

## OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE UM ATUADOR PIEZOELÉTRICO MULTICAMADAS PARA COLETA DE ENERGIA EM TORNEAMENTO INTERNO

Bryan Leal Andrade, [bryandrade@ufpr.br](mailto:bryandrade@ufpr.br)<sup>1</sup>  
Gabriel Alves Kozan, [gabrielkozan@ufpr.br](mailto:gabrielkozan@ufpr.br)<sup>1</sup>  
Giuliana Sardi Venter, [giuliana.venter@ufpr.br](mailto:giuliana.venter@ufpr.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100, Jardim das Américas, Curitiba - PR, CEP 81530-000

**Resumo.** O objetivo deste artigo é apresentar um estudo de otimização, via Método dos Elementos Finitos, do posicionamento de cerâmicas piezoelétricas num porta-ferramentas de torneamento interno para coleta de energia. Além disso, este trabalho também tem por finalidade, através de uma análise experimental, determinar a viabilidade da construção deste atuador piezoelétrico multicamadas. A partir da simulação numérico-computacional, obteve-se uma posição otimizada em relação à tensão elétrica resultante para o acoplamento dos atuadores piezoelétricos no porta-ferramentas. Em seguida, foi realizada a verificação de viabilidade da melhor configuração encontrada num porta-ferramentas real. Dessa forma, foi possível estipular um ponto otimizado de acoplamento para uma aplicação real de torneamento interno.

**Palavras chave:** Coleta de energia. Torneamento interno. Atuador piezoelétrico multicamadas. Otimização. Chatter

**Abstract.** The objective of this article is to present an optimization study, via the Finite Element Method, of the positioning of piezoelectric ceramics in an internal turning toolholder for energy harvesting. In addition, this work also aims, through an experimental analysis, to determine the viability of building this multilayer piezoelectric actuator. From the numerical-computational simulation, an optimized position was obtained in relation to the resulting electrical voltage for the coupling of the piezoelectric actuator in the toolholder. Then, the viability verification of the best configuration found in a real toolholder was carried out. In this way, it was possible to stipulate an optimized coupling point for a real internal turning application.

**Keywords:** Energy harvesting. Internal turning. Multilayers Piezoelectric Actuator. Optimization. Chatter

### 1. INTRODUÇÃO

*Energy Harvesting* ou coleta de energia é, por definição, a captação de energia para armazenamento e reutilização posterior (Kim et al., 2011). Nas últimas décadas, a coleta de energia vem ganhando destaque como uma forma de reaproveitamento de energia e de aumento de rendimento energético. Nesse sentido, essa técnica vem viabilizando alternativas às baterias convencionais numa ampla gama de aplicações de engenharia. Uma de suas mais notórias aplicações é na alimentação de dispositivos de baixa potência; como sistemas microeletromecânicos (MEMS), sensores e sistemas de controle.

Um método clássico de coleta de energia é através do efeito piezoelétrico. Os materiais piezoelétricos, quando submetidos a deformações mecânicas, apresentam uma diferença de potencial elétrico entre suas superfícies. Assim sendo, esses materiais podem ser acoplados a sistemas vibrantes para gerar energia elétrica (Sharma et al., 2022). Vale dizer que o material piezoelétrico mais empregado nesse tipo de aplicação é a cerâmica PZT (titanato zirconato de chumbo). Os dispositivos piezoelétricos de coleta de energia (também denominados de atuadores piezoelétricos) mais usuais são constituídos de uma ou mais placas de cerâmica PZT.

No âmbito industrial, há um interesse estratégico na medição e registro dos parâmetros de operação das máquinas. Isso permite a avaliação e otimização do funcionamento de todo o aparato operacional da indústria. Não obstante, essas medições e registros exigem a utilização de sensores que, por sua vez, necessitam de algum tipo de alimentação elétrica.

A primeira opção para esse fornecimento de energia são as baterias convencionais. As baterias, entretanto, têm vida útil limitada e exigem um investimento contínuo devido à necessidade de substituição. Sob essa ótica, um trabalho publicado na revista *Sensors* (Ball et al., 2018) mostrou que a aplicação da coleta de energia através do efeito piezoelétrico é uma boa alternativa para o fornecimento de energia no monitoramento de máquinas.

A coleta de energia também vem ganhando notoriedade no contexto da engenharia de fabricação e manufatura. Na usinagem por torneamento interno, por conta da interação entre ferramenta e material usinado, o porta-ferramentas está sujeito a um tipo de vibração denominada *chatter*. Esse fenômeno ocasiona defeitos de acabamento superficial nas peças, redução da vida útil da ferramenta e, na fabricação em larga escala, grandes prejuízos financeiros. Uma vez que essas vibrações são de alta frequência e autoexcitadas, uma pesquisa recente publicada na revista *Mechanika* (Ostaševičius et al., 2014) apontou o torneamento interno como um processo de fabricação com grande potencial para coleta de energia. Nesse caso, o montante de energia captado se mostrou suficiente para alimentar um sistema de controle.

Ademais, um trabalho realizado por pesquisadoras na Universidade de São Paulo (Venter and da Silva, 2020) mostrou que o uso de um sistema de controle alimentado por um atuador piezoelétrico constitui uma solução viável para a redução do *chatter*. No experimento proposto por elas, um porta-ferramentas acoplado a um atuador piezoelétrico de múltiplas camadas e a um sistema de controle foi submetido a excitações vibratórias por um *shaker*, no intuito de simular as condições reais de *chatter* no torneamento interno. Nesse experimento, a partir da energia coletada, foi possível reduzir significativamente as amplitudes das vibrações do porta-ferramentas.

De modo análogo, ao longo dos últimos anos, muitos trabalhos exploraram o potencial para coleta de energia em sistemas mecânicos a partir da análise de sistemas de vigas em balanço (Liang et al., 2021). Entretanto, vale ressaltar que tanto aproximações de sistemas mecânicos a partir de modelos de vigas em balanço quanto adaptações experimentais para simular condições de funcionamento de sistemas reais (como proposto por Venter and da Silva (2020)) constituem apenas aproximações. Nesse sentido, para aplicações reais, espera-se que surjam problemas inerentes a esse tipo de simplificação.

Em vista disso, esse artigo tem por objetivo avaliar as condições mais adequadas de posicionamento para um atuador piezoelétrico multicamadas num porta-ferramentas de torneamento interno sujeito a condições reais de usinagem. Para tanto, foram analisadas diferentes configurações de acoplamento num modelo comercial de porta-ferramentas utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Em seguida, foram comparadas as respostas de tensão elétrica das diferentes configurações para determinar a mais adequada delas. Além disso, também foi verificada a viabilidade prática da melhor configuração encontrada no modelo computacional. Para isso, foi feita uma montagem experimental de um atuador piezoelétrico multicamadas num porta-ferramentas convencional.

Embora não faça parte dos objetivos centrais deste trabalho, os autores apresentam também um procedimento efetivo para obter a resposta em tensão elétrica de um atuador piezoelétrico acoplado a um sistema mecânico usando o software ANSYS Workbench. Apesar do MEF ser uma técnica amplamente utilizada para a análise de sistemas dessa natureza, descrições detalhadas de como aplicar esse método utilizando ferramentas computacionais usuais no campo da engenharia ainda são escassas. Com isso, espera-se que este artigo sirva como um tutorial útil de como esse tipo de simulação para aqueles que sejam iniciantes nessa área.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

Neste estudo, para a realização da otimização do posicionamento dos atuadores piezoelétricos no porta-ferramentas, foi utilizado o software ANSYS Workbench Student 2022 R2. Ainda nesta etapa, para análise dos dados e confecção dos gráficos, foi utilizado também o software Microsoft Excel 2019. Para a montagem experimental na análise de viabilidade prática do atuador piezoelétrico, foi utilizado um porta-ferramentas comercial S25T PTFNR 16W e três placas piezoelétricas do tipo APC 855 (equivalente à classificação Navy VI) com dimensão 20x20x0,5 mm. Além disso, para a fixação das placas piezoelétricas foi utilizada uma cola condutora de confecção própria dos autores. A cola foi fabricada misturando limalha de cobre com uma cola de base epóxi, numa proporção de 1:1 em volume. Para avaliar a montagem na análise de viabilidade, também foi utilizado o software AutoDesk Inventor 2020.

### 2.2. Métodos para otimização do posicionamento do atuador piezoelétrico

A determinação de posicionamento otimizado para o acoplamento dos atuadores piezoelétricos ao porta-ferramentas, como dito anteriormente, foi realizada através de um modelo numérico-computacional baseado no MEF. Nesta análise foi considerado um atuador piezoelétrico com 3 camadas. Para a obtenção deste modelo, primeiramente, foi realizada a seleção e o download da geometria 3D do porta ferramentas (modelo S25T-CTFPR16\_SIM), através do site da fabricante Sandvik Coromant (Sandvik Coromant, 2023). O critério de seleção do modelo foi a similaridade com o porta-ferramentas físico usado na etapa de análise de viabilidade prática da montagem do atuador piezoelétrico. Apesar das diferenças entre eles, os porta-ferramentas são suficientemente similares para que as conclusões obtidas do modelo computacional sejam generalizadas para o modelo experimental.

Em seguida, a geometria foi adicionada a um projeto no ANSYS Workbench e, utilizando a ferramenta DesignModeler, um desenho 3D do atuador piezoelétrico foi adicionado à geometria 3D do porta-ferramentas, conforme é possível verificar na Fig. 1 a seguir:

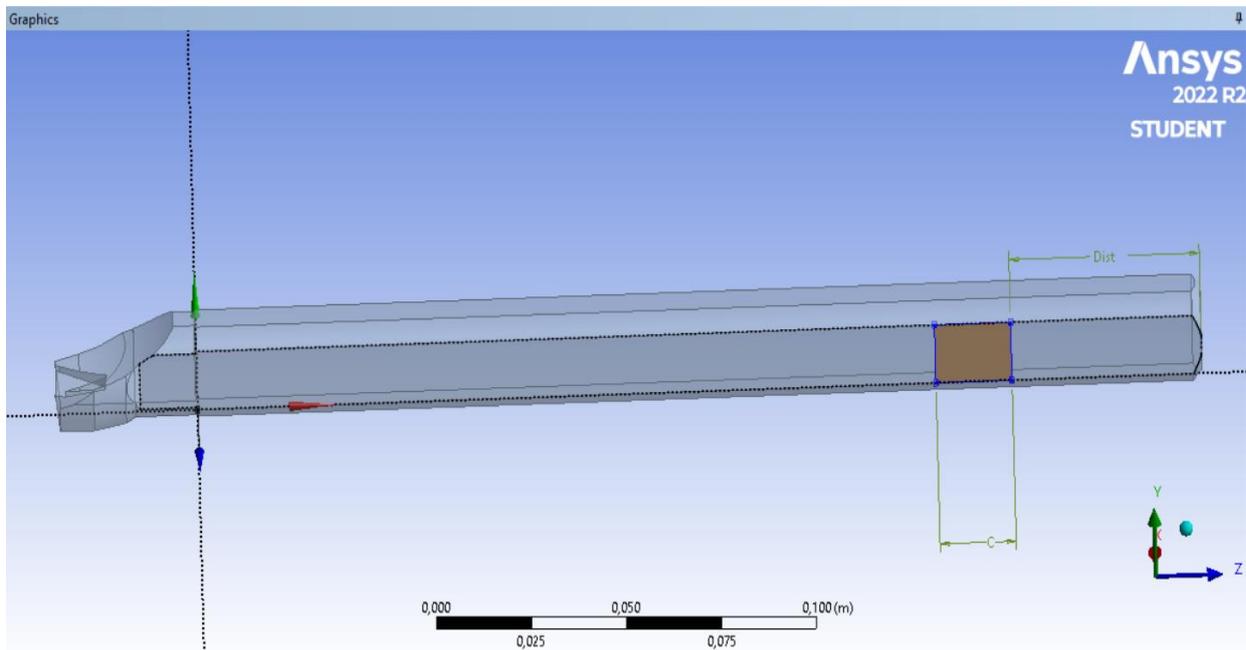


Figura 1. Geometria 3D do atuador piezoelétrico (laranja) incorporada ao porta-ferramentas (Os autores, 2023)

As dimensões utilizadas para o desenho do atuador piezoelétrico foram 20 mm de comprimento e uma distância inicial de 50 mm do ponto de engaste do porta-ferramentas (respectivamente, as cotas nomeadas “C” e “Dist” na Fig. 1). Além disso, a largura foi determinada como sendo igual à da face inferior do porta-ferramentas (aproximadamente 14 mm) e a espessura extrudada foi de 1,5 mm. Embora as placas piezoelétricas usadas na etapa de análise experimental tenham 5 mm de espessura, uma vez que a intenção é avaliar a viabilidade de um atuador piezoelétrico multicamadas, a espessura utilizada no modelo 3D foi triplicada a fim de simular 3 placas piezoelétricas sobrepostas e unidas por uma cola condutora.

Importante destacar que, igualando a largura do modelo 3D do atuador piezoelétrico à largura da face inferior do porta-ferramentas, o desenho 3D apresenta uma diferença de cerca de 6 mm em relação às placas físicas. Essa decisão foi tomada para facilitar a modelagem computacional e considerando que não são esperadas discrepâncias significativas nos resultados advindas dessa diferença. Além disso, foram eliminadas a pastilha-ferramenta e o clipe de fixação da pastilha da geometria original obtida no site da Sandvik Coromant. Essa decisão foi tomada considerando que esses componentes têm massa muito inferior à do porta-ferramentas e, portanto, só afetam os modos locais de vibração do sistema. Ademais, essas peças muitas vezes ocasionam problemas de convergência do modelo computacional devido à complexidade de suas geometrias.

O segundo passo para obtenção do modelo computacional foi a realização de uma análise modal. Da teoria de vibrações, sabe-se que as frequências em que o porta-ferramentas apresentará maior amplitude de vibração são as frequências de ressonância do sistema mecânico. Consequentemente, são nessas frequências que haverá maior resposta em tensão do atuador piezoelétrico e, por isso, a análise modal foi aplicada para determinar as frequências de ressonância do sistema porta-ferramentas – atuador piezoelétrico.

Primeiramente, foram adicionados os dados do material piezoelétrico aos dados de engenharia da análise modal. As propriedades de material adicionadas foram densidade e elasticidade anisotrópica. Os dados utilizados foram os correspondentes ao material piezoelétrico PZT-5A. Ademais, foi adicionado um suporte fixo na face correspondente ao engaste do porta-ferramentas (Fig. 2). Foram considerados também os efeitos de amortecimento. Em seguida, foi realizada a análise modal para as primeiras 10 frequências de ressonância. A opção por analisar apenas as 10 primeiras se deu pelo fato de as frequências de ressonância posteriores serem excessivamente altas. Uma vez que dificilmente o porta-ferramentas atingirá frequências tão elevadas em operações reais de usinagem, elas foram excluídas da análise.

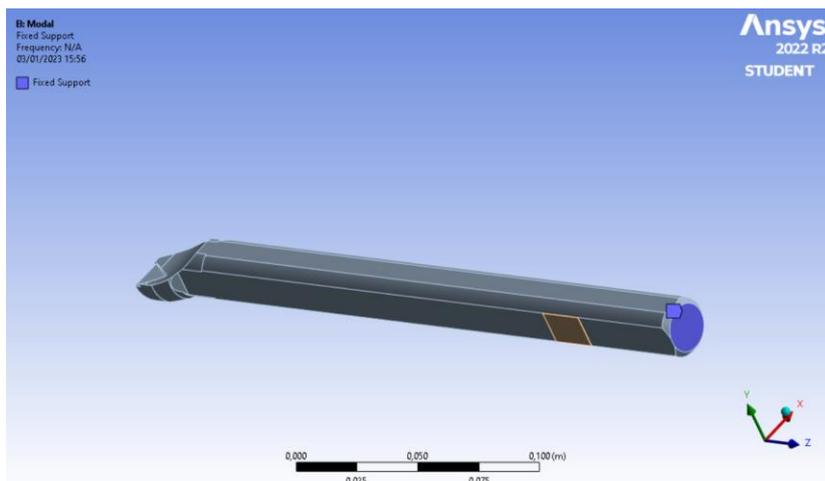


Figura 2. Suporte fixo (azul) adicionado para simular engaste na análise modal (Os autores, 2023)

Vale notar que o material piezoelétrico aplicado na simulação (PZT-5A) é diferente do material das placas piezoelétricas que foram posteriormente utilizadas na análise experimental de viabilidade (APC 855). Entretanto, uma vez que a relação entre deformação e resposta em tensão vale para qualquer material piezoelétrico (embora em proporções distintas), é possível afirmar que essa diferença não compromete o estabelecimento de uma equivalência entre o modelo computacional obtido e o modelo experimental.

O terceiro passo foi determinar a resposta em tensão elétrica, para um determinado posicionamento do modelo 3D do atuador piezoelétrico, a partir da vibração do sistema. Em seguida, foram alterados os valores da dimensão “Dist” e os resultados de tensão, para cada posicionamento, foram comparados. Para obter essas tensões utilizando o ANSYS Workbench, foi realizada uma análise de resposta harmônica. Para tanto, primeiramente foi necessário instalar a extensão ACT Piezo & MEMS no ANSYS, uma vez que as ferramentas padrão para simulação de sistemas multifísicos eletromecânicos nesse software são limitadas.

A análise de resposta harmônica foi pré-estressada com os resultados da análise modal. Ademais, foram adicionados como parâmetros da análise: a) um suporte fixo igual ao que foi estabelecido para a análise modal, simulando o engaste; b) uma pressão de 4,5MPa sobre uma face superior da ponta do porta-ferramentas, a fim de simular o esforço ao qual o porta-ferramentas é submetido durante a usinagem; c) uma atribuição de material piezoelétrico ao modelo 3D do atuador piezoelétrico utilizando a extensão Piezo & MEMS (Fig. 3a); d) e uma atribuição de potencial elétrico igual a zero na face do modelo 3D do atuador piezoelétrico que fica em contato com o porta-ferramentas (Fig. 3b).

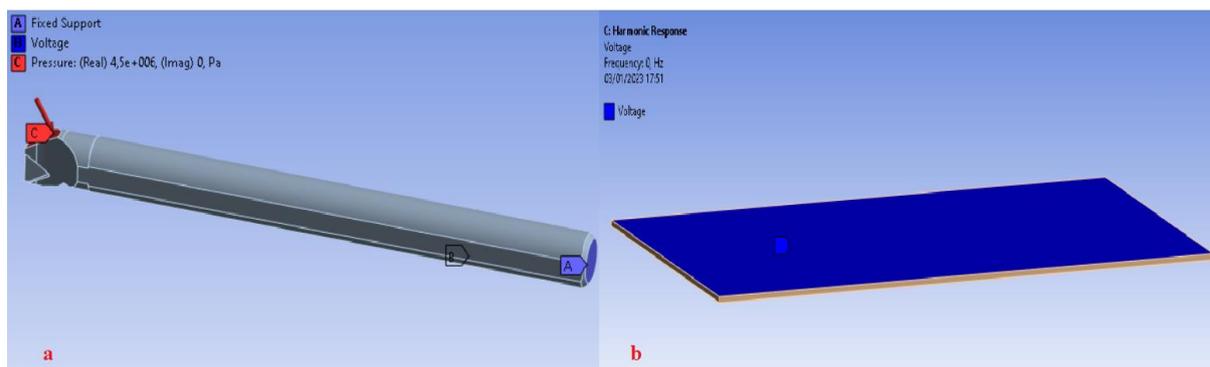


Figura 3: a) Suporte fixo (azul) e pressão (vermelho) adicionados para análise de resposta harmônica; b) potencial elétrico nulo atribuído à faces de contato (azul) do modelo do atuador piezoelétrico (Os autores, 2023)

A cota “Dist” foi então alterada para cada múltiplo inteiro positivo de 2,5 mm até que atingisse o valor 250 mm e, em cada passo, a análise de resposta harmônica foi realizada e os dados de tensão e o valor da cota “Dist” foram tabulados. Após, foram confeccionados gráficos de dispersão (posição *versus* tensão elétrica) para fins de comparação. A árvore final da simulação no ANSYS Workbench pode ser visualizada na Fig. 4. Durante a análise de resposta harmônica verificou-se que as respostas em tensão eram maiores para a terceira e quarta frequências de ressonância. Além disso, avaliou-se que frequências eram compatíveis com as condições reais de corte. Por isso, para fins de simplificação da análise dos dados, foram registrados apenas os dados de tensão elétrica para a faixa de frequências que englobava essas frequências de ressonância.

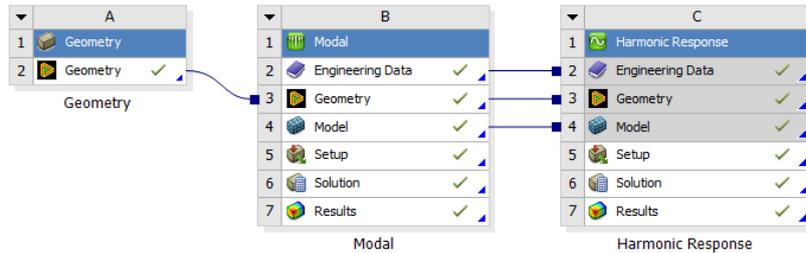


Figura 4. Árvore esquemática da simulação realizada no ANSYS Workbench (Os autores, 2023)

## 2.2. Métodos para análise experimental de viabilidade prática do atuador piezoelétrico

A análise de viabilidade do acoplamento do atuador piezoelétrico se deu com as seguintes considerações: primeiramente, pretende-se utilizar quatro atuadores piezoelétricos, de três camadas cada, para maximizar o potencial de extração de energia; adicionalmente, as possibilidades de montagem devem contemplar o material disponível para os experimentos práticos. Esses materiais consistem do porta-ferramentas e das placas piezoelétricas previamente unidas com a cola de base epóxi anteriormente mencionada. Ainda, para uma eventual realização da pré-montagem completa dos atuadores piezoelétricos e acoplamento elétrico, seriam necessários a fita de cobre, fios de cobre e solda para componentes eletrônicos. O modelo de atuador piezoelétrico em que se baseiam os experimentos é o apresentado por Venter and da Silva (2020) em seus experimentos de controle de *chatter* no torneamento interno (Fig. 5). A configuração selecionada para montagem é em série, por permitir uma maior tensão de saída.

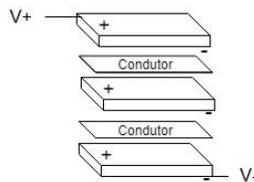


Figura 5. Esquema de montagem de um atuador piezoelétrico em série (Venter and da Silva, 2020)

Inicialmente, foram realizadas observações e medições dos componentes. A fabricante Sandvik Coromant recomenda a utilização de ao menos quatro vezes o diâmetro do porta-ferramentas para o comprimento do aperto. Assim, neste caso, deverá ser de no mínimo 100 mm. Além disso, como o porta-ferramentas possui os quatro cantos arredondados e apenas três faces planas, determinou-se que a área de contato na face de adesão não é ideal. Portanto, deverão ser realizadas algumas usinagens no corpo a fim de atingir o melhor resultado com relação à posição das placas, a área de contato e a conservação de material no porta-ferramentas. As análises posteriores foram realizadas utilizando o software Autodesk Inventor 2020, para permitir uma visualização completa em 3D e facilitar as considerações quanto à remoção de material.

No site da fabricante Sandvik Coromant é possível localizar o arquivo de modelo 3D do porta-ferramentas de mesma numeração ao que foi adquirido para a realização desta pesquisa (Sandvik Coromant, 2023). Entretanto, ao importá-lo para o Inventor e comparando as dimensões com o objeto físico (Fig. 6), observou-se que existe uma diferença considerável na profundidade de usinagem de uma das faces planas. Portanto, utilizando um paquímetro analógico, tomaram-se cuidadosamente as medidas do componente, a fim de produzir um modelo 3D simplificado que foi, posteriormente, utilizado para a análise de usinagem.

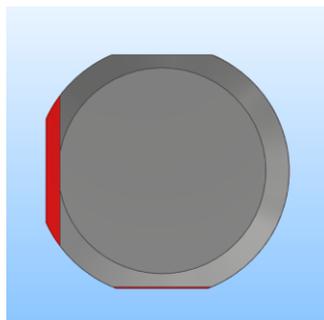


Figura 6. Comparação entre o modelo 3D da Sandvik (cinza) e o modelo gerado (vermelho) (Os autores, 2023)

Utilizando o modelo 3D obtido, foram analisadas algumas formas de fixação entre os atuadores piezoelétricos e o porta-ferramentas. Primeiramente, estudou-se uma versão na qual os quatro atuadores piezoelétricos estão na mesma posição axial, distribuídos de forma uniforme em torno do eixo. Nesta situação, a distância da face usinada ao centro do porta-ferramentas deve ser de no mínimo 10,2 mm. Foi considerada também uma pequena folga entre as placas para lidar com quaisquer imprecisões que possam decorrer do processo de adaptação. Levando em consideração os cantos arredondados da barra, essa configuração permite um contato de no máximo 72,26% da área da face da placa piezoelétrica, com uma usinagem de aproximadamente 1,3 mm nas faces planas (Fig. 7a).

Outra disposição estudada para a fixação das cerâmicas consiste em fixar dois atuadores piezoelétricos diametralmente opostos em uma posição axial e outros dois em uma posição adjacente. Esta opção permite obter até 100% de contato entre os componentes ao custo de uma remoção agressiva de material do porta-ferramentas. Isso tornaria necessário um fresamento com profundidade de aproximadamente 4 mm nas faces planas (Fig. 7b).

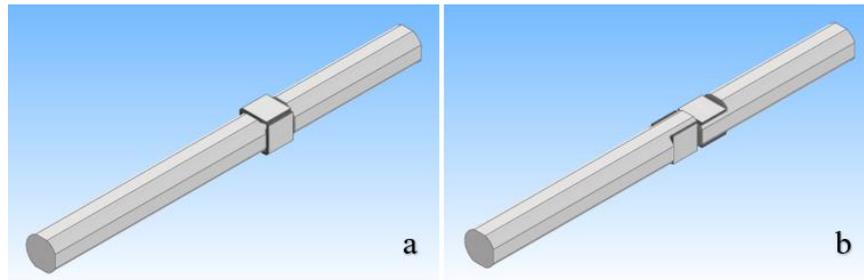


Figura 7. a) opção de montagem com todos os atuadores piezoelétricos na mesma posição axial; b) opção de montagem com o maior contato entre os atuadores piezoelétricos e o porta-ferramentas (Os autores, 2023)

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Posicionamento ótimo

Da análise modal, foram obtidas as dez primeiras frequências de ressonância, em Hertz, conforme a Tab. 1 a seguir:

Tabela 1. Frequências de ressonância com amortecimento resultantes da análise modal

Modo	Frequência Amortecida (Hz)
1	195,45
2	202,26
3	1185,70
4	1226,30
5	2646,90
6	3207,60
7	3306,30
8	4340,00
9	5950,30
10	6119,40

Na análise de resposta harmônica foram registrados os dados para as frequências de 1190Hz e 1225Hz. Essas frequências, como dito antes, são próximas das frequências de ressonância para o terceiro e quarto modo de vibrar. Os gráficos de tensão elétrica resultantes obtidos dessa análise para as duas frequências citadas foram os seguintes (Fig. 8):

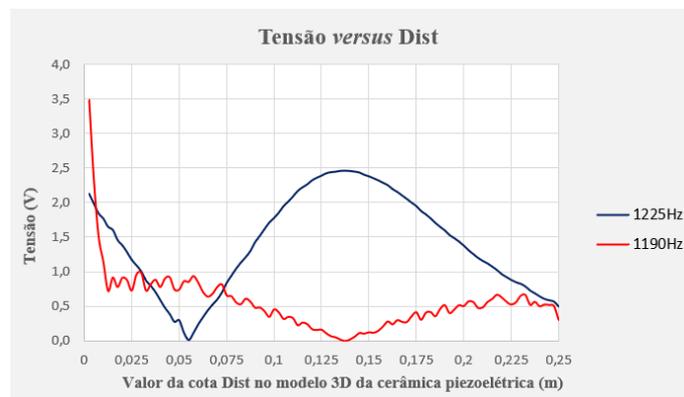


Figura 8. Gráfico tensão versus valor da cota Dist do modelo 3D do atuador piezoelétrico (Os autores, 2023)

Observa-se, a partir deste gráfico, que os maiores valores de tensão são obtidos quando o atuador piezoelétrico se encontra mais próxima do ponto de engaste. No caso da frequência de 1225Hz, há também um pico de tensão num posicionamento mais central. Todavia, uma vez que numa operação de usinagem não é possível controlar com absoluta precisão a frequência de vibração do porta-ferramentas, faz mais sentido optar por um posicionamento em que se obtém uma maior média de tensão para uma faixa de frequências. Nesse sentido, conclui-se que o ponto mais adequado de posicionamento do atuador piezoelétrico é próximo do ponto de engaste. Dessa maneira, mesmo que a frequência de vibração caísse de 1225Hz para 1190Hz, não haveria uma queda brusca da tensão resultante.

Vale dizer que esse resultado era previsto do ponto de vista teórico. Isso porque, a despeito do fato de a região próxima do ponto de engaste não ser a região com maior deslocamento absoluto, é a que possui maior deslocamento relativo. Essa conclusão é bastante intuitiva considerando que o ponto de engaste é um ponto em que a amplitude de vibração é nula. Assim sendo, considerando a correlação entre deformação e tensão elétrica no efeito piezoelétrico, isso resulta em maiores valores de tensão. É possível constatar isso comparando as funções de resposta em frequência (FRF) da tensão resultante para um acoplamento na região da ponta e na região do engaste, obtidas da análise harmônica (Fig. 9).

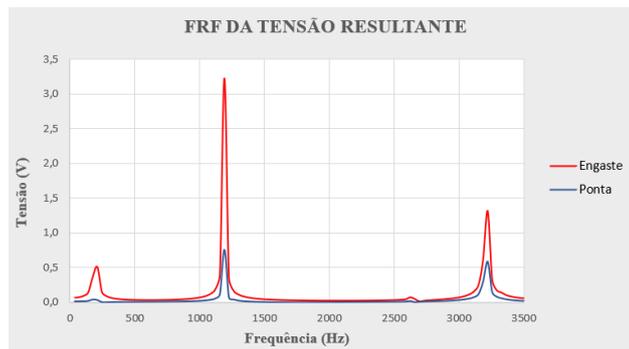


Figura 9. FRF da tensão em relação à região de engaste (vermelho) e à região da ponta (azul) (Os autores, 2023)

Por fim, avaliando as tensões elétricas, a Fig. 9 também reforça a justificativa da realização da análise apenas para as frequências próximas de 1200Hz. Apesar da determinação de que o melhor ponto da posição do atuador piezoelétrico é próximo do engaste, há limitações técnicas para alocação das cerâmicas nas proximidades da região de engaste. Nesse sentido, os resultados da análise de viabilidade prática para posicionar as cerâmicas são apresentados a seguir.

### 3.2. Viabilidade técnica

A partir da análise numérico-computacional, obteve-se o posicionamento ótimo das cerâmicas piezoelétricas ao longo do eixo do porta-ferramentas para a coleta de energia. Concluiu-se que o local ideal está na região mais próxima possível do engaste. Neste ponto, para ambas as frequências analisadas, houve a maior tensão de saída. Além disso, conforme resultado de um trabalho recente (Pradeesh & Udhayakumar, 2019), neste local é onde ocorre a maior deformação, fator que justifica uma maior tensão de saída. Portanto, determinou-se que o local ideal para fixação dos atuadores piezoelétricos é o mais próximo possível do engaste.

Partindo da base oposta à ferramenta de corte, este é o local ideal para a realização da usinagem que servirá de base para a fixação das cerâmicas. Todavia, deve-se atentar às necessidades práticas de montagem, como a ligação e passagem dos fios de cobre. Assim, estipulou-se uma folga de 5 mm do ponto de engaste até o local de realização das usinagens no corpo do porta-ferramentas, de forma a garantir a facilidade de montagem. O posicionamento mais adequado dos atuadores piezoelétricos pode ser visto na Fig. 10.

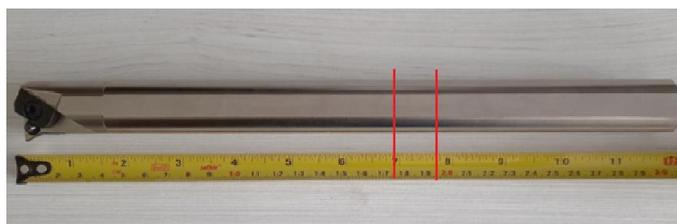


Figura 10. Demonstração do local adequado para a fixação dos atuadores piezoelétricos no porta-ferramentas (Os autores, 2023)

Quanto à disposição dos atuadores piezoelétricos, ao se comparar as duas opções apresentadas, observou-se que um contato pleno entre os elementos não é viável. Isso porque a usinagem requerida é excessivamente profunda e os

benefícios obtidos são incertos frente ao prejuízo estrutural causado ao sistema. Além disso, devido à impossibilidade de comportar um quadrado inscrito de lado 20 mm no diâmetro do porta ferramentas, a única maneira de obter aproveitamento total do contato entre os componentes é realizando a montagem intercalada dos atuadores piezoelétricos. Não obstante, isto faria com que o posicionamento ótimo para a coleta de energia fosse prejudicado. Nesse sentido, a alternativa de utilizar os quatro transdutores em uma mesma posição axial se torna mais atraente, apesar do menor contato. Portanto, esta foi a configuração selecionada para dar prosseguimento aos testes práticos.

#### 4. CONCLUSÃO

Embora o uso de materiais piezoelétricos já tenha sido amplamente estudado para coleta de energia em sistemas vibrantes, há poucos trabalhos sobre aplicações e avaliações de viabilidade técnica de atuadores piezoelétricos em sistemas reais. Além disso, considerando os efeitos deletérios do *chatter* e o potencial para coleta de energia no processo de torneamento interno, é justificável um estudo com enfoque nesse processo. Nesse sentido, pelas simulações numérico-computacionais descritas na seção 2, comprovou-se que é possível obter uma quantidade significativa de energia com esse tipo de atuador piezoelétrico.

Ademais, com base nesse mesmo modelo computacional, foi possível estabelecer que a melhor região para acoplamento das placas piezoelétricas, neste tipo de aplicação, é próxima ao ponto de engaste (conforme a Fig. 8). Com o atuador piezoelétrico nesta região, foi possível obter uma tensão elétrica cerca de 4 vezes maior se comparado com um acoplamento próximo à ponta (*vide* Fig. 9). A partir da Lei de Ohm da eletrodinâmica e tendo em conta a relação direta entre potência e corrente elétrica, é possível ainda concluir que essa configuração fornece cerca de 4 vezes mais potência. Não obstante, tendo em vista esta análise, não foi possível determinar a viabilidade técnica dessa configuração do atuador piezoelétrico. Dessa forma, deu-se seguimento a uma avaliação experimental.

Através da análise experimental de viabilidade, constatou-se que, para ampliar a capacidade de coleta de energia é necessário usinar o porta-ferramentas e alocar os quatro atuadores piezoelétricos axialmente em torno do ponto otimizado encontrado nas simulações computacionais. Dessa forma é possível garantir um bom contato entre a cerâmica e o componente de usinagem. Além disso, considerando a necessidade de uso de outros componentes no atuador piezoelétrico, como fios condutores, e após comparar diferentes configurações de acoplamento, foi determinado o melhor ponto de alocação das placas piezoelétricas dentre os analisados (conforme Fig. 10).

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FUNPAR pelo apoio financeiro e à UFPR pelo financiamento dos materiais utilizados nesta pesquisa.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Ball, A. D., Gu, F., Cattley, R., Wang, X., & Tang, X. (2018). Energy harvesting technologies for achieving self-powered wireless sensor networks in machine condition monitoring: A review. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 18, Issue 12). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s18124113>
- Kim, H. S., Kim, J. H., & Kim, J. (2011). A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(6), 1129–1141. <https://doi.org/10.1007/s12541-011-0151-3>
- Liang, H., Hao, G., & Olszewski, O. Z. (2021). A review on vibration-based piezoelectric energy harvesting from the aspect of compliant mechanisms. In *Sensors and Actuators, A: Physical* (Vol. 331). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112743>
- Ostaševičius, V., Jurenas, V., & Žukauskas, M. (2014). Investigation of energy harvesting from high frequency cutting tool vibrations. *Mechanika*, 20(5), 500–505. <https://doi.org/10.5755/j01.mech.20.5.7902>
- Pradeesh, E. L., & Udhayakumar, S. (2019). Effect of placement of piezoelectric material and proof mass on the performance of piezoelectric energy harvester. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 130, 664–676. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.05.044>
- Sandvik Coromant. Site da Sandvik Coromant, 2023. Plataforma da fabricante Sandvik Coromant. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/en-us/product-details?c=s25t-ptfmr%2016-w>>. Acesso em 04/01/2023
- Sharma, S., Kiran, R., Azad, P., & Vaish, R. (2022). A review of piezoelectric energy harvesting tiles: Available designs and future perspective. In *Energy Conversion and Management* (Vol. 254). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115272>
- Venter, G. S., and da Silva, M. M. (2020). Vibration control using multilayer piezoelectric actuators: towards chatter suppression in turning operations. *Materials Research*, 23(4). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0073>

#### 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.