^{-6}$  volts. Em seguida, analisa-se os valores de tensão nas saídas do amplificador, saída 1(out1) e saída final(out2), presentes na Fig. 5.

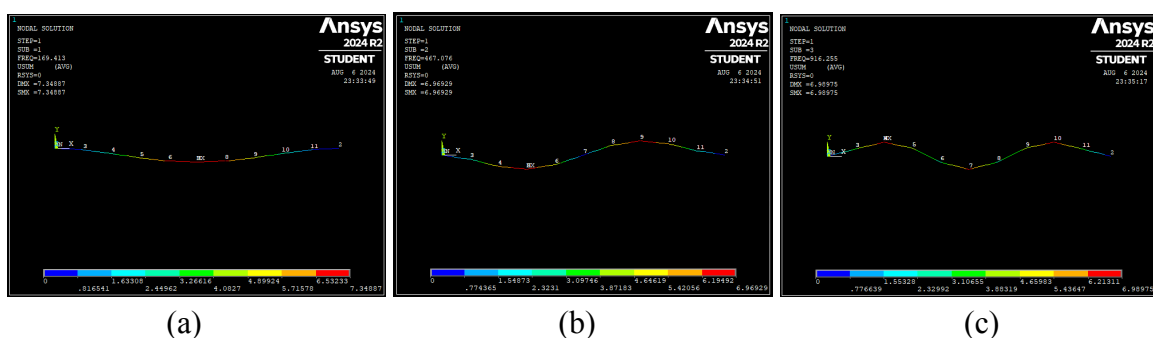


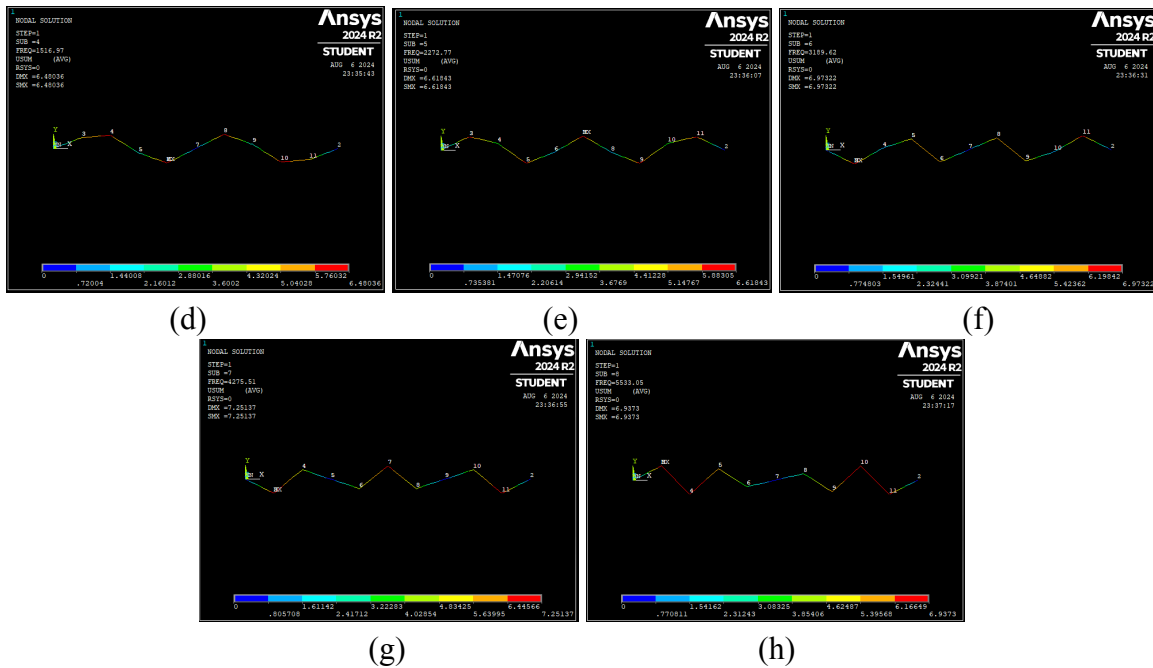
**Figura 5** - Gráfico de tensão ( $mV$ ) vs tempo ( $s$ ) para a primeira saída (a) e segunda saída (b) do amplificador operacional LM 358 em comparação com a saída  $c+$  e  $c-$  da Ponte de Wheatstone. **Fonte:** LTSpice.

Através da análise da figura, percebe-se uma verossímil representação da teoria, uma vez que o ganho obtido na primeira saída, aproximadamente  $7 mV$ , é 47 vezes maior do que a saída da ponte, aproximadamente  $150 \mu V$  e, por fim, o ganho na última saída é próximo de  $300 mV$ .

Para os resultados da análise modal, foram analisadas as frequências naturais de 8 modos de vibrar da estrutura, para encontrar o melhor local de fixação para o extensômetro. Este local é definido através dos maiores deslocamentos, no eixo vertical, dos nós que compõem a chapa metálica.

Definindo uma ponta da chapa como o ponto zero, o melhor local de fixação é a 7 cm do marco inicial, este local corresponde ao nó 6 e, como visto na Fig. 6, este local sofre o maior deslocamento comparando os resultados obtidos em cada modo de vibrar.





**Figura 6** - Frequências naturais da chapa metálica. (a) 1º modo (b) 2º modo (c) 3º modo (d) 4º modo (e) 5º modo (f) 6º modo (g) 7º modo (h) 8º modo. **Fonte:** Ansys Mechanical APDL.

## 4. CONCLUSÃO

Considerando o viés econômico do projeto, a montagem do circuito para captura de deformações em superfícies metálicas se mostrou eficiente, por mais que existam imprecisões que são observadas ao longo da estrutura, como a utilização de materiais que possuem um menor custo e são encontrados no mercado com facilidade.

A montagem digital, tanto do circuito utilizando o software LTSpice quanto da chapa metálica utilizando o ANSYS Mechanical APDL foram fundamentais para otimizar a elaboração do protótipo físico, contribuindo no entendimento do que deveria ser feito e também fornecendo dados comparativos para guiar o resultado do projeto. O extensômetro se mostrou eficiente na aquisição da deformação sofrida na chapa e, com o uso do amplificador operacional LM 358, obtiveram-se elevados ganhos, que, em testes preliminares, se mostraram maiores do que o ganho teórico esperado.

Em sequência, serão realizados novos testes para confirmar qual o ganho real do modelo prático e a utilização de um Arduino UNO R3 para converter a leitura da variação de tensão elétrica em tensão mecânica. Os componentes do circuito, como a fonte de alimentação, também serão substituídos por equipamentos com maior precisão, para garantir a acuracidade na aquisição do sinal para a montagem final, onde o sensor extensômetro será acoplado na posição ideal sugerida pelo resultado do modelo computacional.

## 5. BIBLIOGRAFIA

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8 ed. São Paulo: Artliber, 2013.

KEIL, Stefan. **Technology and Practical Use of Strain Gages With Particular Consideration of Stress Analysis Using Strain Gages**. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2017.

CAMPILHO, Aurélio. **Instrumentação electrónica: métodos e técnicas de medição**. Porto: FEUP, 2000.

TEXAS INSTRUMENTS. **LM358 operational amplifiers datasheet**. Rev. C. Disponível em: <https://www.ti.com/product/LM358>. Acesso em: 16 nov. 2023.