

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA MEDIDOR DE FORÇAS DE USINAGEM PARA OPERAÇÕES DE MICROFRESAMENTO: SELEÇÃO DO ELEMENTO SENSOR

Diego Ursulino dos Santos, ursulino.diego@gmail.com¹
Guilherme Oliveira de Souza, guilherme.souza@fieb.org.br²

¹SENAI Alagoas, Rua Pedro Américo, 18 - Poço, Maceió - AL, 57025-890,

²SENAI CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845 - Piatã, Salvador - BA, 41650-010,

Resumo: No processo de microfresamento a resistência das ferramentas às solicitações mecânicas às quais estão sujeitas é significativamente menor, devido aos reduzidos diâmetros que as caracterizam, o que faz com que haja um maior risco de quebra. Desta maneira, ser capaz de medir forças em processos de microfresamento pode ser útil tanto para objetivos de pesquisa e desenvolvimento, como também para acompanhamento de processo. Este trabalho é parte integrante de um projeto maior que visa desenvolver um sistema para realizar medições de forças em operações de microfresamento, de baixo custo, que possibilite a realização de análises comparativas qualitativas. O objetivo deste artigo é evidenciar os experimentos e análises que foram realizadas para subsidiar a escolha da tecnologia que será utilizada como elemento sensor no protótipo do sistema medidor de forças de usinagem. O trabalho contemplou uma etapa experimental em que sensores de força de alta disponibilidade comercial e baixo custo foram testados e tiveram avaliadas suas capacidades para medição do fenômeno, com ênfase principal no tempo de resposta, coeficiente de variação, sensibilidade e tempo de recuperação. Os sensores testados foram: cápsulas piezoelétricas PZT, filmes piezoelétricos e resistores sensíveis à força. Foi observado que dentre os sensores analisados as cápsulas piezoelétricas PZT são a opção que melhor se aplica aos requisitos demandados por serem capazes de captar sinais de força em um tempo de resposta satisfatório evidenciado pela coerência sinal-fenômeno, por possuírem coeficiente de variação médio de 11%, o menor entre os testados, e por serem os mais precisos com os menores valores de repetibilidade, em média 1,77. Já o tempo de recuperação das cápsulas piezoelétricas PZT é o pior dentre os sensores testados, porém, mostra-se proporcional à força aplicada, quanto menor a força menor o tempo para recuperação.

Palavras-chave: microusinagem, microfresamento, metrologia, forças de usinagem

1. INTRODUÇÃO

Com a evolução da manufatura, apresenta-se cada vez mais uma crescente demanda por componentes miniaturizados de qualidade, no entanto, para fabricar componentes cada vez menores, se faz necessário o conhecimento mais aprofundado dos processos de fabricação, o que serve de incentivo para que hajam mais trabalhos científicos direcionados ao desenvolvimento tecnológico do campo da microfabricação. Para Kalpakjian e Schmid (2001), dentre as possibilidades de fabricação de micropeças, o microfresamento se destaca por viabilizar a usinagem tanto de geometrias simples quanto de geometrias complexas em uma variada gama de materiais. Entretanto, segundo Dib (2013) existe grande dificuldade em se adaptar todo o conhecimento do fresamento em escala convencional para a microescala, sendo notório que na escala micro existem fenômenos que devem ser levados em consideração por interferirem diretamente no processo e na qualidade do produto fabricado por usinagem. Um dos fatores influenciados por estes fenômenos é a Força de Usinagem.

Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (1999), a força resultante do corte pela ferramenta nos processos de usinagem é um fenômeno que se destaca por estar diretamente relacionado à qualidade da peça usinada, vida útil das ferramentas utilizadas, bem como eficiência da produção. Deste modo, a avaliação e o controle da força exercida pela ferramenta junto à peça, aliado com outros fatores, pode influenciar nos resultados dos processos (Baldo, 2013). A quantificação das forças de usinagem pode ser efetivada por meio de modelagem matemática ou por intermédio de medições diretas ou indiretas (Machado et al., 2009), sendo as medições diretas efetuadas por sistemas de medição, o meio mais eficaz, segundo Childs et al. (2000).

Os procedimentos de medição apresentam elevados níveis de dificuldade, pela complexidade do processo de microfresamento e também pelas proporções micrométricas do fenômeno, que levam a forças de magnitude muito pequena, quando comparadas àquelas medidas em processos de usinagem convencionais. Para tanto é necessário o uso de aparatos tecnológicos que permitam a quantificação das forças de usinagem através de medição, considerando que tais ferramentas não interfiram no andamento normal do processo de microfresamento. As soluções comerciais existentes no mercado atual para medição e análise de forças de usinagem nos processos de microfresamento costumam ser de difícil acesso, uma vez que seus preços são altos e não existe fabricação nacional deste tipo de tecnologia.

O trabalho relatado nesse artigo se insere em um projeto cujo objetivo é desenvolver um Sistema Medidor de Forças de Usinagem para Operações de Microfresamento que tenha como característica ser uma solução de baixo custo, utilizando sensores de força eletromecânicos ou eletrônicos, que permita análises comparativas quantitativas. O objetivo deste artigo é relatar o experimento e as análises realizadas para embasar a seleção do modelo de sensor a ser utilizado no protótipo do Sistema Medidor de Forças de Usinagem citado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são descritos detalhadamente os procedimentos experimentais utilizados para a seleção do sensor que será utilizado como recurso de medição do sistema para medição de forças de usinagem em operações de microfresamento, bem como a análise realizada para caracterizar o comportamento de recuperação do sensor selecionado, o que será importante para a análise das medições futuras que serão realizadas com o protótipo do sistema de medição que será composto por esse sensor.

2.1. Sensores a Serem Comparados

Os requisitos a serem atendidos pelo elemento sensor para que venha a compor o sistema de medição de forças pretendido são citados a seguir:

- Alta disponibilidade comercial: devem ser de fácil aquisição, podendo ser encontrados no país, em lojas de eletrônica ou na internet;
- Baixo custo: cada unidade do sensor deve custar no máximo R\$20,00;
- Repetibilidade: os sensores devem ser capazes de dar respostas muito próximas quando se aplica repetidamente o mesmo sinal de entrada.
- Sensibilidade: os sensores devem ser sensíveis ao ponto de verificar pequenas variações de força;
- Variedade de tamanhos e modelos: comercialmente, devem ser encontrados com variedade de modo a facilitar a construção do sistema de medição de forças;

Os sensores de alta disponibilidade comercial e de baixo custo selecionados são os descritos a seguir:

- Cápsula piezoelétrica, retratada na Fig. (1.a), contém material cerâmico cristalino (titanatozirconato de chumbo – PZT) com a capacidade de gerar tensão elétrica ao ser comprimido por uma força externa;
- Filme piezoelétrico, retratado na Fig. (1.b), é fabricado em material polimérico (fluoreto de polivinilideno – PVDF) possui propriedades piezoelétricas ao ser flexionado, gerando sinais de tensão;
- Resistor sensível à força, retratado na Fig. (1.c), trata-se de um componente que varia sua resistência conforme sofre a atuação de uma força externa.

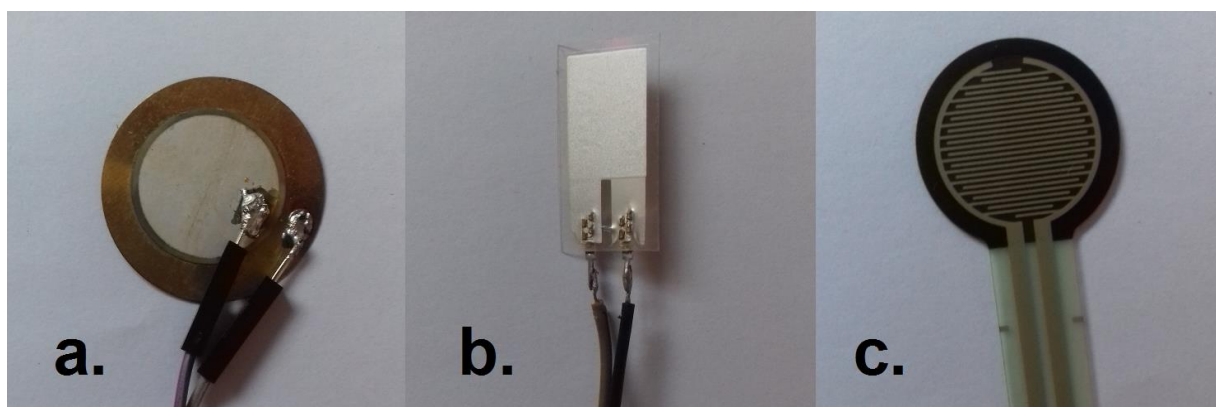


Figura 1. Tipos de sensores comparados. (a.) Cápsula PZT. (b.) Filme PVDF. (c.) Resistor sensível à força.

2.2. Experimento de Seleção do Sensor

Para este experimento, a bancada experimental foi disposta conforme a Fig. (2). Um exemplar de cada um dos 3 tipos de sensores foi fixado numa superfície plana, um ao lado do outro, e submetido ao contato da ponta de uma abraçadeira de nylon que, por sua vez, foi fixada ao eixo rotativo de uma aparafusadeira, conforme Fig. (2).

Os componentes e equipamentos utilizados na montagem do experimento podem ser visualizados na Fig. (2), estes são: Aparafusadeira modelo BOSCH GSR1080-LI; Abraçadeira de nylon 6.6 – 200 x 3,6mm; Medidor de alturas; Acessório para fixação e ajuste de altura da aparafusadeira; Computador portátil com processador Intel Core i5-4210U e memória RAM de 8GB; Arduino IDE; Placa de circuito eletrônico microcontrolado; Circuito divisor de tensão; Módulo de conversão RS232 para USB; Temporizador.

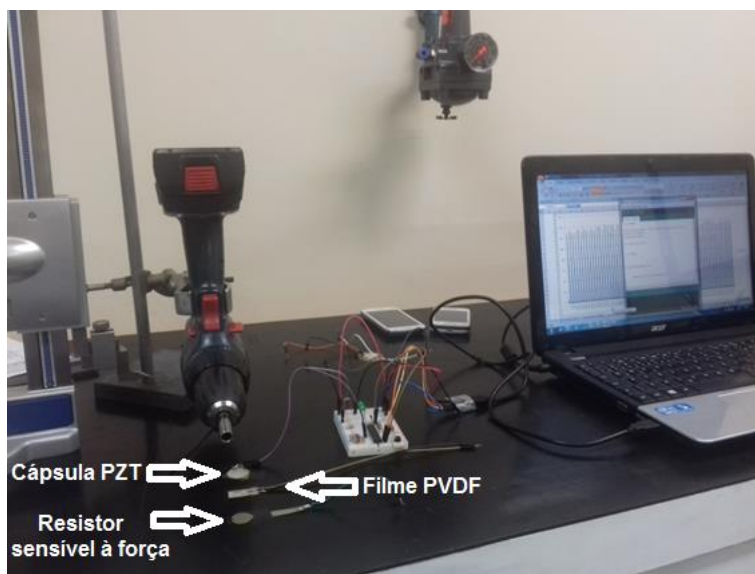


Figura 2. Montagem do experimento.

Os sinais gerados pelos sensores eram recebidos e tratados por um circuito eletrônico (CI) microcontrolado que convertia as respostas dos sensores em sinal analógico e enviava para um computador. O esquema do CI microcontrolado em questão é apresentado na Fig. (3), onde o módulo conversor RS232-USB (MD1) possui um CI TT232RT responsável pela conversão dos dados enviados pelo microcontrolador ATmega328P (CI1) com comunicação serial RS-232. O capacitor cerâmico de 100 nF (C1), a chave tátil NA (B1) e o resistor de 10 k Ω ¼ W (R1) compõem o circuito de reset para o microcontrolador. O oscilador de cristal 16 MHz (Q1) e os capacitores cerâmicos de 22 pF (C2 e C3) atuam no clock do microcontrolador. O diodo LED verde (LED1) e o resistor de 1 k Ω ¼ W (R2) servem para indicar que o microcontrolador está em funcionamento. O diodo zener de 5,1 V (D1) e o resistor de 10 M Ω ¼ W (R3) são responsáveis por limitar a tensão de entrada em 5 V (sinal analógico lido), que é a tensão máxima suportada pelo microcontrolador. Os resistores de 220 k Ω ¼ W (R4) e de 10 k Ω ¼ W (R5) possibilitam o ganho para amplificação do sinal no amplificador operacional LM358P (CI2). Finalmente, o diodo zener 5,1 V (D2) e o resistor de 220 k Ω ¼ W (R6) são responsáveis por limitar a tensão a ser amplificada em 5 V.

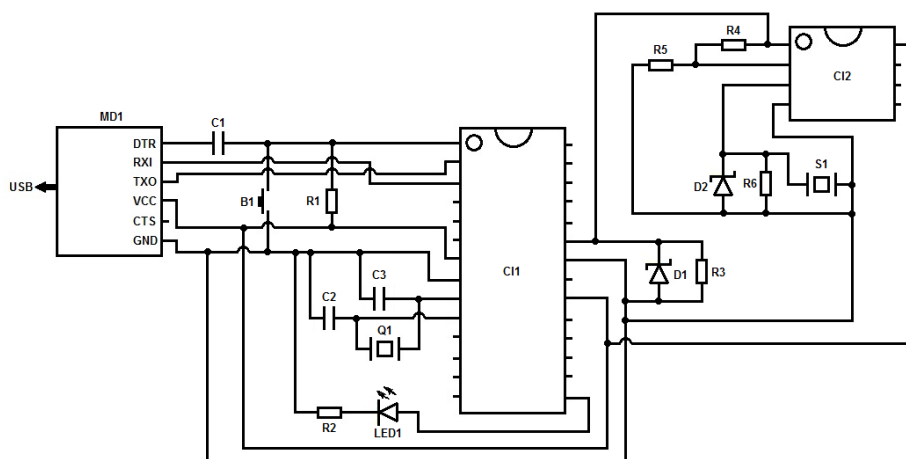


Figura 3. Esquema do circuito eletrônico microcontrolado.

Os dados coletados nos experimentos foram inseridos e salvos em planilhas de Excel para realização dos cálculos dos parâmetros, geração de gráficos e as análises subsequentes.

É importante frisar que o experimento aqui relatado não constitui um teste de conceito, o que será feito nas etapas finais do projeto em que este experimento está inserido, após a montagem do protótipo do Sistema Medidor de Força. O que se pretendia com esse experimento era uma definição inicial de que tipo de sensor utilizar neste Sistema, decisão essa que pode vir a ser alterada após os testes de conceito do protótipo. Neste contexto, o uso de abraçadeiras afixadas na extremidade de um eixo rotativo é justificado pelo fato de permitir um setup experimental simples, de rápida

montagem e barato, assim como pelo fato do fenômeno do contato abraçadeira-sensor guardar certa similaridade com a remoção de cavacos pelos dentes de uma fresa em corte concordante, uma vez que a abraçadeira inicia o contato com um impacto e a força aplicada por ela sobre o sensor decresce gradativamente com a continuidade da rotação do eixo. A característica que mais afasta essa configuração experimental do fenômeno a ser medido em operações de microfresamento é a frequência de ocorrência do fenômeno. Porém, o que se buscava com esse experimento era verificar qual dos sensores disponíveis era capaz de identificar o fenômeno de um impacto de baixa força seguido por uma redução gradativa de contato, além de permitir medir o tempo de recuperação dos sensores, o que esta configuração experimental permite.

2.3. Planejamento Experimental

O experimento em questão foi classificado como sendo um fatorial completo, onde foram considerados três fatores: a distância entre a superfície do sensor e o eixo em rotação (59 mm ou 61 mm); a velocidade de rotação da aparafusadeira (192 RPM, 348 RPM ou 1044 RPM) e o sensor utilizado (cápsula PZT, filme PVDF ou resistor sensível à força).

O experimento foi realizado segundo a matriz de condições experimentais da Tab. (1) e os ensaios de cada condição experimental foram repetidos duas vezes.

Tabela 1. Matriz de condições experimentais.

CONDIÇÃO EXPERIMENTAL	SENSOR	VELOCIDADE ROTACIONAL	DISTÂNCIA SENSOR-EIXO
1	Cápsula PZT (S1)	192	59
2	Cápsula PZT (S1)	192	61
3	Cápsula PZT (S1)	348	59
4	Cápsula PZT (S1)	348	61
5	Cápsula PZT (S1)	1044	59
6	Cápsula PZT (S1)	1044	61
7	Filme PVDF (S2)	192	59
8	Filme PVDF (S2)	192	61
9	Filme PVDF (S2)	348	59
10	Filme PVDF (S2)	348	61
11	Filme PVDF (S2)	1044	59
12	Filme PVDF (S2)	1044	61
13	Resistor (S3)	192	59
14	Resistor (S3)	192	61
15	Resistor (S3)	348	59
16	Resistor (S3)	348	61
17	Resistor (S3)	1044	59
18	Resistor (S3)	1044	61

A ordem de realização dos ensaios foi aleatória, de modo a que a análise não sofresse com a influência de vícios que interfiram nos resultados dos ensaios.

As características de interesse para este experimento são descritas como segue:

- Amplitude entre picos: considera-se a diferença entre o valor do pico máximo e o pico mínimo nos ciclos das leituras dos sinais.
- Repetibilidade: é a capacidade do sistema de medição para dar, em condições de utilização definidas, respostas muito próximas quando se aplica repetidamente o mesmo sinal de entrada. Quanto menor o seu valor maior será a precisão do sistema. Para o experimento, foi utilizada a Eq. (1).

$$\text{Repetibilidade} = \frac{\text{Desvio padrão}}{\sqrt{\text{Quantidade de ciclos}}} \quad (1)$$

- Coeficiente de variação: refere-se ao coeficiente relativo à variância encontrada entre os picos dos ciclos sob condições de repetibilidade. Para o experimento, foi utilizada a Eq. (2).

$$\text{Coeficiente de variação} = \frac{\text{Desvio padrão}}{\text{Média das leituras}} \quad (2)$$

- Coerência do sinal com o fenômeno: avalia qualitativamente a coerência do gráfico gerado pelas medições realizadas com o que se espera do fenômeno reproduzido. No caso deste experimento, espera-se um pico repentino de força seguido de uma redução gradual da mesma, sinalizando o impacto inicial da ponta da abraçadeira em contato com o sensor e o arraste da ponta até o afastamento total da superfície do sensor.
- Integridade do sinal: trata-se do percentual de medições que não foram "perdidas" pelo sistema, considerando como referência a condição experimental similar (velocidade rotacional e distância sensor-eixo) em que houve a quantidade maior de medições. Este item foi incluído, pois, em um experimento exploratório anterior foi identificado que nem todas as interações são captadas por todos os sensores. Para o experimento, foi utilizada a Eq. (3).

$$\text{Integridade do sinal} = \frac{\text{Quantidade de leituras}}{\text{Quantidade de referência}} \quad (3)$$

- Sensibilidade: característica com a qual espera-se avaliar a capacidade do sensor de identificar variações de força. Para o experimento, foi utilizada a Eq. (4).

$$\text{Sensibilidade} = 1 - \frac{\frac{D1+V1}{D2+V2}}{V2-V1} \quad (4)$$

Onde as distâncias D1 e D2 se referem às distâncias entre sensor e eixo, e as componentes V1 e V2 se referem aos valores de sinais médios medidos nas condições ensaiadas. Sendo 61 mm a distância D1 e 59 mm a distância D2.

- Tempo de recuperação: refere-se à capacidade do sensor de retornar ao seu estado normal de repouso, para leitura de um novo ciclo. Este parâmetro será avaliado qualitativa e visualmente nos gráficos que indicam o comportamento dos sinais, analisando o intervalo de tempo em que o sinal demora para retornar ao zero entre ciclos.

Ainda é necessário citar que há fatores que podem exercer algum tipo de influência nos resultados, mas que, nesse experimento não foi possível controlar ou considerar, como:

- Tempo de resposta do sensor;
- Ruídos advindos do circuito eletrônico;
- Excentricidade do eixo da aparafusadeira;
- Instabilidade da fixação da aparafusadeira;
- Influência da degradação do sensor advinda do uso;

2.4. Análise do Comportamento de Recuperação

A análise do comportamento de recuperação do sensor selecionado foi feita comparando-se o comportamento do sinal elétrico medido com a trajetória de contato da ponta da abraçadeira plástica com o sensor.

Utilizou-se uma filmadora digital posicionada de frente para o eixo da aparafusadeira, com o objetivo de registrar em vídeo de alta resolução a trajetória rotacional da abraçadeira e os momentos de contato com o sensor. Os vídeos foram produzidos em 1920x1080 pixels, capturando 30 frames por segundo.

Foi realizada uma marcação no corpo da aparafusadeira para ser usada como referência visual na localização da abraçadeira em cada ciclo, conforme Fig. (4).

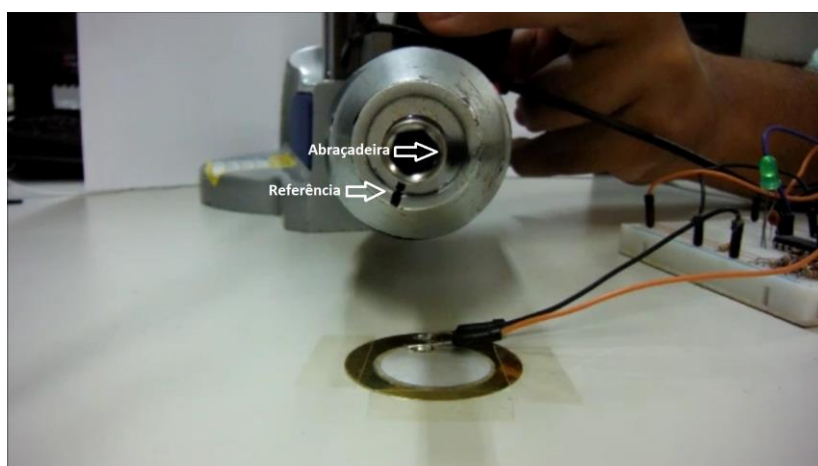


Figura 4. Exemplo de frame.

Cada ciclo compreende uma rotação completa da aparafusadeira na filmagem e no gráfico dos sinais elétricos o ciclo se dá entre os picos mais protuberantes de sinais. A velocidade rotacional da aparafusadeira foi de aproximadamente 185 RPM. Na maior parte dos frames, a abraçadeira é visualizada em forma de espectro, deste modo a análise aqui descrita será realizada considerando a possibilidade ou impossibilidade da abraçadeira entrar em contato com o sensor em cada frame, mesmo que seja um contato parcial.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos experimentos descritos nas seções anteriores são descritos a seguir.

3.1. Seleção do Elemento Sensor

A Tabela (2), a seguir, apresenta os resultados dos valores das características de interesse encontrados em cada condição experimental testada.

Tabela 2. Resultados das condições experimentais.

CONDIÇÃO	SENSOR	MÉDIA DO SINAL	REPETIBILIDADE	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	COERÊNCIA SINAL-FENÔMENO	INTEGRIDADE DO SINAL	SENSIBILIDADE	TEMPO DE RECUPERAÇÃO
1	Cápsula PZT	198	0,56	3%	FORTE	97,5%	97,7%	LENTO
2	Cápsula PZT	162	1,56	9%	FORTE	94,6%		LENTO
3	Cápsula PZT	181	0,86	6%	FORTE	90,7%	70,6%	LENTO
4	Cápsula PZT	184	1,54	11%	FORTE	89,6%		LENTO
5	Cápsula PZT	551	2,19	9%	FORTE	74,0%	99,7%	LENTO
6	Cápsula PZT	324	3,91	27%	FORTE	85,6%		LENTO
7	Filme PVDF	216	0,69	3%	FRACO	96,0%	99,3%	RÁPIDO
8	Filme PVDF	126	3,26	25%	FRACO	95,6%		RÁPIDO
9	Filme PVDF	229	1,36	8%	FRACO	95,1%	99,2%	RÁPIDO
10	Filme PVDF	148	3,09	28%	FRACO	95,5%		RÁPIDO
11	Filme PVDF	245	2,99	28%	FRACO	93,5%	99,0%	RÁPIDO
12	Filme PVDF	175	2,15	28%	FRACO	100,0%		RÁPIDO
13	Resistor	169	2,12	12%	MODERADO	100,0%	92,4%	RÁPIDO
14	Resistor	156	1,92	12%	MODERADO	100,0%		RÁPIDO
15	Resistor	192	1,08	7%	MODERADO	100,0%	91,3%	RÁPIDO
16	Resistor	205	1,67	11%	MODERADO	100,0%		RÁPIDO
17	Resistor	239	4,58	44%	MODERADO	100,0%	-	RÁPIDO
18	Resistor	-	-	-	-	-		-

Os resultados dos cálculos de repetibilidade dão conta da superioridade relativa à precisão que o sensor cápsula PZT apresenta em relação aos demais. O mesmo possibilitou uma repetibilidade média de 1,77, considerando todas as condições experimentais ensaiadas com este tipo de sensor, enquanto que o sensor filme PVDF e o sensor resistor possibilitaram, respectivamente, 2,26 e 2,27.

No que diz respeito ao coeficiente de variação, o sensor cápsula PZT foi o único que apresentou predominância de coeficiente de apenas um dígito na maioria de suas condições experimentais. No cálculo de um coeficiente de variação médio que represente um valor de coeficiente para cada sensor, considerando os valores medidos, temos que o sensor cápsula PZT apresenta 11% de variação, o sensor filme PVDF apresenta 20% de variação e o sensor resistor apresenta 17% de variação.

Foi verificado que a menor distância entre sensor e atuador, geralmente, apresenta uma força maior, considerando as mesmas condições. Verificou-se também que os valores de sensibilidade dos sensores são bem próximos de 90%, dando destaque para o sensor de filme PVDF que alcançou níveis acima de 99% de sensibilidade.

Para análise da coerência entre sinal e fenômeno foram gerados gráficos dos valores de um ciclo de medição de cada sensor, como apresentado na Fig. (5). O comportamento esperado para o sinal dado o fenômeno seria de um pico brusco repentino seguido de uma queda gradual do sinal até próximo a zero, evidenciando o momento em que a

abraçadeira colide com a superfície do sensor e em seguida é arrastada até perder o contato com o mesmo gradualmente.

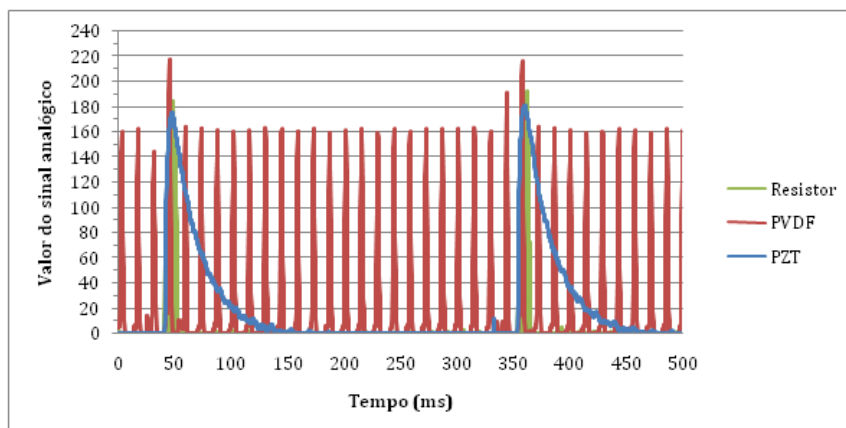


Figura 5. Comparação entre sinais de sensores diferentes nas mesmas condições.

Observa-se o comportamento gráfico dos sinais dos sensores na Fig. (5), onde é possível identificar que o sensor tipo cápsula PZT é o que melhor se aproxima com o comportamento ideal esperado para o critério coerência sinal-fenômeno. O sensor resistor sensível à força apresenta um comportamento similar, com a diferença da queda do sinal que não é tão gradual quanto esperado. Já o sensor filme PVDF apresenta um comportamento totalmente inesperado, com diversos picos em momentos onde não deveria haver excitação.

O sensor resistor sensível à força apresentou os melhores resultados para integridade do sinal e tempo de recuperação, sendo inclusive referência na comparação com os outros sensores no quesito integridade do sinal. Porém, foi constatado que o mesmo, graças a sua robustez, é limitado ao medir pequenas variações de sinais de força, como evidencia a condição experimental 18 que não apresentou sinais suficientemente significativos para identificação dos ciclos de medições.

O experimento realizado para seleção do sensor a ser utilizado no protótipo do Sistema de Medição de Força de Usinagem apresentou que características de interesse como repetibilidade, coeficiente de variação e coerência sinal-fenômeno apontam para a escolha da cápsula piezoelétrica.

3.2. Tempo de Recuperação da Cápsula PZT

A partir de uma análise visual das filmagens realizadas foi observado que uma rotação completa do eixo se dá em dez frames, sendo que, em no máximo três desses dez frames, percebe-se o contato entre o sensor e a abraçadeira. Considerando 360° como sendo 100% de uma rotação e que a rotação foi dividida em dez frames, cada frame representa 36° ou 10% de cada rotação, ou seja, o contato abraçadeira-sensor se dá em, no máximo, 108° da rotação completa da abraçadeira ou 97,3 ms. O gráfico da Fig. (6) apresenta uma sobreposição dessas duas informações.

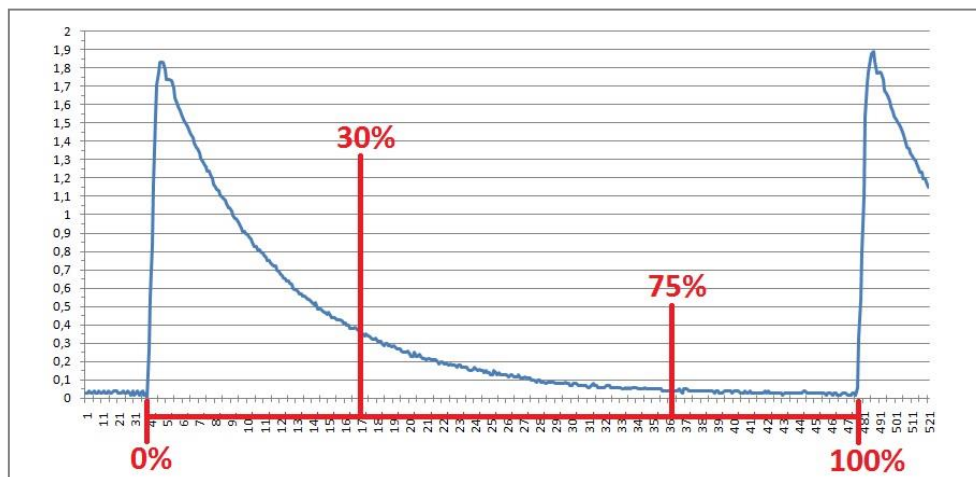


Figura 6. Percentual em que há contato e final do tempo de recuperação.

A curva em azul é a medição de tensão da corrente emitida pela cápsula piezoelétrica, a barra vermelha na parte inferior do gráfico representa um ciclo do fenômeno (uma rotação da abraçadeira) iniciado com o início do pico de tensão (início de contato abraçadeira-sensor) e a barra vertical vermelha indica 30% deste ciclo, que é o momento em que o contato abraçadeira-sensor cessa.

Como após 30% do ciclo já não há mais contato identificável abraçadeira-sensor, em uma situação hipotética em que o sensor se recuperasse imediatamente, o sinal de tensão medido deveria retornar a um valor próximo de zero nas imediações da marca. Conclui-se, portanto, que o sinal de tensão medido além da barra vertical corresponde ao fenômeno de recuperação do sensor. Outras informações importantes que podem ser extraídas deste gráfico é a de que a recuperação da cápsula piezoelétrica utilizada se encerra em cerca de 75% do ciclo e que, quando o novo contato acontece, o sensor já se recuperou.

Isso significa que, a medição de tensão deveria retornar a um valor próximo de zero nas imediações da marca de 30%. Portanto, o sensor em questão apresenta no máximo cerca de 75% ou 243ms de seu ciclo como tempo de recuperação, conforme apresentado.

4. CONCLUSÕES

O trabalho evidencia que os sensores piezoelétricos em cápsulas (PZT), neste caso, são a solução mais indicada, dentre os sensores testados, para ser utilizada como elemento sensor no desenvolvimento do sistema para medição de força em operações de microfresamento em que este estudo está inserido. Estes podem ser adquiridos facilmente por um custo baixo, em diversas configurações de tamanho e materiais, e se mostrou superior às outras tecnologias na maioria dos requisitos ensaiados nas condições experimentais, mais especificamente, foi o sensor que apresentou menor amplitude entre picos nos sinais, a coerência sinal-fenômeno apresentou-se forte, evidenciando a qualidade do tempo de resposta, e finalmente, o sensor piezoelétrico em cápsula (PZT) apresentou os menores valores de repetibilidade e coeficiente de variação, indicando ser o mais preciso entre eles. O mesmo só ficou ligeiramente atrás do sensor resistor sensível à força nos resultados de integridade do sinal e tempo de recuperação.

A análise do comportamento de recuperação dos sensores em cápsulas piezoelétricas (PZT) revelou um tempo de cerca de 75% do ciclo ou 243ms, no caso, que o material piezoelétrico leva para retornar ao seu status inicial em repouso, sem excitação. O tempo de recuperação do sensor sugere que o dispositivo que será desenvolvido para medição de forças seja utilizado mais para análises quantitativas do que qualitativas, visto que nem sempre os valores dos sinais são referentes a excitações externas.

5. REFERÊNCIAS

- Kalpakjian, S. and Schmid, S.R., 2001, "Manufacturing Engineering and Technology", Vol. 4, Ed. Prentice Hall, New Jersey, United States of America.
- Dib, M.H.M., 2013, "Fundamentos do fresamento: uma aplicação em microfresamento", Masters dissertation, Universidade de São Paulo, São Carlos, 140 p.
- Childs, T.H.C., Maekawa, K., Obikawa, T. and Yamane, Y., 2000, "Metal machining: theory and applications", Ed. Arnold, London, United Kingdom.
- Diniz, A.E., Marcondes, F.C. and Coppini, N.L., 1999, "Tecnologia da Usinagem dos Materiais", Vol 1, Ed. Artliber, São Paulo, Brazil.
- Baldo, D., 2013, "Estudo do microfresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando análise de sinais de força e emissão acústica", Masters dissertation, Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 127 p.
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T. and Silva, M.B., 2009, "Teoria da Usinagem dos Materiais", Vol 1, Ed. Edgard Blucher, São Paulo, Brazil, 371 p.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

DEVELOPMENT OF A MACHINE FORCE MEASUREMENT DEVIDE FOR MICROMILLING OPERATIONS: SELECTION OF THE SENSOR ELEMENT

Diego Ursulino dos Santos, ursulino.diego@gmail.com¹
Guilherme Oliveira de Souza, guilherme.souza@fieb.org.br²

¹SENAI Alagoas, Rua Pedro Américo, 18 - Poço, Maceió - AL, 57025-890,

²Faculdade SENAI CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845 - Piatã, Salvador - BA, 41650-010,

Abstract: *On micromilling the resistance of the tools to the mechanical stresses to which they are subjected is significantly smaller due to the reduced diameters that characterize them, which causes a greater risk of breakage. In this way, being able to measure forces in micromilling processes can be useful for both research and development purposes, as well as for process monitoring. This work is a part of a larger project that aims to develop a low cost force measurement system for micromilling operations,, that allows qualitative comparative analyzes. The objective of this paper is to present the experiments and analyzes that were carried out to support the choice of the technology that will be used as a sensor element in the prototype of the machining force measurement system. The study contemplated an experimental stage in which low cost highly available force sensors were tested and evaluated regarding their capabilities for measuring the phenomenon, with a main emphasis on response time, coefficient of variation, sensitivity and recovery time. The sensors tested were: piezoelectric PZT capsule, piezoelectric film and force-sensitive resistors. It was observed that among the analyzed sensors the PZT piezoelectric capsules are the option that best suits the requirements demanded by being capable of picking up force signals in a satisfactory response time evidenced by signal-phenomenon coherence, since they have a mean variation coefficient of 11 %, the lowest among the tested sensors, and because they are the most accurate with the lowest values of repeatability, with 1.77 average. However, the recovery time of PZT piezoelectric capsules is worse among the sensors tested, nevertheless it is proportional to the applied force, the smaller the force the less time for recovery.*

Keywords: micromachining, micromilling, metrology, cutting force.

Copyright

Authors are solely responsible for the content of the printed material included in their work.