



SISTEMA DE ACIONAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS DE UM MICROSCÓPIO DE FORÇA ATÔMICA EM MACROESCALA

Ishida WG, Dornellas MP, Bock EGP, Martins HM, Tuselli JMG*

**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, Brasil*

Resumo. Um microscópio de força atômica (MFA ou do inglês, AFM- atomic force microscope) funciona por meio de indução de uma agulha de precisão nanoscópica a um movimento oscilatório na direção do material de prova, de modo que a aproximação da agulha registra coordenadas e produz uma imagem digital da superfície. Por tratar-se de um instrumento eletrônico de medição de alta precisão, sua complexidade exige um alto custo de aquisição de seus componentes e seu uso se limita a pessoal treinado. Uma aplicação educacional do MFA torna acessível para a classe estudantil o primeiro contato com essa tecnologia, operando com amostras em macroescala, visíveis ao olho nu. Isso permite a redução dos custos do equipamento e cria uma forma didática de avaliação da qualidade na produção experimental da imagem. Foi consultada a literatura a respeito de seu funcionamento e estudadas alternativas para embasamento teórico do projeto, conseguindo-se um alcance de medição numa área de 50 mm por 50 mm com resolução de 1 mm, tempo de cobertura de área total de aproximadamente 16 minutos. Precisão de amplitude de 1 mm dada pelo sensor *time of flight* no eixo vertical. Tempo de 200 ms por coordenada z. Passo = 10 ms (deslocamento) + 10 ms (estacionário) + 180 ms (leitura precisa). Este trabalho fornece o desenho e a teoria utilizada na confecção dos sistemas de acionamento e sensoriamento do macro-MFA, bem como os resultados experimentais. Os resultados mostraram que esta é uma alternativa viável para a Introdução no estudo de nanotecnologia e é uma alternativa promissora para uso acadêmico.

Palavras-chave. AFM, macroescala, educacional, nanotecnologia, MFA, Arduino.

Introdução. Conforme são feitas descobertas em Nanotecnologia e Nanociência, faz-se necessário aprofundar e ampliar o alcance de seu estudo, que impacta a indústria e expande as possibilidades da tecnologia moderna com melhor armazenamento de energia e dados, síntese de novos materiais e manipulação de átomos. A exploração da escala atômica, impulsionada pelo discurso de Richard Feynman, ocorrido em dezembro de 1959, levou à invenção do instrumento que possibilitou uma visualização precisa e manipulação dos átomos (Feynman, 1959): o Atomic Force Microscope (AFM), ou Microscópio de Força Atômica (MFA).

Um MFA é um microscópio de varredura de sonda que usa princípios do STM e do profilômetro com estilete para induzir interações de forças entre uma ponta de prova afiada, chamada sonda, ou probe, e uma superfície de amostra para capturar variações na altura do cantilever e formar uma imagem tridimensional da superfície, cuja resolução chega a 30 Å de largura e 1 Å de altura, segundo Binnig et al. (1986). Tal instrumento consiste em uma sonda que interage com a amostra e varia a altura, provocando um aumento na amplitude da leitura. Todos os dados de posição e altura da amostra são coletados e traduzidos em uma imagem computadorizada com características precisas de superfície a nível molecular.

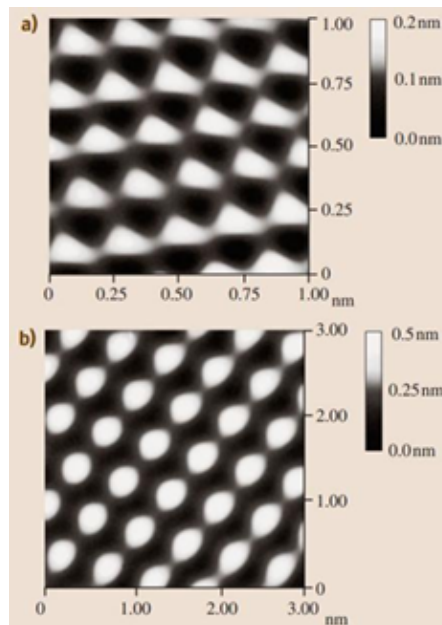
A fabricação de um MFA é altamente complexa, exigindo instrumentos de precisão nanométrica e mecanismos oscilatórios programados conforme seu uso (Chavan, 2010). Esses fatores elevam os custos e demandam um planejamento complexo, o que pode atrasar ou inviabilizar a conclusão do projeto em alguns meios acadêmicos. Para Giessibl (2005), há grandes desafios no alcance de uma boa resolução de imagem, visto que a aquisição dos sinais é sujeita a interações atômicas em vez de fluxo de corrente elétrica, como é no STM.

Questões práticas como o alto custo e a fragilidade dos MFAs são desafios para a realização de tais exercícios em laboratórios que não sejam especializados. Há, entretanto, alternativas para o ensino prático dos princípios de Nanotecnologia por meio de MFAs educacionais de macroescala existentes, como demonstram Amin-Shahidi e Trumper (2015) e Hsieh et al. (2014), operando no modo de contato e de forma que sua montagem seja possível e demonstrável por universitários, possibilitando também um aprofundamento em Mecatrônica.

O objetivo deste trabalho é o projeto, construção e instrumentação dos sistemas de acionamento e transdução de um protótipo de MFA educacional de baixo custo, com o intuito de expandir a quantidade de bens nanotecnológicos comercializados e promover o aprimoramento do suporte acadêmico à referida área. Para isso, definiu-se um método de leitura baseado na facilidade de operação, rapidez, baixo custo de montagem e simplicidade de programação, bem como foram operados os sistemas de atuação e sensoriamento, avaliando-se a viabilidade financeira, o que confirmou a possibilidade de projetar e montar esses sistemas. Ademais, programou-se o motor responsável pelo acionamento da plataforma nos eixos X e Y e integrou-se aos sistemas de controle e tradução.

Materiais e Métodos. Segundo Radmacher et al. (1994), há dois métodos principais para a medição de dados obtidos por um Microscópio de Força Atômica (MFA): o modo de oscilação e o modo de contato. No primeiro, uma voltagem constante é aplicada à amostra nas posições x e y, enquanto a voltagem no eixo z é variada. À medida que o cantilever oscila, um gráfico é gerado com base na posição $x \times z$, onde a parte inferior do gráfico representa a topografia da superfície, conforme ilustrado na figura 1.

Figura 1: Exemplo de imagem de MFA. Fonte: Bhushan, 2007



Já no modo de contato, o cantilever é mantido a uma altura constante, escaneando a superfície linha por linha. À medida que as linhas são digitalizadas, as imagens formam uma representação tridimensional, em que as diferenças de altura são indicadas por variações de cor correspondentes à posição no eixo z. Para este projeto, optou-se pelo modo de contato, que oferece maior simplicidade de operação e um escaneamento mais rápido em comparação com o modo dinâmico, conforme indicado pelos cursos do NanoHubU (2012), especializado em Nanotecnologia.

O artigo de Tsung-Han Hsieh et al. (2014) também apoia essa escolha, ao demonstrar a viabilidade de construir um MFA em escala macro utilizando peças acessíveis, como blocos de LEGO. O modo de contato foi selecionado por não exigir que o cantilever opere na frequência natural de vibração. O trabalho da Universidade de Taiwan comprova que, mesmo com materiais simples e sem procedimentos complexos, é possível obter leituras precisas de superfícies, ainda que em escala milimétrica.

A fabricação de um cantilever convencional envolve técnicas precisas de microfabricação, que incluem a seleção do substrato, a deposição de materiais em camadas, a litografia, o acabamento e os testes subsequentes (Dzedzickis, 2023). Esses cantilevers são frequentemente feitos de materiais como silício e outros semicondutores. No entanto, para cantilevers em macroescala, Torii et al. (1995) sugere a criação de um modelo em escala ampliada para

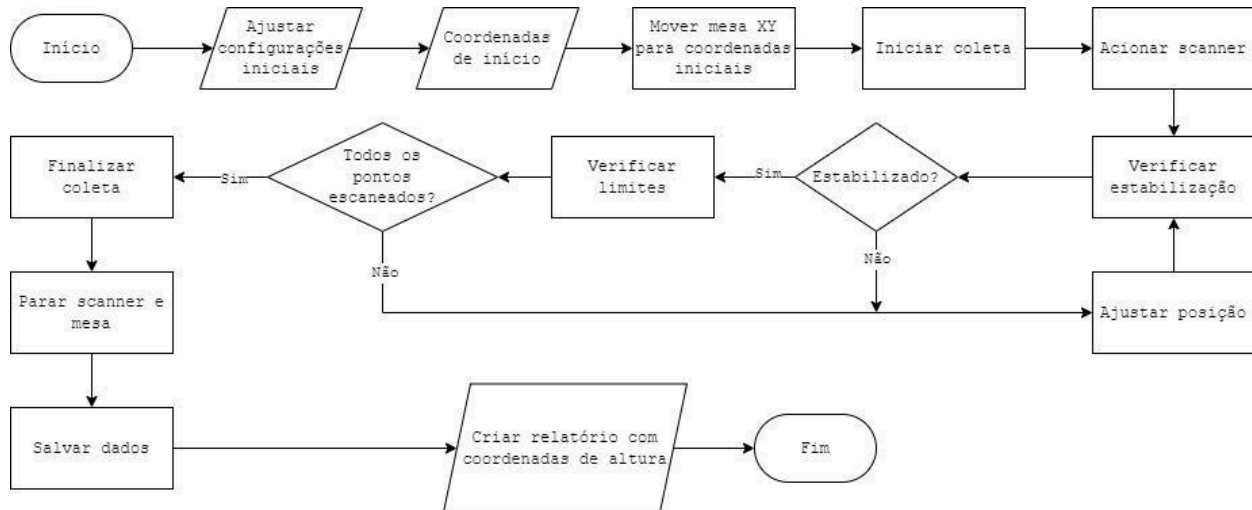
determinar com precisão sua constante elástica, já que a deflexão em macroescala é muito semelhante à observada na escala nanométrica. A interferometria heteródina pode ser usada para medir essa deflexão, e as propriedades mecânicas permanecem praticamente inalteradas, com um pequeno erro entre as escalas (Torii et al. 1995). Deste modo, o desempenho e a leitura dos cantilevers são comparáveis nas escalas macro e micro, permitindo o uso de valores de referência obtidos em escala micro para projetos em macroescala.

O Arduino Mega 2560 R3 foi selecionado para o projeto, devido à sua capacidade de monitoramento de mais canais UART, possibilitando futuras expansões e melhor encaixe do módulo CNC, sendo uma melhor alternativa ao Arduino Uno (Belvedere, 2018). Adicionalmente, a utilização de um CNC Shield otimiza o controle de múltiplos motores de passo, permitindo o uso de softwares gráficos para a definição precisa das coordenadas nos eixos x, y e z, além de organizar eficientemente a fiação conectada aos componentes (Belvedere, 2018). Os drivers A4988, que são inseridos no CNC Shield, facilitam o controle dos motores de passo, contudo, a alimentação fornecida pelo Arduino Mega 2560 R3 não é suficiente para suprir a demanda de potência dos motores, o que torna indispensável a utilização de uma fonte de alimentação externa (12~36 V), cuja alternativa foi adaptada de um carregador de notebook 19V, e conectada aos terminais por um fio.

Ao trabalhar a sequência e a lógica de funcionamento dos sistemas, considerou-se que apenas os eixos x e y seriam controlados, uma vez que o cantilever permanece a um nível constante, registrando a variação no eixo z exclusivamente pelo sensor laser. Dessa forma, a lógica do sistema foi estruturada para coletar a altura em cada par de coordenadas (x, y) e avançar para o próximo ponto até que toda a área seja escaneada.

O algoritmo pode ser facilmente modificado para incorporar componentes adicionais, como um dispositivo de saída ou um interruptor, permitindo maior flexibilidade e facilidade na alteração dos comandos, conforme representado pela figura 2.

Figura 2 - Fluxograma do algoritmo. Fonte: Autoria própria.



Os motores Nema 17 utilizados no projeto (200 passos por volta, 1,8° por revolução, deslocamento linear 5 mm por revolução, frequência de pulsos 1 kHz) realizam a movimentação da plataforma de um MFA, podendo haver apenas eixos x e y ou x, y e z. Alguns dados sobre o funcionamento dos motores de passo são: 5 revoluções por segundo, comprimento escaneado 5 mm/s, considerando tempo de leitura de alta precisão como 200 ms e precisão de 0,5 mm. Considerando também que cada linha é percorrida com 100 passos, e a área de scan é quadrada (100 × 100), calcula-se o tempo total de leitura, sendo este 2000 segundos, ou 33,3 minutos.

$$100^2 \cdot 200 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 2000 \text{ s}$$

$$\frac{2000}{60} =$$

$$= 33,3 \text{ minutos}$$

O sensor óptico VL53LXX-V2 usa laser para calcular distância entre o sensor e o substrato, dado um certo tempo (Belvedere,2018). A partir disso, consegue também determinar a distância de uma maneira mais precisa do que um sensor ultrassônico. Funcionando no modo programado padrão, começa a medir assim que se inicia o programa. Baseado na resolução em z do VL53LXX-V2 (1 mm de altura), para frequência de pulsos de 1 kHz do motor de passo e espaçamento de 1 mm para x e y lineares, o tempo de escaneamento para toda a área, com precisão de 1 mm (x, y, z), é 16 minutos e 40 segundos.

Para a parte mecânica, o cantilever toma parte central, por ser o mecanismo que fica em proximidade com a amostra analisada e sua variação na altura indica indiretamente o relevo do substrato (Dzedzickis,2023).

Medidas de referência do cantilever tais como sua faixa de valores de k e formato foram determinadas. Para o cantilever em macroescala, foi escolhido o alumínio- liga 3104, módulo de Young igual a $\sim 70,39$ GPa, medido por Michelin (2004). A obtenção de uma constante elástica maior exige que se modifique algum dos fatores da equação, dentre os quais: substituição do material, aumento de largura, aumento de espessura, diminuição do comprimento. Foi cortada segundo as dimensões e moldada segundo a forma desejada, conforme as figuras 3 e 4.

Figura 3 - Desenho 3D de cantilever. Fonte: Autoria própria.

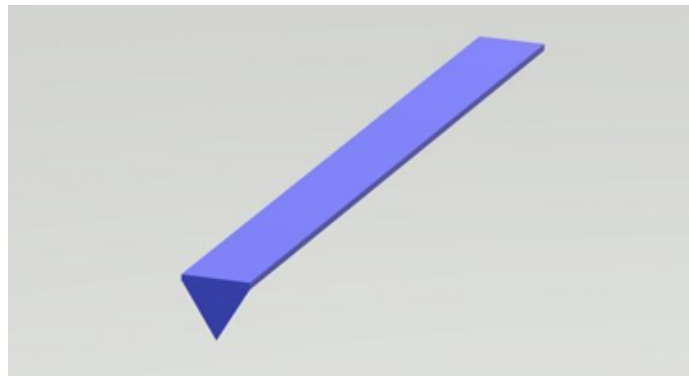
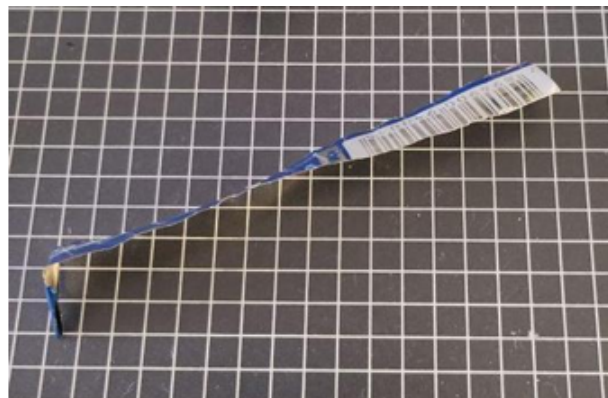


Figura 4 - Cantilever moldado. Fonte: Autoria própria.

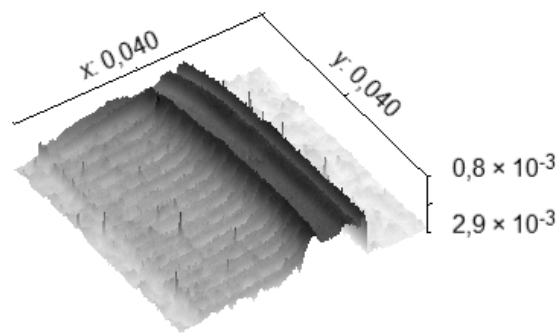


Resultados. Para realizar a montagem, foram testados os motores, determinando-se os passos necessários para mover o sistema e sua velocidade. Em seguida, o sensor VL53LXX-V2 foi avaliado quanto à sua distância máxima e o intervalo entre as leituras. Por fim, o dispositivo de

saída foi testado e aprovado quanto à sua capacidade de impressão. Com a estrutura montada, os componentes, como os motores de passo Nema 17 e o sensor VL53LXX-V2, foram ajustados conforme a programação do Arduino.

Para gerar a imagem, os dados coletados como coordenadas cartesianas (x, y, z) foram processados por software especializado. O Gwyddion (versão 2.63) foi escolhido por ser ideal para a formação de imagens de MFA, uma vez que admite configurações específicas e possui ferramentas úteis como determinação de escalas (de 28 milimétrica a nanométrica), eliminação de anomalias, modelagem de imagem bidimensional e tridimensional, medidas indicadas em imagem final, entre outras. A imagem final, formada após testes de calibração do sensor, encontra-se representada pela figura 5.

Figura 5 - Imagem formada após testes, precisão 1 mm. Fonte: Autoria própria.



Discussão. A geração de imagem é uma etapa crucial para a leitura de superfícies, exigindo que os dados estejam em conformidade com suas posições de medição originais. Para gerar os resultados, os sensores e componentes foram corretamente conectados, e os testes repetidos até a formação da imagem. O processo seguiu as etapas de conexão dos motores de passo e do sensor óptico ao circuito, acionamento dos motores e sensor pelo programa do Arduino, retorno da distância percorrida pelos motores de passo, envio das coordenadas z pelo sensor time of flight, registro da trajetória tridimensional em um arquivo “.xyz” compatível com o software Gwyddion, e processamento do arquivo pelo Gwyddion para gerar a topografia da amostra em 3D.

O software Gwyddion, escolhido por ser gratuito e projetado para dados de MFA, oferece ferramentas específicas como modelagem 2D e 3D, eliminação de anomalias e medição de escalas, garantindo a fidelidade da imagem visualmente.



Conclusão. Foi possível estabelecer a viabilidade da construção de um sistema de acionamento e aquisição de dados a baixo custo, para aplicação educacional em um microscópio de força atômica operando em macroescala. A programação, controle e coleta de dados propiciam uma relação prática entre ensino e aprendizagem, devido à natureza modular e multidisciplinar do projeto.

O sistema de acionamento e aquisição de dados foi capaz de controlar e coletar os dados necessários para integração ao equipamento MFA, trabalhando de forma coordenada com os motores de passo e o sensor, produzindo dados transduzidos para imagem computadorizada. A eficácia da produção da imagem foi verificada visualmente, comparando-a ao original e ajustando a área de leitura conforme necessário.

Além do mencionado acima, há como possibilidades a diminuição da escala efetiva de medição, de mm para μm ; geração de imagens computadorizadas por meio de softwares alternativos, como o MATLAB; testes com corpos de prova de diferentes dimensões e materiais; adaptação do projeto a aplicações específicas, como análise de materiais, propriedades mecânicas, interações superficiais ou sistemas biológicos. Estudo da possibilidade de substituição dos atuadores verticais por disco e motor com eixo de rotação fixo, o que faria leitura semelhante a um tocador de discos e vinil.

Sugere-se que a pesquisa em relação ao assunto sirva como uma ferramenta didática em aulas de Ciência dos Materiais, Robótica, Eletrônica e Programação, em especial na introdução à microscopia, análise de microestruturas metálicas e projetos multidisciplinares.

Enfim, é possível continuar o estudo com as propostas acima citadas, de modo a melhorar o funcionamento da leitura e captura dos dados, além de implementar por completo o funcionamento de um MFA de baixo custo, o qual será possível a partir desta pesquisa.

Referências.

- AMIN-SHAHIDI, Darya; TRUMPER, David. Macro-scale atomic force microscope: An experimental platform for teaching precision mechatronics. *Mechatronics*, v. 31, p. 234-242, 2015.
- BELVEDERE, Paulo. *Arduino UNO—Fundamentos e aplicações*. SESI SENAI Editora, 2018.
- BHUSHAN, B.; BAUMANN. *Springer Handbook of Nanotechnology*. Berlin: Springer, 2007. P.361
- BINNIG, G.; QUATE, C. F.; GERBER, Ch. Atomic Force Microscope. *Physical Review Letters*, v. 56, n. 9, p. 930, 1986.
- CHAVAN, D. et al. Ferrule-top atomic force microscope. *Review of Scientific Instruments*, v. 81, n. 12, p. 123702, 2010.



- DZEDZICKIS, Andrius et al. Characteristics and Functionality of Cantilevers and Scanners in Atomic Force Microscopy. *Materials*, v. 16, n. 19, p. 6379, 2023.
- FEYNMAN, Richard P. Plenty of Room at the Bottom. In: APS annual meeting. Boston, MA, USA: Little Brown, 1959. p. 1-7
- GIESSIBL, Franz J. AFM's path to atomic resolution. *Materials Today*, v. 8, n. 5, p. 32-41, 2005.
- HSIEH, Tsung-Han et al. A conceptual atomic force microscope using LEGO for nanoscience education. *Int. J. Autom. Smart Technol*, v. 4, p. 113-121, 2014
- MICHELON, Marcelo Dall'Onder. Análise do processo de fabricação de latas de bebidas com liga de alumínio. 2004.
- RADMACHER, Manfred et al. Mapping Interaction Forces with the Atomic Force Microscope. *Biophysical Journal*, v. 66, n. 6, p. 2159-2165, 1999
- TORII, Akihiro et al. A method for determining the spring constant of cantilevers for atomic force microscopy. *Measurement science and Technology*, v. 7, n. 2, p. 179, 1996.