



# **Modelagem e Simulação Numérica Aplicada a Projeto de Sensores de Força para Processos de Usinagem**

**Palavras-Chaves: Usinagem, Vibração, Método dos Elementos Finitos, Análise Modal.**

**Autores:**

**VITOR ORSOLI VIEIRA SOARES, FCA - UNICAMP**

**Prof. Dr. JAIME HIDEO IZUKA (Orientador), FCA - UNICAMP**

**Prof. Dr. RODRIGO FERNANDO GALZERANO BALDO (Co-Orientador), FCA - UNICAMP**

---

## **1. INTRODUÇÃO**

A usinagem é o processo de manufatura que apresenta as maiores variações das condições e dos parâmetros de operação. Neste processo, pode-se trabalhar com uma variedade de metais e ligas, sendo usada no mundo inteiro. O torneamento é o tipo mais básico e comum de corte de metal, onde a ferramenta é fixada e movida constantemente entre os eixos enquanto o material trabalhado está em rotação. Deste processo, resultam peças de formato cilíndrico ou perfilados mais complexos (TRENT e WRIGHT, 2000).

Devido a alta velocidade e a dureza do metal usinado, ocorre o fenômeno de vibração da ferramenta de usinagem. O problema da vibração em usinagem tem sido abordado há muito tempo, uma vez que a vibração limita a produtividade do processo de usinagem (TAYLOR, 1906).

A vibração em processos de usinagem já vem sendo estudada há mais de um século (SIDDHPURA e PAUROBALLY, 2012), sendo utilizados alguns métodos para o seu estudo. Para a Análise Dinâmica e Estrutural, geralmente utilizamos o Método dos Elementos Finitos para o desenvolvimento de modelos numéricos e simulações deste fenômeno estrutural. Como exemplo, Baker e Rouch (2002) analisaram a instabilidade de um processo de usinagem utilizando a técnica descrita e criaram um modelo estrutural do sistema da máquina-ferramenta, mas a integridade dos resultados não é validada por resultados experimentais.

Para isso, a medição de força é uma ferramenta essencial para compreender e avaliar o comportamento e desempenho de um processo de corte (YOUSSEF e EL-HOFY, 2008). É muito difícil medir esse parâmetro diretamente no momento do corte, destacando-se dois métodos: a utilização de um cristal piezoelétrico muito sensível às forças mecânicas, que produz uma carga proporcional à força aplicada. O segundo método é a utilização de deformações e deflexões produzidas pela força de um membro elástico. Um exemplo comum desse último caso é a fixação de extensômetros em um anel no qual captura a deformação e converte em tensão equivalente (YALDIZ, 2007; KORKUT, 2003).

Normalmente, anéis de formato circular, quadrado e octagonal são adotados com estruturas geométricas fundamentais de um transdutor. Um transdutor em forma de anel circular exibe excelente sensibilidade sob todas as direções de cargas, apesar disso, sua implementação parece ser difícil devido às dificuldades na montagem do próprio anel com outras superfícies e na fixação de extensômetros na superfície curva do anel. Então, foi desenvolvido o cenário do anel octógono-circular, que resolveu o problema de montagem e

identificação das posições de tensão/deformação, e compensou uma parcela significativa da sensibilidade (YOUSSEF e EL-HOFY, 2008).

O objetivo deste trabalho consistiu na análise teórica da construção de um dinamômetro de anel octagonal, assim investigando a deformação que o extensômetro é submetida nos locais onde ele é fixado através do método dos elementos finitos comparado com o método analítico. Adicionalmente, foi feita uma análise modal para auxiliar onde deve ser feita a fixação tanto do extensômetro quanto do piezoelétrico em um porta ferramenta, auxiliando os trabalhos “Projeto e construção de um sistema de aquisição de dados de baixo custo para o estudo do comportamento mecânico de ferramentas” de Anna Karolina dos Santos e “Projeto de dinamômetro para torneamento” de Guilherme Nunes Soares.

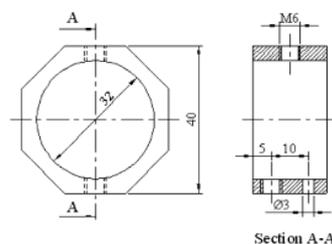
## 2. METODOLOGIA

Até o presente momento, a metodologia deste trabalho foi dividida em duas etapas: primeiramente foi realizada a montagem do dinamômetro em formato de anel octagonal em desenho e depois analisada as deformações em uma análise estrutural computacional e equações analíticas em seus respectivos pontos de fixação dos extensômetros. Já o método auxiliar utilizou-se a análise modal do software de elementos finitos para localizar onde seria ideal fixar o extensômetro.

### 2.1. Deformação dos extensômetros

No primeiro método utilizou-se do método analítico e computacional para ver a deformação a que o extensômetro seria submetido em diferentes forças. Para isso foi utilizado o molde de um anel octagonal com dimensões já definidas pelo trabalho de Yaldiz e Unsaçar (2006) e o trabalho de Alipanahi (2022) com as propriedades tanto dimensionais quanto mecânicas na tabela 1.

**Figura 1** - Desenho técnico do dinamômetro.



**Fonte:** Yaldiz e Unsaçar, 2006.

**Tabela 1** - Propriedades do anel octagonal.

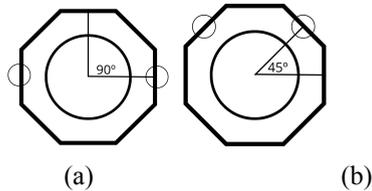
| Propriedade             | Valor                  |
|-------------------------|------------------------|
| Largura (w)             | 20 mm                  |
| Diâmetro externo        | 40 mm                  |
| Diâmetro interno        | 32 mm                  |
| Espessura (t)           | 4 mm                   |
| Raio (r)                | 16 mm                  |
| Material                | Aço AISI 4140          |
| Densidade               | 7850 kg/m <sup>3</sup> |
| Módulo Elástico         | 213 GPa                |
| Coefficiente de Poisson | 0,29                   |
| Tensão Máxima Elástica  | 0,652 GPa              |
| Tensão de Ruptura       | 1,015 GPa              |

**Fonte:** Yaldiz e Unsaçar, 2006; Ansys Workbench.

Para os cálculos analíticos considerou-se onde os extensômetros iriam ser fixados, sabe-se que não pode ser nem na face superior, pois é onde será aplicado a força e nem na face inferior que será onde o dinamômetro será fixado e que terá que não deve ser fixado em uma das arestas para que seja possível a fixação na parte experimental.

Então o melhor local para fixar o extensômetro com a força aplicada na direção axial é na parte lateral do octógono, pois será onde ocorrerá a maior deformação, como é mostrado na Figura 2a. E para uma força aplicada na direção transversal o melhor local é colocar a 45° da vertical, pois é o lado mais próximo de onde é aplicado a força e onde é possível capturar uma melhor deformação, visto na Figura 2b. E nesses dois locais será colocado dois extensômetros, um para tração e outro para compressão.

**Figura 2** - Localização das fixações dos extensômetros. (a) Para a força axial (b) Para a força tangencial.



Fonte: Autoria própria.

Os cálculos utilizados de deformação foram baseados nas equações que Alipanahi (2022) deduziu para a realização de sua pesquisa:

$$\varepsilon_a = \frac{0,7F_a r}{Ewt^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\varepsilon_t = \frac{1,4r}{Ewt^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

Os cálculos analíticos foram realizados no Excel e comparado com o resultado que o software devolvia.

## 2.2. Metodologia auxiliar - Análise Modal do porta ferramenta

O primeiro método foi necessário a utilização do software *Ansys Mechanical APDL* que é um programa que trabalha com o método dos elementos finitos, ou seja, o método que ele utiliza é de calcular analiticamente pedaços ínfimos de elementos, então a ferramenta de usinagem foi considerada como uma estrutura de viga-barra, que é um elemento que se desloca e rotaciona em seus nós. Foi utilizado medidas aproximadas de uma ferramenta, sendo elas 250 mm de comprimento, 20 mm de diâmetro e 315 mm<sup>2</sup> de área de secção transversal. Além disso, foi feita uma análise modal que serve para capturar as frequências naturais de uma estrutura, então se fossemos colocar em uma parte com pouco deslocamento em seu respectivo modo de vibrar, não seria possível registrá-la durante a parte experimental.

Ademais, a viga-barra foi considerada bi-dimensionalmente, então ao invés de ter os seis graus de deslocamento e rotação, ela só terá três, sendo eles o deslocamento horizontal, o deslocamento vertical e a rotação perpendicular ao plano dos dois deslocamentos. E por ser ter a condição de contorno de bi-apoiada ela terá somente restrição no deslocamento vertical e na rotação, assim deixando livre o deslocamento horizontal.

## 3. Resultados

### 3.1. Deformação dos extensômetros

Para o primeiro método, comparando as equações analíticas com o resultado obtido no software foi obtido os seguintes resultados para as duas forças aplicadas:

**Tabela 2** - Força aplicada na parte superior do anel octagonal em direção axial.

| Força aplicada na direção axial |                    |                      |
|---------------------------------|--------------------|----------------------|
| Forças                          | Anel Octagonal MEF | Deformação Analítica |
| 500                             | 8,12E-05           | 8,24E-05             |
| 1000                            | 1,62E-04           | 1,65E-04             |
| 1500                            | 2,44E-04           | 2,47E-04             |
| 2000                            | 3,25E-04           | 3,29E-04             |
| 2500                            | 4,06E-04           | 4,12E-04             |

|      |          |          |
|------|----------|----------|
| 3000 | 4,87E-04 | 4,94E-04 |
| 3500 | 5,69E-04 | 5,76E-04 |
| 4000 | 6,50E-04 | 6,59E-04 |
| 4500 | 7,31E-04 | 7,41E-04 |
| 5000 | 8,12E-04 | 8,24E-04 |

Fonte: Ansys Mechanical.

Tabela 3 - Força aplicada na parte superior do anel octagonal em direção transversal.

| Força aplicada na direção transversal |                    |                      |
|---------------------------------------|--------------------|----------------------|
| Forças                                | Anel Octagonal MEF | Deformação Analítica |
| 500                                   | 1,64E-04           | 1,65E-04             |
| 1000                                  | 3,28E-04           | 3,29E-04             |
| 1500                                  | 4,92E-04           | 4,94E-04             |
| 2000                                  | 6,56E-04           | 6,59E-04             |
| 2500                                  | 8,20E-04           | 8,24E-04             |
| 3000                                  | 9,83E-04           | 9,88E-04             |
| 3500                                  | 1,15E-03           | 1,15E-03             |
| 4000                                  | 1,31E-03           | 1,32E-03             |
| 4500                                  | 1,48E-03           | 1,48E-03             |
| 5000                                  | 1,64E-03           | 1,65E-03             |

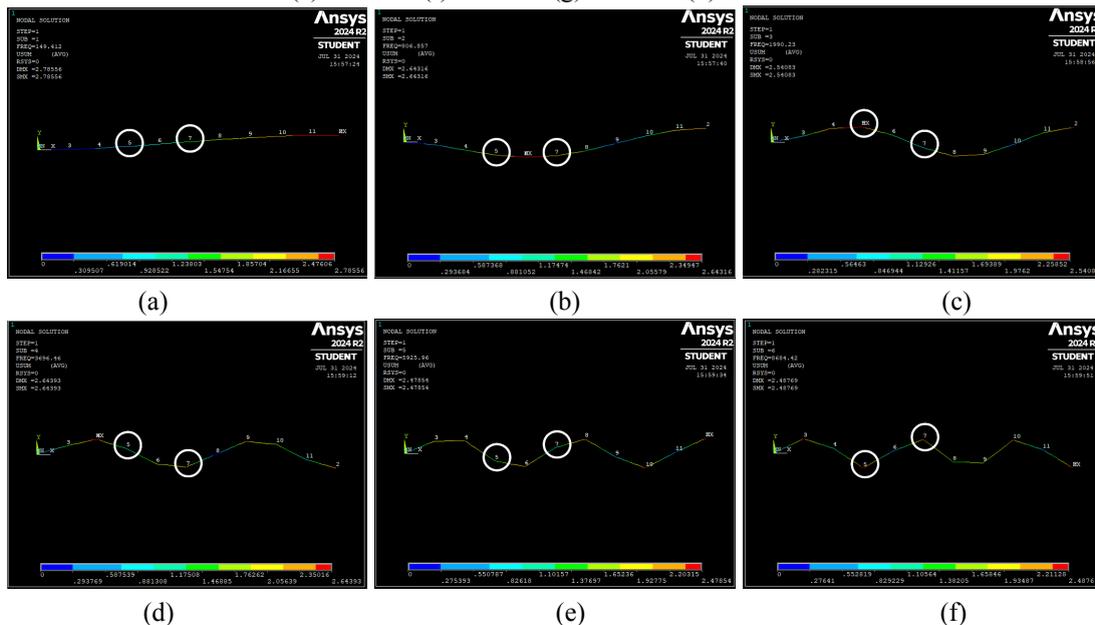
Fonte: Ansys Mechanical.

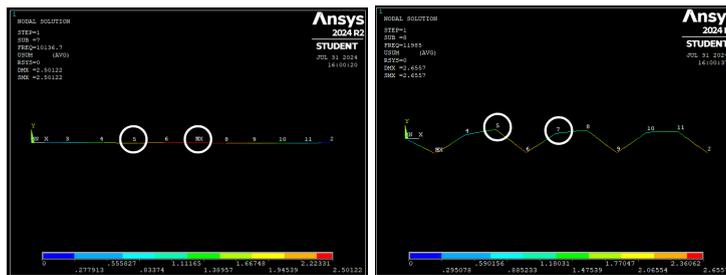
Pode-se observar que o Método dos Elementos Finitos e o método analítico não tem uma variação significativa, tendo a variação de 1,36% para a força na axial e 0,49% na transversal. Portanto, é possível dizer que a análise no MEF é muito próxima da realidade.

### 3.2. Resultado auxiliar - Análise Modal do porta ferramenta

Tendo em vista que a barra tem 250 mm de comprimento, para a realização do MEF é necessário a utilização da “malha” que é a divisão da estrutura em pedaços pequenos, então foi escolhido dividi-la em 10 elementos de 25 mm cada, além disso foi posta a restrição de bi-apoiada. Tendo em conta que serão realizados os 8 primeiros modos da análise modal do *Ansys Mechanical APDL* e as cores mais frias estão mais próximas de zero e quanto mais próximas de uma cor quente, maior é a deformação.

Figura 3 - Frequências naturais da ferramenta de usinagem. (a) 1º modo (b) 2º modo (c) 3º modo (d) 4º modo (e) 5º modo (f) 6º modo (g) 7º modo (h) 8º modo.





(g)

(h)

Fonte: Ansys Mechanical APDL.

Pode-se observar que os nós com maior deformação dentre os 8 primeiros modos foi o 5 e o 7, que estão respectivamente a 75 mm do ponto 1 e o outro ponto no meio da viga-barra.

#### 4. Conclusão

Pode-se concluir então que os resultados do método computacional convergem para os resultados analíticos, validando assim o primeiro método. Além disso, também foi possível encontrar a localização de onde fixar o extensômetro na ferramenta de usinagem, no qual é no meio ou a 75 mm do ponto inicial.

Para os próximos passos, é necessário montar computacionalmente um conjunto de quatro anéis octogonais e comparar os resultados obtidos neste trabalho, além disso, também realizar a análise modal para determinar as frequências naturais.

#### 5. Bibliografia

TAYLOR, Frederick Winslow. **On the art of cutting metals**. American society of mechanical engineers, 1906.

TRENT, Edward M.; WRIGHT, Paul K. **Metal cutting**. Butterworth-Heinemann, 2000.

YOUSSEF, Helmi A.; EL-HOFY, Hassan. **Machining technology: machine tools and operations**. CRC Press, 2008.

YALDIZ, Süleyman et al. **Design, development and testing of a four-component milling dynamometer for the measurement of cutting force and torque**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 21, n. 3, p. 1499-1511, 2007.

KORKUT, Ihsan. **A dynamometer design and its construction for milling operation**. Materials & design, v. 24, n. 8, p. 631-637, 2003.

SIDDHPURA, M.; PAUROBALLY, Roshun. **A review of chatter vibration research in turning**. International Journal of Machine tools and manufacture, v. 61, p. 27-47, 2012.

BAKER, J. R.; ROUCH, K. E. **Use of finite element structural models in analyzing machine tool chatter**. Finite elements in analysis and design, v. 38, n. 11, p. 1029-1046, 2002.

YALDIZ, Süleyman; ÜNSAÇAR, Faruk. **A dynamometer design for measurement the cutting forces on turning**. Measurement, v. 39, n. 1, p. 80-89, 2006.

ALIPANAHI, Anahita; MAHBUBKHAH, Mehran; BARARI, Ahmad. **Cross-sensitivity control in a novel four-component milling dynamometer for simultaneous measurement of tri-axial forces and torque**. Measurement, v. 191, p. 110788, 2022.