

MICROSCÓPIO DE TUNELAMENTO ATÔMICO DIDÁTICO DE BAIXO CUSTO

Bruno Barazani ¹; Bruno B. Chaves ²; Delson Torikai³

¹ Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Mecatrônica
Av. Prof. Mello Moraes, 2231
CEP: 05508-900, São Paulo, SP
irene.carmello@poli.usp.br
¹bruno.bara@gmail.com
²brunobchaves@gmail.com
³delson.torikai@poli.usp.br

Resumo: *O microscópio de tunelamento atômico é um instrumento capaz de mostrar uma superfície topográfica de materiais condutores em escala atômica, pela interação da corrente elétrica de tunelamento entre a sonda e a amostra, além de permitir muitos outros estudos a partir destes. Analisar uma área de determinada superfície condutora com resolução atômica seria de vital importância para o estudo das propriedades dos materiais e desenvolvimento de novos materiais com propriedades inéditas, permitindo conhecer melhor a inter-relação entre as propriedades nanoestruturais com as microestruturais e as propriedades macro dos materiais. Além disso, o desenvolvimento de um microscópio de tunelamento atômico consiste em um projeto multidisciplinar que engloba vários campos do conhecimento tais como química, mecânica, eletrônica, controle e outros. No presente trabalho foi desenvolvido um sistema de acionamento e posicionamento da ponta de prova de um STM de baixo custo, com um alcance da ordem de centenas de micra, permitindo, por exemplo, a análise de micro-rugosidades com resolução nanométrica. O sistema de acionamento e posicionamento desenvolvido é de fácil construção, envolvendo poucos conhecimentos de mecânica, eletrônica e computação, servindo de tema didático na graduação em mecatrônica, ou mesmo nas escolas de ensino médio, onde os alunos, auxiliados pelo professor, poderiam montar seus próprios microscópios de tunelamento, que estimulariam o interesse dos estudantes por essa nova área do conhecimento, a nanotecnologia.*

Palavras-chave: *nanotecnologia; STM didático; atuadores piezelétricos; nanoposicionamento.*

1. INTRODUÇÃO

O estudo dos materiais em escala atômica sempre foi um desafio a ser vencido pelos pesquisadores. Fazer análises e compreender em escalas de até bilionésimo de metro proporcionaria um melhor aproveitamento e até possíveis mudanças controladas do ambiente em que vivemos.

O desenvolvimento da micro e nanotecnologia sofreu uma forte impulsão com a invenção dos microscópios de varredura por ponta de prova ou **SPM** (*Scanning Probe Microscope*), originários do microscópio de tunelamento atômico, também denominado **STM** (*Scanning Tunneling Microscope*). O STM foi construído pela primeira vez em

1986, pela IBM, liderados por Gerd Binnig e Heinrich Rohrer; e graças à invenção deste microscópio passou a ser possível não só ver, mas também medir e manipular átomos ou moléculas individualmente. Dentre os vários equipamentos SPMs originários do STM, os mais conhecidos são: microscópio de força atômica (AFM), microscópio de força magnética (MFM) e o microscópio de força eletrostática (EFM).

Numa grande maioria desses equipamentos, um fator limitante é a máxima área possível para se fazer a varredura, que é determinada pelo sistema de acionamento e posicionamento da sonda, normalmente através uma cerâmica piezolétrica. Uma maior área de varredura permitiria análises de partes importantes dos materiais, como por exemplo as regiões de transição de contorno de grãos em materiais compósitos ou policristalinos. Outro exemplo de utilidade seria a possibilidade de analisar e entender melhor como ocorrem as micro-trincas e sua propagação nos materiais, responsáveis pelas falhas catastróficas.

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um novo sistema de varredura que permite longo alcance de varredura para os STMs, destacando o caráter didático e multidisciplinar desses equipamentos extremamente precisos e que podem ser construídos com baixo custo.

Para que um aluno de graduação possa confeccionar um equipamento desse tipo, ele terá que aplicar conhecimentos de mecanismos simples, processos básicos de usinagem, elaboração de circuitos elétricos amplificadores, conhecer formas de interfaceamento de sensores e atuadores com um microcomputador, elaboração de programação de controle e coleta de dados; conhecimentos esses essenciais a todo engenheiro mecatrônico. A calibração e análise de desempenho do novo sistema de varredura realizado neste trabalho, envolvem também a aplicação de conhecimentos de geometria óptica e funcionamento de capacitores, que irão consolidar esses conceitos básicos de física.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1 Microscópio de tunelamento (STM)

O microscópio de tunelamento recebe esse nome devido à corrente elétrica (chamada de corrente de tunelamento) gerada por um potencial elétrico entre a ponta de prova do microscópio, doravante denominado de sonda, e a amostra a ser observada. Essa corrente, muito pequena, é da ordem de 0,01 a 50 nA e se estabelece sem que haja contato físico entre os materiais, cuja corrente de tunelamento varia exponencialmente com a distância entre a sonda e a superfície da amostra.

Elaborando um sistema de realimentação que controla o deslocamento no eixo Z da sonda de tal forma a manter fixa a corrente de tunelamento, durante uma varredura o “sobe” e “desce” da sonda gera uma topografia da superfície da amostra de resolução compatível com as dimensões da sonda. Assim, se a ponta da sonda tiver dimensões atômicas obtém-se o perfil topográfico dos átomos da superfície da amostra.

Portanto, o STM é um instrumento composto basicamente de uma sonda sensora, cerâmicas piezolétricas para posicionar o objeto amostra e fazer varreduras, circuitos de realimentação para controlar a posição espacial da sonda e um sistema para armazenar dados e os converter em imagens. O controle da varredura, o armazenamento dos dados topográficos e a conversão em imagens podem ser feitos por um microcomputador através de um programa específico para esse fim. Um esquema mostrando o funcionamento desse sistema é ilustrado na Figura 1.

As bases e partes mecânicas deste equipamento podem ser facilmente fabricadas a partir de chapas metálicas, utilizando-se os maquinários comuns de uma oficina didática para curso de engenharia mecânica.

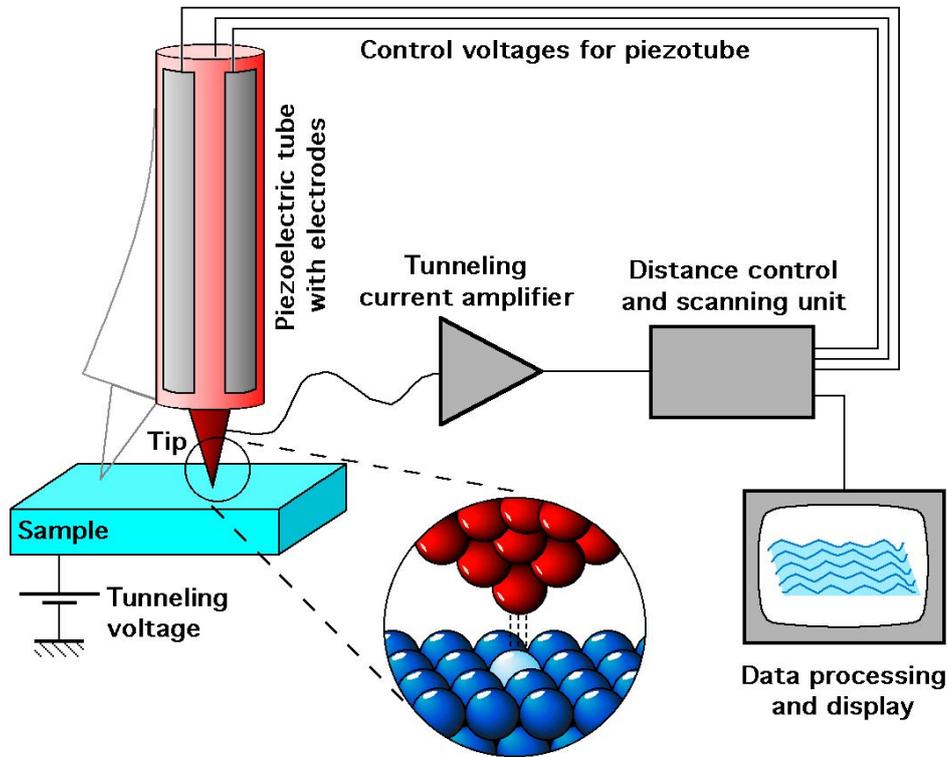


Figura 1 - Esquema de funcionamento do STM.

A configuração típica de um STM possui um sistema de movimentação da sonda formado por três eixos (x,y,z) unidos em um ponto comum. Cada eixo possui uma cerâmica piezelétrica associada, que se estende ou retrai deslocando a sonda, como no mecanismo ilustrado na figura 2 abaixo.



Figura 2 – Estrutura do STM com 3 cerâmicas piezelétricas do tipo Stack instaladas.

2.2 Materiais piezelétricos

Conforme os livros de JAFFE, B., COOK, W. R. *et al.* (1971) e de NYE, J. F. (1957), materiais piezelétricos têm a propriedade de se deformar mecanicamente quando submetidos à tensão elétrica (ddp), da mesma forma que geram uma tensão elétrica quando uma deformação mecânica é imposta a ele.

O material piezelétrico pode ser natural (cristal de quartzo) ou artificial (cerâmicas piezelétricas). A polarização forçada de uma cerâmica é feita a altas temperaturas, induzindo-se uma tensão elétrica sobre a mesma, como mostrado na figura acima. É preciso evitar que as cerâmicas piezelétricas atinjam determinado limite de temperatura (temperatura de Curie), pois acima dessa temperatura o material perde sua polarização, deixando assim, de apresentar características piezelétricas, conforme é explicado nos livros de IKEDA, T. (1990) e de CADY, W. G. (1946).

O material piezelétrico apresenta entre outras características: alta rigidez, elevada força, grande histerese, pequena deformação, alta resolução.

Devido ao fato de apresentar pequena deformação, muitas vezes limitada pela máxima tensão elétrica permitida, sistemas de amplificação mecânica são utilizados com a finalidade de aumentar o comprimento de alcance de atuadores piezelétricos, como é mostrado no esquema a seguir, conforme o trabalho de CARBONARI, R. C. (2003).

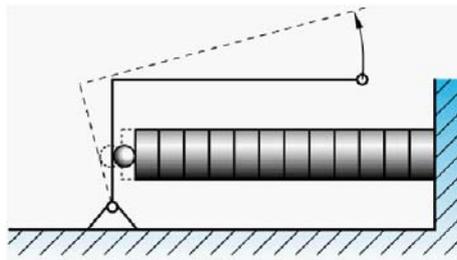


Figura 3 - Sistema de amplificação mecânica da deformação de uma cerâmica piezelétrica do tipo Stack.

O piezelétrico pode atuar como um sensor ou como um atuador. A aplicação dos materiais piezelétricos em sistemas mecânicos de precisão, ou em outros projetos é muito intensa e muito diversa. Dentre as aplicações existentes, os materiais piezelétricos podem ser encontrados em aparelhos de ultra-som, leitor/gravador de CD e DVD, posicionamento do jato de tinta de impressora e equipamentos de geração de onda sonora audível (tweeter). Neste trabalho adaptamos um monomorfo utilizado em tweeter para controlar a movimentação da sonda.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação e estudo da pesquisa feita sobre as possíveis configurações de sistemas de movimentação de longo alcance para SPMs permitiram a definição de uma nova solução, de custo reduzido, que otimiza o acionamento de longo alcance de um STM.

3.1 Varredura de longo alcance

Para aumentar o alcance de varredura da sonda, foi confeccionado uma tira monomorfo piezelétrico a partir de um disco monomorfo de tweeter. Nesta aplicação, uma placa piezelétrica de diâmetro D_1 é acoplada a uma placa metálica de diâmetro D_2 , conhecida como placa de suporte, sendo $D_1 < D_2$. Quando este monomorfo, nome dado a

este conjunto, é sujeito a aplicação de uma diferença de potencial, o disco piezelétrico se expande. A expansão tende a ser radial e uniforme. Porém a placa de suporte não tem a mesma propriedade e assim não se expande, “segurando” a parte central da placa piezelétrica. Este fenômeno faz com que o monomorfo se deforme ficando côncavo ou convexo, dependendo do potencial aplicado. Este fenômeno produz as ondas de pressão e, conseqüentemente, o som desejado.

Cortando um monomorfo de tweeter com diâmetro da cerâmica piezelétrica de 25 mm e diâmetro do disco metálico de 30 mm em forma de uma tira (ver figura 4), formamos uma tira monomórfica semelhante a uma tira bimetalica. Fixando-se uma das extremidades e aplicando-se uma tensão elétrica na cerâmica, a extremidade livre da tira se curva sofrendo um deslocamento da ordem de micra, suficiente para a sonda (ponta de prova do microscópio) fazer uma varredura de longo alcance.



Figura 4 - Tweeter e tira de monomorfo.

3.2 Calibração da tira de monomorfo

Para calibrar o deslocamento da extremidade livre da tira de monomorfo em função da tensão elétrica aplicada, foi montado um sistema simples de arranjo óptico baseado na reflexão de um feixe laser em um anteparo (semelhante ao sistema $\theta/2\theta$ de um difratograma de raios-X) como mostrado no esquema da figura 5.

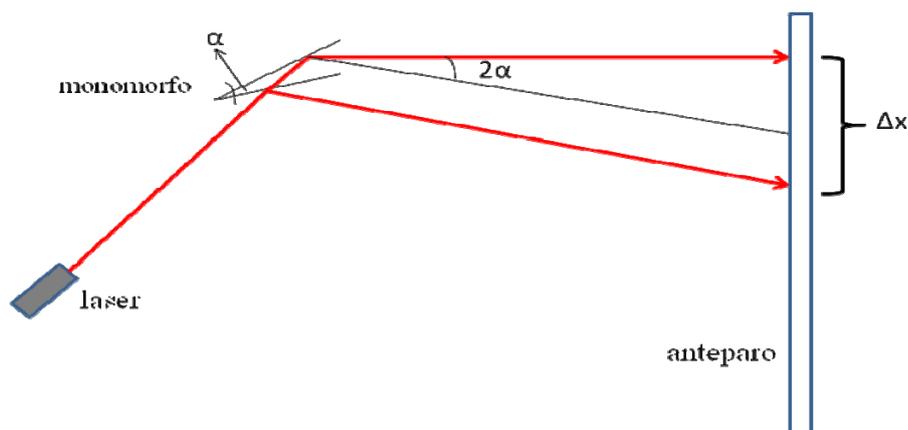


Figura 5 - Esquema óptico para calibração da tira monomorfo.

O esquema mostra o laser utilizado como fonte de um feixe de luz que reflete em um espelho localizado no monomorfo e segue até uma escala localizada em um

anteparo. O Monomorfo foi preso em uma de suas extremidades e através de uma aplicação de uma diferença de potencial, este se deforma de ângulo α .

Ao traçar uma paralela do feixe de luz refletido com o monomorfo em repouso, um novo triângulo retângulo é obtido tendo um de seus ângulos igual a 2α . Este valor de ângulo foi determinado através de geometria e conhecimentos de raio de incidência e reflexão de luz.

No triângulo retângulo ABC em destaque na Figura 6, o lado BC é o deslocamento vertical a ser determinado. Como a tira apresenta uma deformação somente na região onde se localiza a cerâmica, o valor mais adequado para a medida AC do triângulo é a distância entre o centro da cerâmica e o centro do espelho.

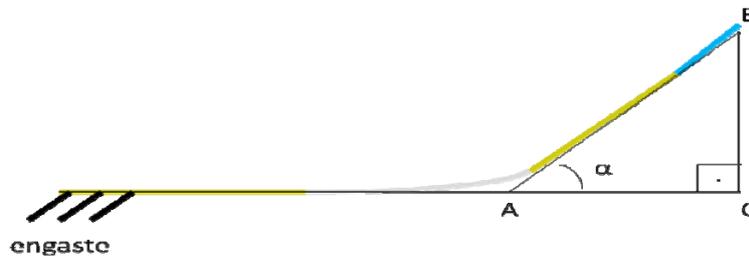


Figura 6 - Representação da deformação da tira monomorfo.

A figura acima está com proporções exageradas para que seja possível uma melhor observação do fenômeno, porém o ângulo α é muito menor que o representado, de modo que $\text{tg}(\alpha)$ seja aproximadamente igual a $\text{sen}(\alpha)$. Assim, por semelhanças de triângulos e com o deslocamento Δx medido na escala para a aplicação de diferentes voltagens, além de saber a distância entre a extremidade livre do monomorfo ao anteparo, foi possível calibrar o deslocamento da extremidade livre do monomorfo em função da tensão aplicada.

Esta calibração foi checada pela medição do deslocamento da extremidade livre com o sensor capacitivo obtendo-se os mesmos resultados pelos dois métodos: o novo mecanismo de deslocamento baseado na tira monomorfo produz um deslocamento 150 vezes maior em relação à cerâmica Stack originalmente instalado.

3.3 Projeto do novo sistema de posicionamento da ponta de prova

Na utilização do monomorfo, foi idealizado o mecanismo representado na figura 7 para o novo sistema de movimentação da sonda. Nessa concepção, o monomorfo encontra-se entre duas cerâmicas piezelétricas do tipo Stack responsáveis pelos deslocamentos nos eixos “x” e “z”, enquanto o monomorfo realiza a varredura no eixo “y”.

Uma vantagem dessa estrutura é a sonda estar conectada diretamente ao eixo “z”, pois, dessa forma as variações de topografia do material amostrado causam uma resposta mais “rápida” (sistema rígido) da cerâmica deste eixo melhorando a qualidade da medição.

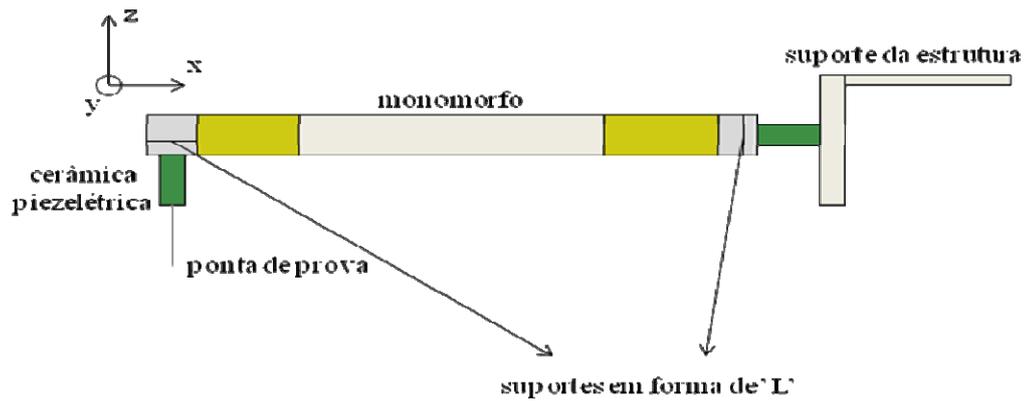


Figura 7 - Projeto do novo sistema de posicionamento.

3.3 Características do novo sistema

Após a fabricação do novo mecanismo de posicionamento da ponta de prova, foi feita a instalação do mesmo no STM, substituindo o sistema antigo.

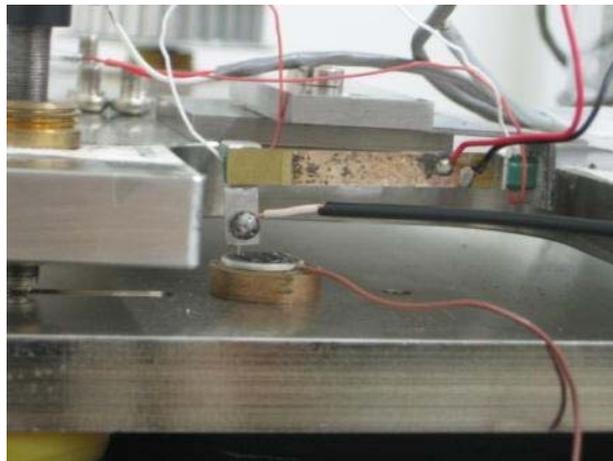


Figura 8 - Novo mecanismo instalado no STM.

O microscópio STM em estudo foi projetado para utilizar cerâmicas iguais em todos os eixos de varredura. Além disso, o software utilizado para aquisição e manipulação do microscópio foi feito de tal forma a permitir apenas varreduras de área quadrada. Por este motivo, as diferenças de potencial aplicada nos atuadores do plano da amostra são iguais. Sendo assim, após a instalação do novo sistema de posicionamento, os lados do retângulo a ser varrido pelo microscópio seguem a relação dos gráficos de deformação da cerâmica (gráfico 1) e do monomorfo (gráfico 2).

Por exemplo, se for escolhida no software uma área de varredura de $1\text{nm} \times 1\text{nm}$, a tira de monomorfo irá provocar uma deformação de 150 nanômetros. Assim, a área final da amostra a ser analisada pelo microscópio é de $1 \times 150 \text{ nm}^2$. A figura 9 ilustra a mudança ocorrida na varredura do STM.

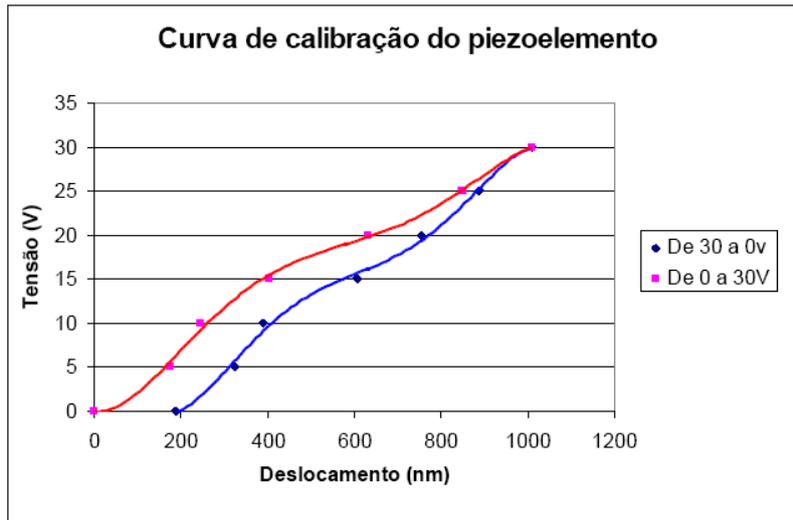


Gráfico 1 - Comportamento da cerâmica piezolétrica Stack submetida à tensão elétrica, obtido por Nakagawa, C. A e Santos, G. V. A. (2005).

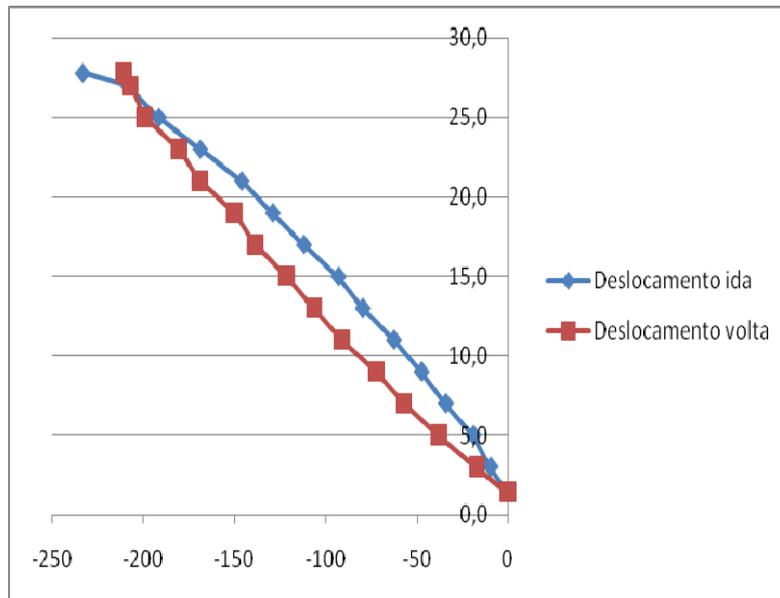


Gráfico 2 - Deslocamento do monomorfo para diferenças de potencial negativas.

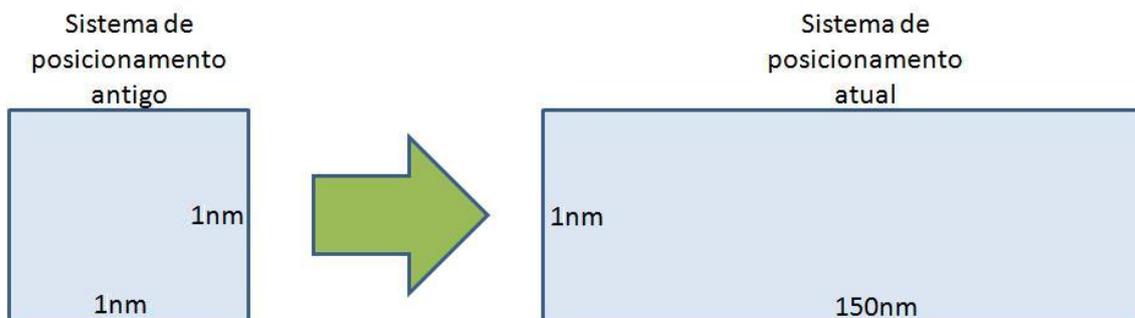


Figura 9 - Área real de varredura produzida pelo novo sistema de posicionamento.

3.4 Aquisição dos dados

O microscópio de tunelamento eletrônico sobre o qual foi feito este trabalho possui um software que permite a visualização de imagens em duas dimensões. Foi implementado nesse software um comando para permitir a exportação dos dados no formato ASCII, possibilitando a visualização dos dados em outros programas gráficos.

3.5 Micro Rugosidade Linear

Essa adaptação feita no microscópio STM localizado no departamento da engenharia mecatrônica da Poli-Usp poderá trazer muitos benefícios, permitindo uma grande variedade de estudos de materiais, tais como checar micro trincas, estudar contornos de grão de materiais, analisar a transição de um material composto por duas ou mais substâncias diferentes, entre outros. Neste primeiro momento iremos demonstrar a análise de rugosidade em escala nanométrica presente na amostra.

Através dos dados obtidos provenientes do arquivo exportado foi calculada a rugosidade média de cada linha de uma região amostrada. A atribuição de valores de rugosidade ao longo de todo o percurso realizado pela varredura do monomorfo possibilitou a construção do gráfico da Micro Rugosidade Linear da região amostrada.

Segue um breve exemplo da aplicação realizada.

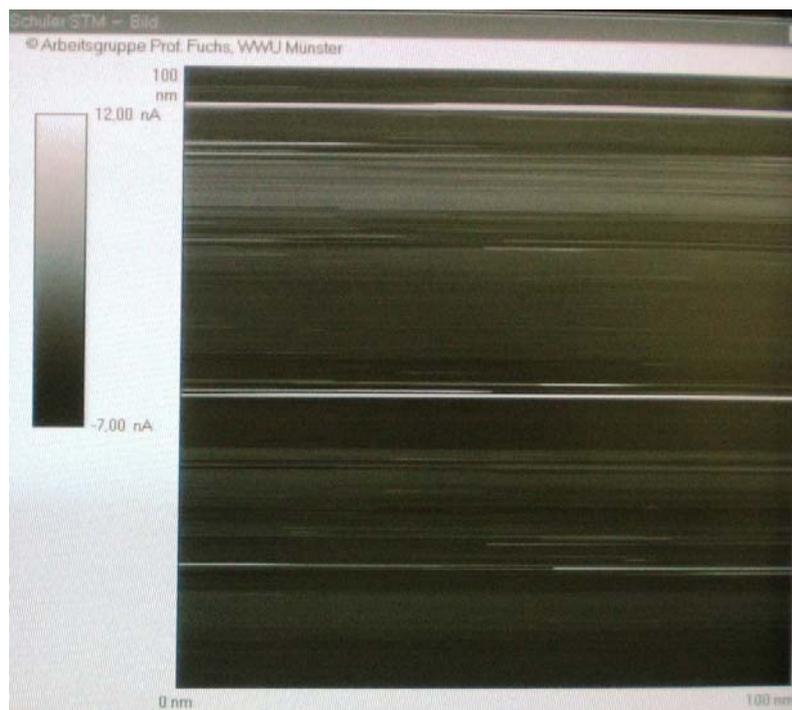


Figura 10 - Imagem gerada pelo software da varredura de uma área quadrada (100x100nm) de material grafite.

A partir dos dados presentes no arquivo exportado dessa varredura foram obtidos valores de rugosidade média para cada linha horizontal varrida. A micro rugosidade linear, de resolução nanométrica, correspondente à amostra da figura 10 e encontra-se plotado na figura 11 a seguir.

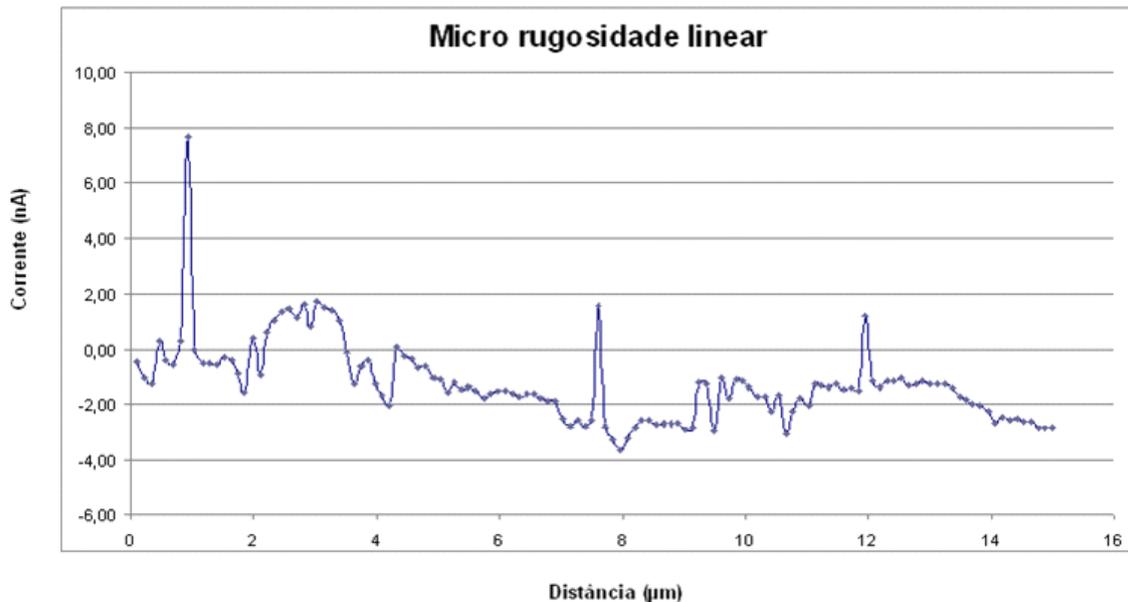


Figura 11 - Micro Rugosidade linear de amostra de grafite

Na tecnologia das multicamadas que é aplicada em várias áreas como a óptica, fabricação de sensores magnéticos, dispositivos de leitura e armazenamento de dados, saber como é a rugosidade em escala nanométrica do material é muito importante.

Na área química e biológica este tipo de análise também é muito importante para diversos estudos: a reação de substâncias químicas é diretamente influenciada pela rugosidade do material; a interação da luz com os materiais também muda de acordo com esta propriedade. Enfim, uma ferramenta que possibilita um estudo sobre a rugosidade em escala nanométrica pode ser muito poderosa e têm diversas utilidades.

A implementação do sistema de varredura de longo alcance da sonda foi bem sucedida, mesmo fazendo-se uso de um disco monomorfo piezelétrico comum de tweeter, barateando ainda mais o stm.

Como o controle de movimentação da sonda se restringe a uma superfície topográfica montada linha a linha, a confecção de um programa de controle também é bastante simples, onde um aluno de graduação em mecânica poderia elaborar com facilidade o interfaceamento do stm com um microcomputador.

4. CONCLUSÃO

Pode-se concluir com o projeto que a ampliação do alcance de varredura de um STM (microscópio de alta tecnologia e precisão nanométrica) foi bem sucedida, mesmo empregando-se uma solução de baixo custo. Os resultados obtidos foram de acordo com as metas previstas e são de grande valor no meio científico e acadêmico. O aprofundamento dos estudos em pesquisas que analisam materiais em escala nanométricas ou micrométricas vêm trazendo avanços inestimáveis e podem trazer benefícios ainda maiores.

O projeto demonstrou as características multidisciplinares de um STM, que além do caráter didático na sua confecção/desenvolvimento, proporcionou um grande incentivo ao conhecimento de assuntos básicos aplicados em engenharia.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Pró-Reitoria de Pesquisa e a Associação dos Ex-Politécnicos pelas Bolsas de Iniciação Científica que tornaram possível a realização deste trabalho.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CADY, W. G. **Piezoelectricity**. N.York and London: McGraw-Hill Book Company, 1946.

CARBONARI, R. C. **Projeto de atuadores piezelétricos flexensionais usando o método de otimização topológica**. 2003, Tese (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

IKEDA, T. **Fundamentals of Piezoelectricity**. Oxford, N. York and Tokio: Oxford University Press, 1990.

JAFFE, B., COOK, W. R. and JAFFE, H. **Piezoelectric Ceramics**. London and N. York: Academic Press, 1971.

NAKAGAWA, C. A., SANTOS, G. V. A. **Obtenção de imagens 3D de um microscópio de tunelamento eletrônico**. 2005. Trabalho de conclusão de curso - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

NYE, J. F. **Physical Properties of Crystals**. Oxford: Clarendon Press, 1957.

Didactic and Cheap Scanning Tunneling Microscope

Abstract. Scanning Tunneling Microscopy is an instrument that can display the atomic scale topology of conductor surface materials by using the interaction of the tunneling electric current between the probe and the sample. The limitation that we find in this kind of equipment is the maximum area that can be scanned, whose dimension is determined by the positioning system of the probe, usually composed by piezoelectric ceramics. The piezoelectric ceramics have a low relation tension Vs deformation, and because of that large ceramics are necessary (up to 10 centimeters) to get large scanning area of several tenths of micron.

The possibility of analyze large areas with the atomic resolution would be very important to study properties of the materials and to develop new materials with new properties. To understand the relation between the nanostructures to microstructures and macro properties of any material are very important.

In the present work, a cheap positioning system was developed to perform long scanning area. Analysis such as micro-roughness with nanometer resolution was attained with this system. A lot of others SPMs equipments may be equipped with this system, mainly in cheap equipment from any research laboratory.

The developed positioning drive system is of easy construction, involving few knowledge of mechanics, electronics and computation, that may be used as didactic subject in the mechatronic graduation curse or in high schools education, where the pupils, assisted

by the professor, could mount its proper tunneling microscopes, stimulating the students go into this new area of the knowledge, the nanotechnology world.

Keywords. *Nanotechnology; Piezoelectric actuators; Nanopositioning.*