

**BRUNO BARAZANI
BRUNO BUTILHÃO CHAVES**

Atuadores Piezo-elétricos para Nanoposicionamento

**São Paulo
2007**

Bruno Barazani
Bruno Butilhão Chaves

Atuadores Piezo-elétricos para Nanoposicionamento

TRABALHO DE FORMATURA
APRESENTADO À ESCOLA
POLITÉCNICA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE ENGENHEIRO

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
ENGENHARIA MECATRÔNICA

ORIENTADOR: PROF. DR.
DELSÓN TORIKAI

EPUSP-PMR
2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Barazani, Bruno

Atuadores piezo-elétricos para nanoposicionamento / B. Barazani, B.B. Chaves. -- São Paulo, 2007.
56 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Nanoposicionadores 2.Microscópio STM 3.Cerâmica piezo-elétrica I.Chaves, Bruno Butilhão II.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III.t.

Agradecimentos

Agradecemos ao nosso orientador, Prof. Dr. Delson Torikai, pela notável dedicação e comprometimento na realização deste trabalho, por ter nos conduzido, com clareza, pelos rumos do projeto, e por inspirar grande confiança e motivação em seus alunos.

Agradecemos à AEP-Associação dos Engenheiros Politécnicos (Bruno Butilhão Chaves) e à Pró-Reitoria de Pesquisa da USP (Bruno Barazani) pelas bolsas-auxílio cedidas durante a realização do trabalho.

Agradecemos às nossas famílias e amigos que sempre nos apoiaram e a todos que, de maneira direta ou indireta, colaboraram na execução deste trabalho.

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. Um fator limitante na maioria desses instrumentos é a máxima área possível para se fazer a varredura, que é determinada pelo sistema de açãoamento e posicionamento da sonda, normalmente através de uma cerâmica piezelétrica. Como as cerâmicas piezelétricas possuem baixa relação tensão V_s deformação, seriam necessárias pastilhas de grandes dimensões (vários centímetros) para uma varredura da ordem de dezena a centena de micra.

Analizar uma grande área 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.

No presente trabalho foi desenvolvido um sistemas de açãoamento e posicionamento da ponta de prova de um STM, de baixo custo, com um alcance (em pelo menos uma direção) da ordem de centena de micra, permitindo, por exemplo a análise de micro-rugosidade com resolução nanométrica. O sistema desenvolvido poderá equipar também vários outros equipamentos SPMs, principalmente em equipamentos de baixo custo, assimilável por qualquer laboratório de desenvolvimento.

Palavras-chave: nanopositionadores; microscópio STM; cerâmica piezoelétrica.

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.

Key words: nanopositioners; STM microscopy; piezoelectric ceramic.

Conteúdo

Lista de Figuras	8
Lista de Tabelas	9
Lista de Gráficos.....	10
Lista de Abreviaturas.....	11
1. Introdução	12
2. Justificativa.....	13
3. Estudos preliminares	13
3.1 Microscópio de tunelamento (STM)	14
3.1.1 O SPM a ser estudado.....	16
3.2 Estudo das propriedades dos materiais piezoeletricos.....	16
3.2.1 Propriedades dos materiais piezoeletricos	17
4. Alternativas de projeto.....	19
4.1 Primeira possível solução	19
4.2 Segunda possível solução	23
4.2.1 Método de medição de deslocamento por laser:.....	26
4.2.2 Apresentação dos resultados da medição	28
4.2.3 Medidor Capacitivo	31
4.2.4 Medições do conjunto de stacks com o sensor capacitivo	32
4.2.5 Calibração do monomorfo	35
5. Discussão dos Resultados.....	37
6. Projeto do novo sistema de posicionamento da ponta de prova	38
6.1 Montagem do novo sistema de posicionamento da ponta de prova	40
7. Interferência eletromagnética no circuito	41
8. Instalação do novo sistema de posicionamento no STM.....	42
9. Determinação da área da amostra a ser varrida	43
10. Aquisição dos dados	44
11. Utilidade do novo sistema de posicionamento	44
12. Resultados.....	45
12.1 Varredura 1	45
12.2 Varredura 2	48
12.3 Varredura 3	50
13. Considerações Finais	51
14. Bibliografia.....	54

Lista de Figuras

Figura 1 – Corrente de tunelamento entre ponta de prova e amostra	14
Figura 2 – Esquema do funcionamento de um microscópio tipo STM	15
Figura 3 – Microscópio STM em estudo	16
Figura 4 – Estrutura do STM com os piezos instalados	16
Figura 5 – Cristal de quartzo (comprimindo, relaxado, alongando)	17
Figura 6 – Processo de polarização de uma cerâmica piezelétrica	18
Figura 7 – Sistema de amplificação mecânica da deformação de uma cerâmica piezelétrica do tipo stack	18
Figura 8 – Representação de cerâmica do tipo stack	20
Figura 9 – Cerâmicas stack acopladas	20
Figura 10 – Frasco contendo partículas sólidas de Salol	21
Figura 11 – Interferômetro	22
Figura 12 – Esquema de monomorfo	23
Figura 13 – Serra de discos diamantados utilizada no corte do monomorfo	25
Figura 14 – Tira de monomorfo	26
Figura 15 – Esquema do Experimento	27
Figura 16 – Esquema do Monomorfo livre de diferenças de potencial	27
Figura 17 – Esquema do Monomorfo deformado	28
Figura 18 – Sistema de medição a laser montado	28
Figura 19 – Desenho esquemático do sensor capacitivo, capaz de medir “h” em nanômetros	32
Figura 20 – Sensor capacitivo	32
Figura 21 – Calibração do conjunto de cerâmicas com o sensor capacitivo	33
Figura 22 – Sistema utilizado na calibração	34
Figura 23 – Calibração do monomorfo	36
Figura 24 – Calibração do monomorfo	36
Figura 25 – Primeiro projeto do novo sistema de posicionamento	38
Figura 26 – Vista aérea do primeiro projeto	38
Figura 27 – Segundo projeto do novo sistema de posicionamento	39
Figura 28 – Suporte para o novo Sistema de posicionamento	40
Figura 29 – Peça inicial do Suporte	41
Figura 30 – Suporte já usinado	41
Figura 31 – Monomorfo com as junções para receber as cerâmicas stack	41
Figura 32 – Novo sistema de posicionamento totalmente acoplado	41
Figura 33 – Novo sistema de posicionamento instalado no STM	42
Figura 34 – Esquema do funcionamento do STM	43
Figura 35 – Área varrida pelo STM antes e depois da modificação do sistema de posicionamento	44
Figura 36 – Imagem gerada pelo software da uma varredura de uma área quadrada (100x100nm)	46
Figura 37 – Imagem gerada pelo software da uma varredura de uma área quadrada (2x2nm)	48
Figura 38 – Imagem gerada pelo software da uma varredura de uma área quadrada (2x2nm)	50
Figura 39 – Área de varredura antes da modificação	52
Figura 40 – Área de varredura depois da modifica	52

Lista de Tabelas

Tabela I – Propriedades do material PZT	24
Tabela II – Ângulo α em relação ao deslocamento apresentado	31

Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Comportamento do piezelétrico submetido à tensão elétrica	22
Gráfico 2 – Deslocamento do Monomorfo para Diferenças de potencial positivas	29
Gráfico 3 – Deslocamento do Monomorfo para diferenças de potencial negativas	29
Gráfico 4 – Deslocamento do monomorfo para diferenças de potencial positivas	30
Gráfico 5 – Deslocamento do monomorfo para diferenças de potencial negativas	30
Gráfico 6 – Comportamento do piezelétrico submetido à tensão elétrica	34
Gráfico 7 – Comportamento do piezelétrico submetido à tensão elétrica	35
Gráfico 8 – Comportamento do monomorfo submetido à tensão elétrica	36
Gráfico 9 – Análise do comportamento do monomorfo com o sensor capacitivo	37
Gráfico 10 – Micro rugosidade linear de amostra de grafite	47
Gráfico 11 – Micro rugosidade linear de amostra de grafite	49
Gráfico 12 – Micro rugosidade linear de amostra de grafite	51

Lista de Abreviaturas

SPM	“ <i>Scanning Probe Microscope</i> ”
STM	“ <i>Scanning Tunneling Microscope</i> ”
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo
IEM	Interferência eletromagnética

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 milionésimo 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).

O funcionamento do microscópio de tunelamento atômico utiliza uma ponta metálica de dimensões quase atômicas que é varrida muito próxima da superfície da amostra para fazer tunelamento entre ela e a amostra, ou seja, proporcionar a medição de corrente que passa entre a amostra e a sonda. O STM é um instrumento composto basicamente de uma sonda sensora, cerâmicas piezelétricas para posicionar o objeto amostra e fazer varreduras, circuitos de realimentação para controlar a posição espacial da sonda e um computador para mover as sondas de varredura, armazenar dados e os converter em imagens por meio de *softwares* específicos para esse fim.

Um fator limitante desses estudos 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 piezelétrica. Uma maior área de varredura permitiria análises de partes importantes dos materiais, como as regiões de transição de contorno de grãos em materiais compósitos ou policristalinos. Um outro exemplo de utilidade seria a possibilidade de analisar e entender melhor como ocorrem as microtrincas nos materiais, já que estas são as regiões mais frágeis do mesmo. Enfim, auxiliaria no desenvolvimento de novos materiais, uma vez que as relações micro e nano estruturas afetam diretamente as propriedades dos materiais.

Portanto, a proposta deste projeto de conclusão de curso, é desenvolver um novo sistema de varredura que permita longo alcance para o STM didático de baixo custo

construído nesta faculdade. O objetivo final é atingir uma extensão de varredura, em pelo menos uma direção, de dezenas a centenas de micra em uma direção, podendo manter a varredura noutra direção perpendicular à primeira (menor que 400nm), varrendo assim uma faixa estreita, porém comprida do material.

2. Justificativa

Os avanços conseguidos através do estudo das relações microestruturais com as propriedades macro dos materiais são inestimáveis. Possibilitar estudos mais precisos e específicos através da análise de regiões cruciais dos materiais em escala atômica permitirá o desenvolvimento de novos materiais e produtos com propriedades aprimoradas ou específicas para uma dada finalidade. Resistência mecânica, tenacidade, ductilidade, fragilidade, condutividade elétrica e térmica, são alguns exemplos de propriedades que poderiam ser estudadas a nível nanométrico.

A utilização de um novo sistema de varredura de menor custo do que o atualmente utilizado e com maior alcance de varredura, agregaria muito valor ao STM presente na Poli-USP; benefícios não só para o meio acadêmico mas também para o setor industrial em um futuro próximo.

3. Estudos preliminares

A primeira etapa deste projeto focou-se principalmente no aprofundamento do conhecimento dos integrantes do grupo de pesquisa sobre os temas a serem abordados no trabalho. Assim, obtendo mais informações e solidificando o conhecimento sobre os tópicos estudados (cerâmicas piezelétricas, por exemplo) foi possível esclarecer certas dúvidas e decidir sobre quais direções seguir na próxima etapa. Para isso foi realizada uma revisão bibliográfica de qualidade sobre os temas relacionados ao projeto e depois foram feitas algumas inferências sobre como atingir os objetivos do trabalho.

3.1 Microscópio de tunelamento (STM)

O microscópio de tunelamento recebe esse nome devido à corrente elétrica (chamada de corrente de tunelamento) gerada entre a ponta de prova do microscópio e a amostra a ser estudada. Essa corrente, muito pequena, é da ordem de 0,01 nA a 50 nA. e se estabelece sem que haja contato físico entre os materiais. Para isso, é preciso que a ponta de prova esteja muito próxima do material amostrado, alguns Å de distância. Além disso, é necessário que a extremidade da ponta de prova seja muito fina, com alguns átomos apenas. Essa extremidade fina pode ser fabricada por corte e fiação ou por desgaste eletroquímico da ponta de prova.

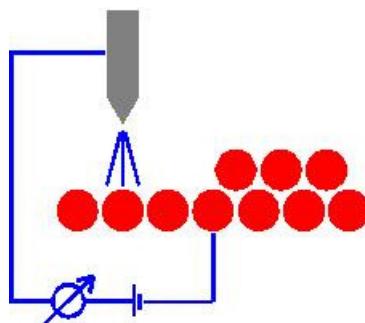


Figura 1 – Corrente de tunelamento entre ponta de prova e amostra

A figura acima ilustra o fenômeno de tunelamento quando se aplica uma diferença de potencial entre ponta de prova e amostra num microscópio de tunelamento.

O objetivo do microscópio é varrer uma amostra fornecendo o seu perfil topográfico em ordem de grandeza nanométrica. Para isso, o equipamento pode fazer uso de dois modos de operação:

- Modo de corrente constante

Um sistema de realimentação que controla o deslocamento no eixo Z da ponta de prova é responsável por manter fixa a distância entre a ponta e a superfície da amostra durante a varredura. A corrente de tunelamento varia exponencialmente com essa distância. Assim quando a corrente de altera-se devido a uma precipitação ou a uma elevação da superfície da amostra o sistema de realimentação “desce” ou “sobe” a ponta de prova de modo que a distância dela até a amostra se mantenha a mesma e consequentemente a corrente de tunelamento também não se altere. Gravando-se a

posição vertical da ponta de prova com uma determinada freqüência, obtém-se o perfil topográfico da amostra.

- Modo de altura constante

Nesse modo de operação, a ponta de prova não modifica sua altura durante o processo de varredura. A alteração da corrente de tunelamento indica diretamente a topografia da superfície analisada. Uma desvantagem desse modo de operação é a alta probabilidade da ponta de prova “esbarrar” na superfície amostrada, caso essa não seja atomicamente plana.

De um modo geral o esquema abaixo representa de forma simplificada o funcionamento de um microscópio de tunelamento.

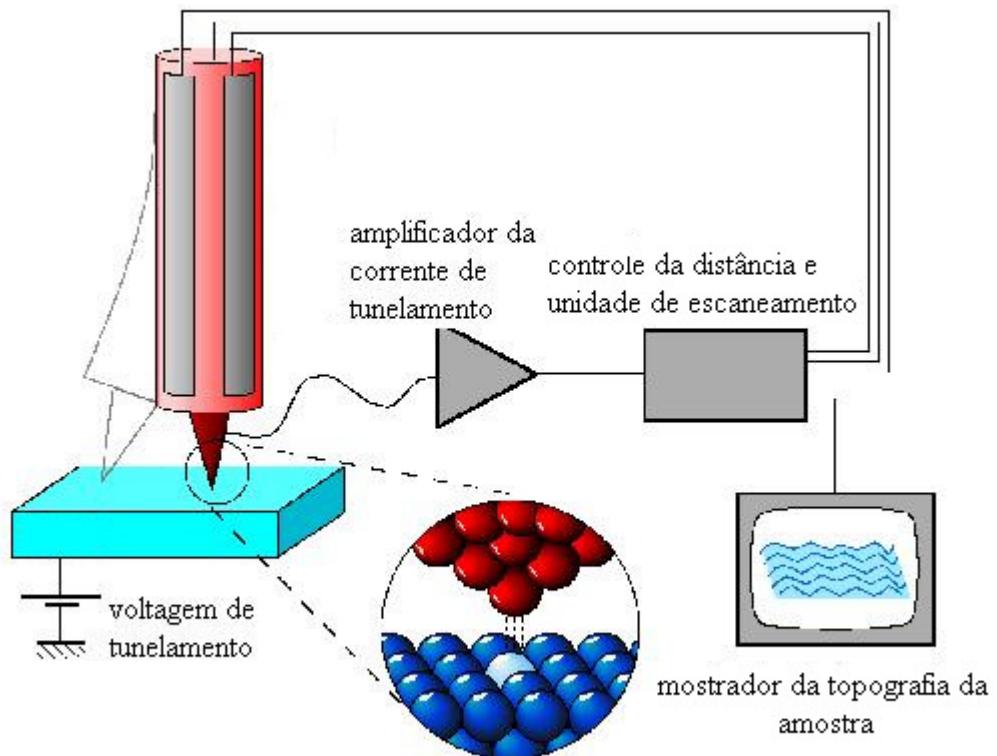


Figura 2 – Esquema do funcionamento de um microscópio tipo STM

3.1.1 O SPM a ser estudado

Para a realização do projeto que consiste em ampliar a capacidade de movimentação da ponta de prova de um SPM, é necessário um conhecimento avançado de como o sistema em questão funciona. Manuais, papers e materiais de pesquisas publicados na internet foram estudados e revisados. Foi utilizado em especial o manual específico do SPM localizado no laboratório da POLI-USP, no qual será feita a modificação do sistema de movimentação.

O STM em questão possui atualmente um sistema de movimentação da ponta de prova formado por três eixos (x,y,z) unidos em um ponto e com a ponta de prova fixada nessa interligação entre eles. Cada eixo é estendido ou retraído através da ação da cerâmica piezoelétrica responsável pela movimentação desse eixo. Cada eixo possui uma cerâmica associada. As figuras abaixo ilustram o mecanismo descrito.

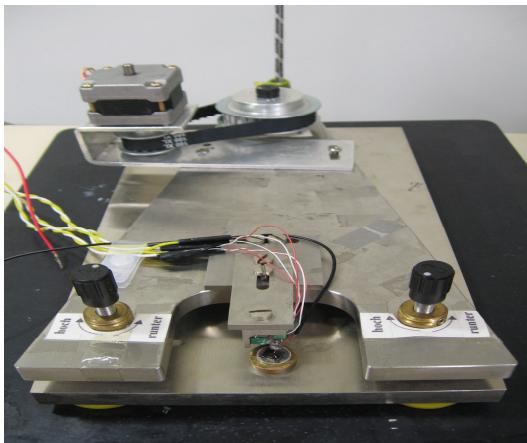


Figura 3 – Microscópio STM em estudo



Figura 4 – Estrutura do STM com os piezos instalados

3.2 Estudo das propriedades dos materiais piezoelétricos

Concomitantemente com o estudo do STM foi realizado o estudo dos materiais piezoelectricos e de suas propriedades através de livros, papers e pesquisas na internet. Esses materiais são fundamentais nesse projeto e por isso requerem um estudo contínuo e detalhado.

3.2.1 Propriedades dos materiais piezelétricos

Materiais piezelétricos têm como propriedade básica sofrerem deformação mecânica quando submetidos à tensão elétrica (ddp). Do mesmo modo, se uma deformação mecânica é imposta a esse tipo de material uma tensão elétrica (ddp) surgirá no mesmo. Se para uma determinada polarização o material se alongar, então para a polarização inversa o efeito será oposto e o material irá se comprimir.

O material piezelétrico pode ser natural (cristal de quartzo) ou artificial (cerâmicas piezelétricas).

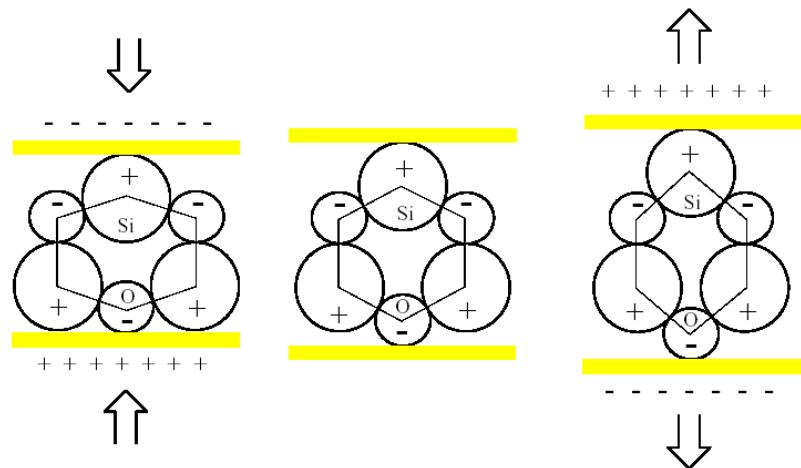


Figura 5 - Cristal de quartzo (comprimindo, relaxado, alongando)

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.

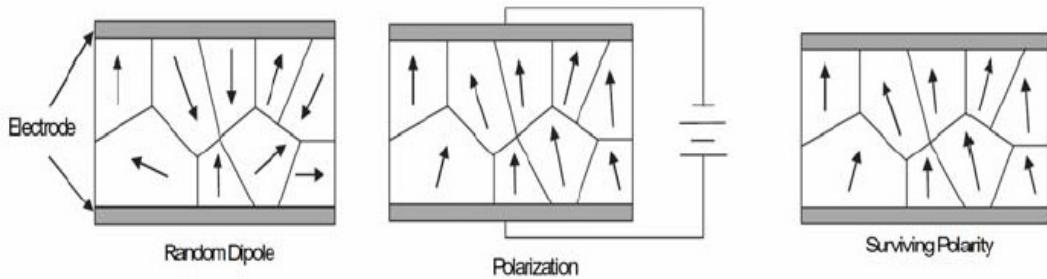


Figura 6 - Processo de polarização de uma cerâmica piezelétrica

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 pequena 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.

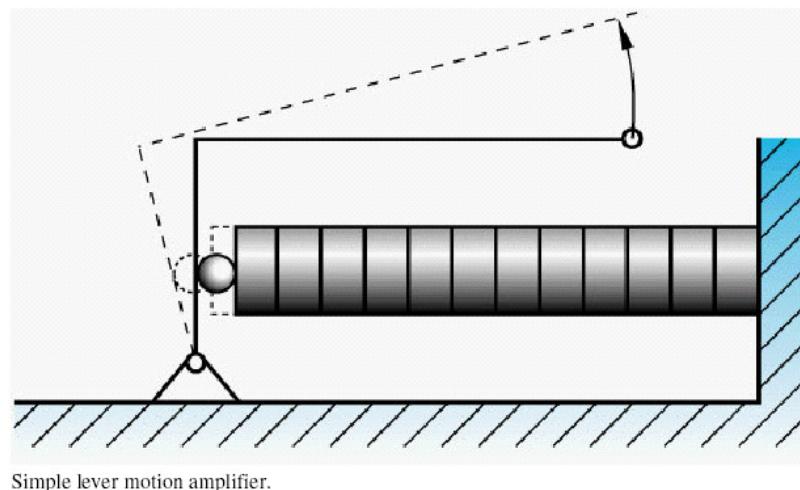


Figura 7 - Sistema de amplificação mecânica da deformação de uma cerâmica piezelétrica do tipo stack

O piezelétrico pode atuar como um transdutor (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 piezoelétricos 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), sendo este último um dispositivo em estudo nessa pesquisa. Porém este tema não será abordado aqui.

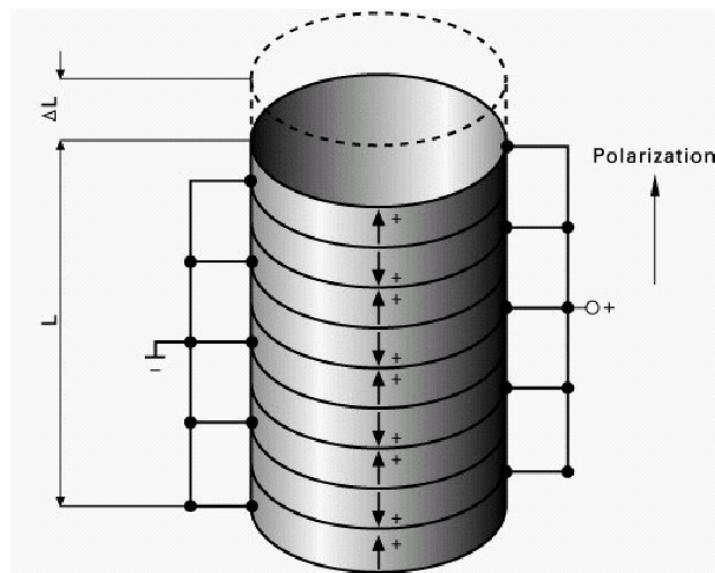
4. Alternativas de projeto

A avaliação e estudo da pesquisa feita sobre as diversas configurações já existentes de sistemas de movimentação de longo alcance para SPMs auxiliaram na definição de duas novas possibilidades de configurações de forma a otimizar o acionamento de longo alcance que seja viável para o STM de baixo custo montado na Poli-USP.

4.1 Primeira possível solução

Um tipo especial de cerâmica piezoelétrica é conhecido como “stack” (pilha de cerâmica). Esta cerâmica também tem a característica geral de gerar deslocamentos e forças em direções específicas se forem sujeitas a uma diferença de potencial. O que faz com que esta receba este nome particular é a forma como esta é montada.

Dividida em seções de mesmo tamanho, cada célula da cerâmica é sujeita a uma diferença de potencial como se fossem atuadores independentes que estivessem em forma de pilha, como o próprio nome da cerâmica sugere. A disposição das ligações elétricas para gerar as diferenças de potencial é intercalada de tal forma a formarem a polarização em um único sentido da cerâmica como um todo. Isto para que as deformações das células sejam somadas e, assim, amplificado o deslocamento em uma direção específica. Uma representação de cerâmica do tipo stack pode ser observada na Figura 1 abaixo.

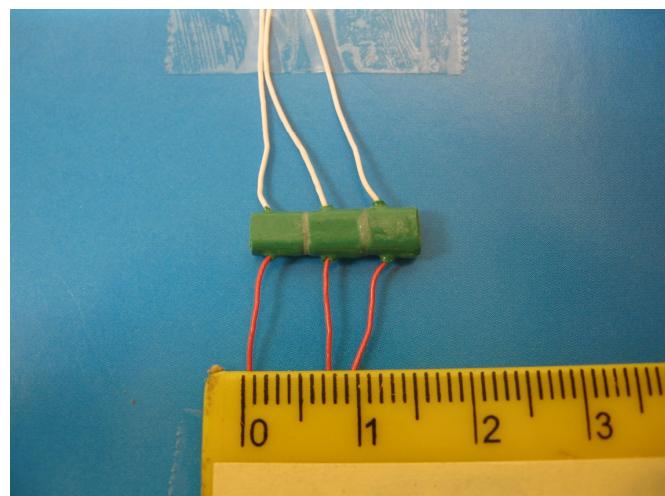


Electrical connection of disks in a PZT stack actuator.

Figura 8 – Representação de cerâmica do tipo stack

Assim, uma das configurações consideradas para amplificar a área de varredura do microscópio STM é a utilização em série de cerâmicas do tipo “stack”. Esta disposição em série seria utilizada em uma única direção para possibilitar a varredura de uma faixa de maior comprimento, como explicado anteriormente.

Utilizando-se três cerâmicas “stack” que estavam à disposição no laboratório LASER da POLI-USP, foi montada uma “pilha” justapondo-se as três cerâmicas em série.

**Figura 9 – Cerâmicas stack acopladas**

Para realizar a união dos piezelétricos fez-se uso de uma substância chamada salicilato de fenila, mais conhecida como Salol. Essa substância, classificada como um cristal, encontra-se em estado sólido a temperatura ambiente, mas se liquefaz se submetida ao calor provindo de um soldador comum. Ao entrar em contato com alguma partícula do cristal sólido a substância líquida instantaneamente se cristaliza tornando-se sólida, unindo assim as partes desejadas que no caso são as cerâmicas. A junção realizada com esse material apresenta uma baixa resistência mecânica, porém o cristal transmite com perfeição a deformação linear sofrida (muito útil em transdutores), o que não poderia ser obtido em junções mais comuns com maior resistência. No caso, os esforços aos quais será submetido o conjunto (esforços correspondentes a deslocamentos micrométricos) não serão grandes o bastante para romper a união entre os piezos.



Figura 10 - Frasco contendo partículas sólidas de Salol

No trabalho de formatura cujo título é “Obtenção de imagens 3D de um microscópio de tunelamento eletrônico”, o comportamento deste mesmo tipo de cerâmica stack foi estudado. Nesse experimento determinou-se o comportamento de uma única cerâmica através de um gráfico tensão x deformação.

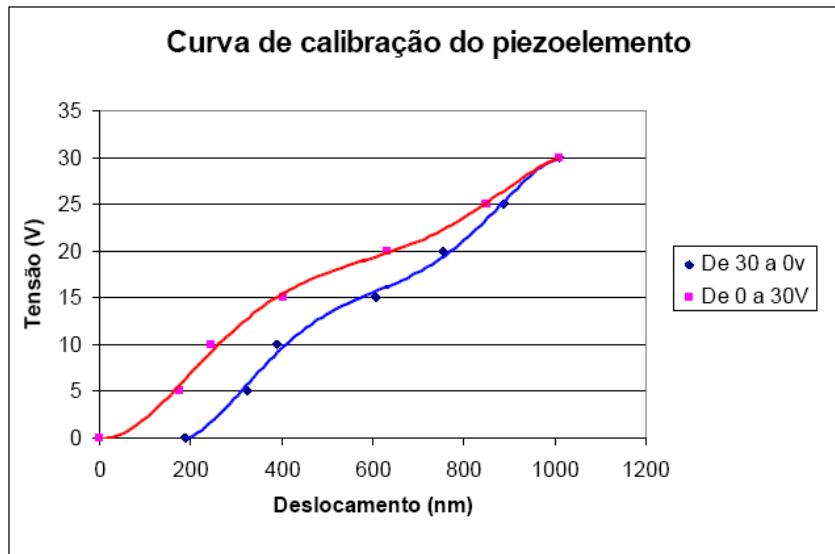


Gráfico 1 - Comportamento do piezelétrico submetido à tensão elétrica

Do gráfico observa-se que aplicando 30 V de tensão na cerâmica esta se deforma 1000 nm, ou seja, 1 μ m. No conjunto formado pelas três cerâmicas dispostas em série, porém com cada uma delas submetida à no máximo a 30 V (tensão elétrica máxima atuante no microscópio) estima-se obter um deslocamento total máximo de 3 μ m, já que os deslocamentos individuais de cada cerâmica se somariam.

Para gerar o gráfico anterior, os autores do estudo tiveram o auxilio de um interferômetro, como mostrado na Figura 11.

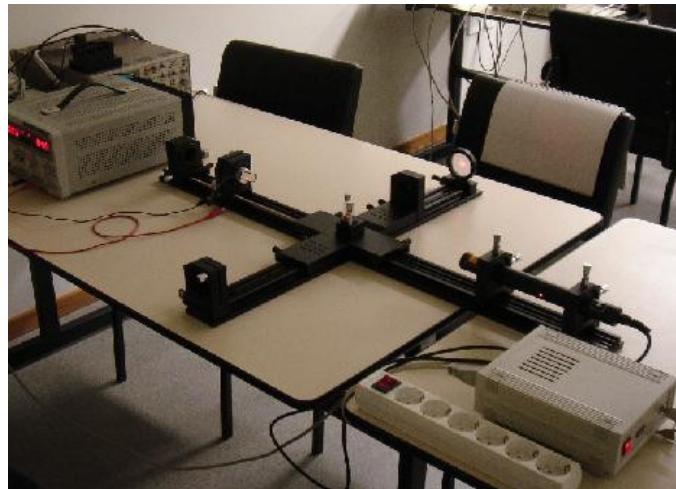


Figura 11 - Interferômetro

Porém, nesse novo estudo a medição experimental do conjunto de cerâmicas em série não pode ser realizada novamente através de interferometria, uma vez que o

equipamento não está mais a disposição da Escola. Foi então utilizado um sensor capacitivo para tal, porém o mesmo não estava calibrado corretamente para realizar a medição com a precisão desejada. Um relógio comparador está sendo utilizado como auxílio na calibração do sensor. O funcionamento do sensor capacitivo será explicado mais detalhadamente mais adiante.

4.2 Segunda possível solução

Materiais piezoelétricos também são utilizados para produzir sons em tweeter, como já mencionado anteriormente. Nesta utilização, uma placa piezoelétrica de diâmetro D1 é acoplada a uma placa metálica de diâmetro D2, conhecida como placa de suporte, sendo $D1 < D2$. Quando este monomorfo, nome dado a este conjunto, é sujeito a aplicação de uma diferença de potencial, o disco piezoelétrico 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 piezoelétrica. Este fenômeno faz com que o monomorfo se deforme de forma a ficar côncavo ou convexo, dependendo do potencial aplicado. Este fenômeno produz as ondas de pressão e, consequentemente, o som desejado. Um esquema desse monomorfo é exemplificado na Figura 12.

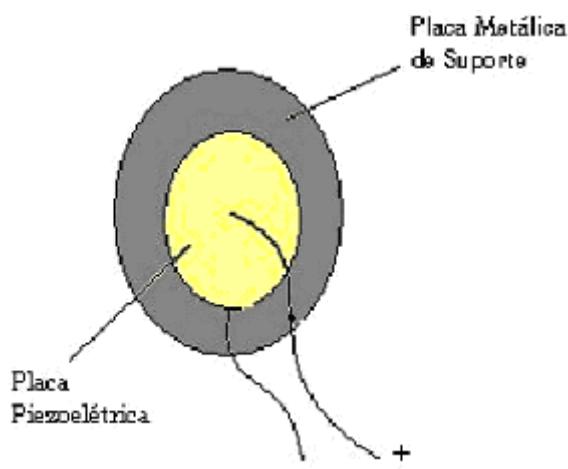


Figura 12 – Esquema de monomorfo

Sendo assim, a segunda proposta de projeto para aumentar a área de varredura do microscópio STM seria a utilização deste monomorfo em forma de uma tira. Essa

tira teria aproximadamente 5mm de largura, 4 mícron de espessura na região onde há a placa metálica, 2 mícron de espessura na área do disco do piezoelétrico restante e 4 cm de comprimento.

O material piezoelétrico utilizado nesse monomorfo é o Titanato Zirconato de Chumbo, mais conhecido como PZT. Este material, assim como todos os piezoelétricos, possuem uma temperatura limite até onde suportam trabalhar sem perder ou danificar suas características. Esta temperatura é conhecida como Temperatura de Curie (TC) e está representada a seguir.

Tabela I – Propriedades do material PZT, dopado com bário e sinterizados a 1100°C por 4h.

PZT Puro	7,5	360	10000	0,44	285	12,8	26,0
PZT +3 mol% em Ba ²⁺	7,5	388	6052	0,37	230	11,6	25,1
PZT+5 mol% em Ba ²⁺	7,5	390	5760	0,41	247	11,2	30,4
PZT +7 mol% em Ba ²⁺	7,7	353	4423	0,45	260	11,5	31,5

Algumas amostras do material com as dimensões acima mencionadas já foram preparadas.

Para cortar o material foi necessário utilizar uma serra de discos diamantados, aparelho destinado a fazer cortes precisos. A serra utilizada foi a que se encontra na POLI-USP no departamento de Engenharia de Materiais e está demonstrada na figura abaixo.



Figura 13 – Serra de discos diamantados utilizada no corte do monomorfo

Este aparelho foi o escolhido devido à fácil acessibilidade e, principalmente, para não danificar o monomorfo. Este aparelho possui uma região circular equipada com alguns canais radiais além de um orifício central onde é apoiada uma base de vidro que suporta o material a ser cortado. Um sistema presente na máquina utiliza estes canais e orifício para produzir vácuo na base de vidro e assim manter a mesma fixa durante o corte. O material também teve que ser preso a uma base para fazer o corte. Como a Temperatura de Curie está muito acima da temperatura de fusão do salicilato de fenila, aproximadamente 50°C, esta substância também foi utilizada para colar a amostra na base para fazer o corte necessário na obtenção da tira do monomorfo. A seguir é possível verificar uma das tiras do monomorfo produzida além de duas placas de monomorfo de diferentes tamanhos ainda na configuração utilizada em tweeter.

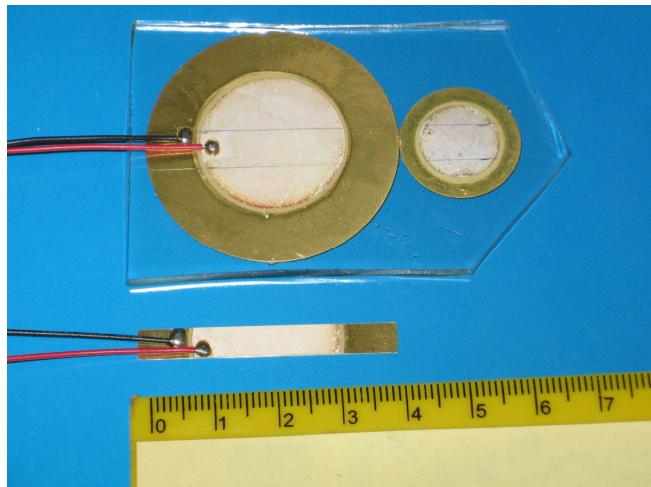


Figura 14 – Tira de monomorfo

Uma tentativa de estimar através de cálculos o máximo alcance teórico de uma tira deste material foi feita, porém sem sucesso. Livros foram utilizados como base teórica para este cálculo, mas muitas aproximações teriam de ser feitas para chegar a uma resposta, perdendo assim toda a precisão necessária. Por exemplo, coeficientes do monomorfo teriam de ser aproximados mesmo sem saber a composição exata do material. Por isso, foi decidido fazer a medição experimentalmente.

O equipamento mais comum e preciso utilizado para fazer medições na escala de micron é o interferômetro, porém devido à indisponibilidade deste nas instalações da POLI-USP, esta técnica foi descartada. Outros métodos para fazer a medição do

deslocamento do material foram estudados e dois destes foram escolhidos devido à precisão dos resultados fornecidos e também a disponibilidade do equipamento.

4.2.1 Método de medição de deslocamento por laser:

Sabe-se que a deformação do monomorfo é da ordem de micron e por isso, para que esta seja determinada, é necessário um aparelho específico para medidas com essa precisão ou a utilização de algum esquema com a finalidade de amplificar esse deslocamento, viabilizando assim a medida com uma boa precisão.

Desta forma, para fazer uma primeira medição do deslocamento capaz de ser atingido pelo monomorfo foi utilizado uma montagem semelhante ao sistema $\theta / 2 \theta$ de um difratograma de raios-X, como mostrado abaixo.

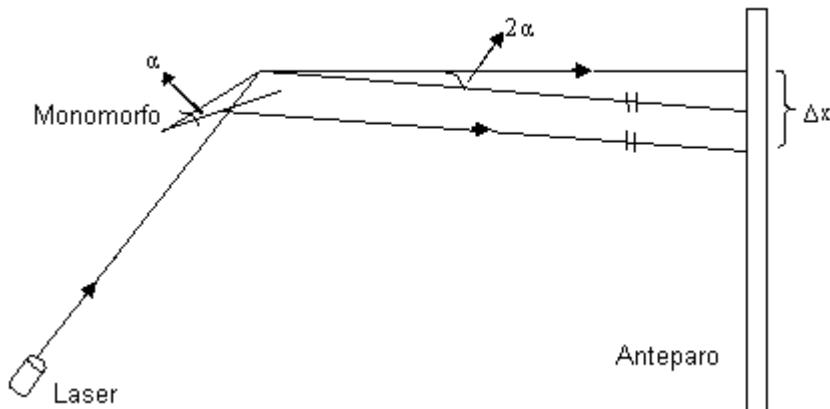


Figura 15 – Esquema do Experimento

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.

Após uma análise mais detalhada do triângulo com um de seus ângulos de valor α , nota-se que não é correto utilizar o valor de um de seus catetos igual a dimensão do monomorfo pois este não se comporta como uma barra rígida. Este apresenta uma deformação somente na região onde se localiza a cerâmica. Assim, conforme ilustrado na figura 16 (monomorfo ainda sem deformação) e na figura 17 (monomorfo apresentando deformação), o valor mais adequado para o cateto deste triângulo é a distância entre o centro da cerâmica e o centro do espelho, representada pela letra b .



Figura 16 – Esquema do Monomorfo livre de diferenças de potencial

No triângulo retângulo ABC em destaque na Figura 17 a seguir aproxima-se o lado AB pela medida “ b ” da Figura 16. O lado BC é o deslocamento vertical a ser determinado.

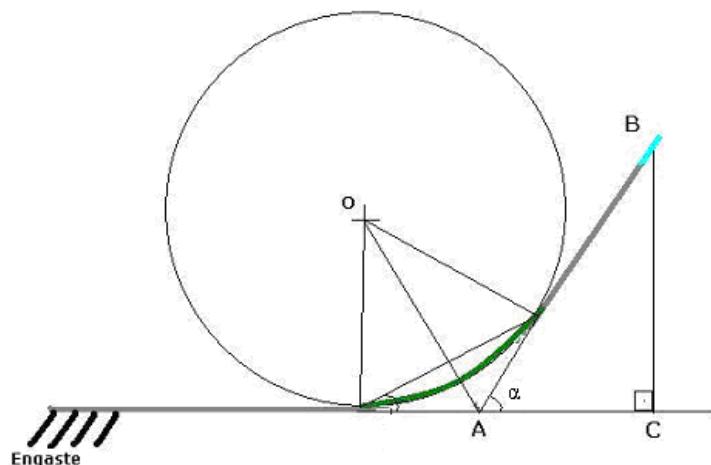


Figura 17 – Esquema do Monomorfo deformado

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 $\operatorname{tg}(\alpha)$ seja aproximadamente igual a $\operatorname{sen}(\alpha)$. A montagem final do esquema de medição pode ser vista na Figura 18.

Assim, pelos dois 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 e o anteparo, foi possível chegar a boas estimativas de deslocamento.

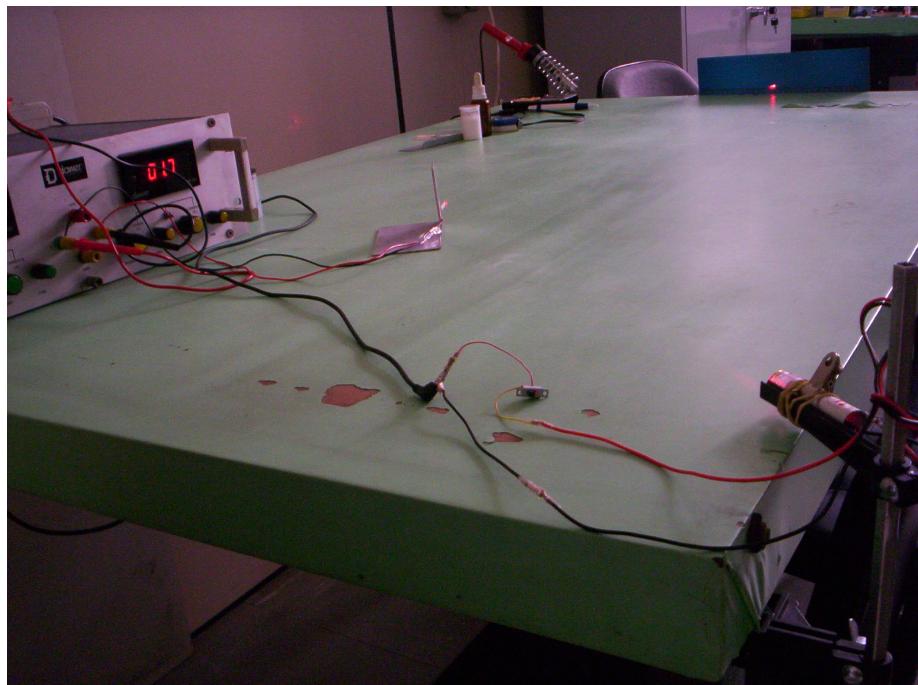


Figura 18 – Sistema de medição a laser montado

4.2.2 Apresentação dos resultados da medição

O esquema descrito anteriormente foi utilizado para medir o deslocamento de duas tiras de dimensões iguais, porém de diferentes monomorfos. Os resultados obtidos estão representados a seguir na forma de gráficos. Na obtenção dos resultados foi adotado o critério de deformação em sentido horário quando a cerâmica apresentou contração e sentido anti-horário quando a cerâmica apresentou expansão.

Tira de monomorfo 1

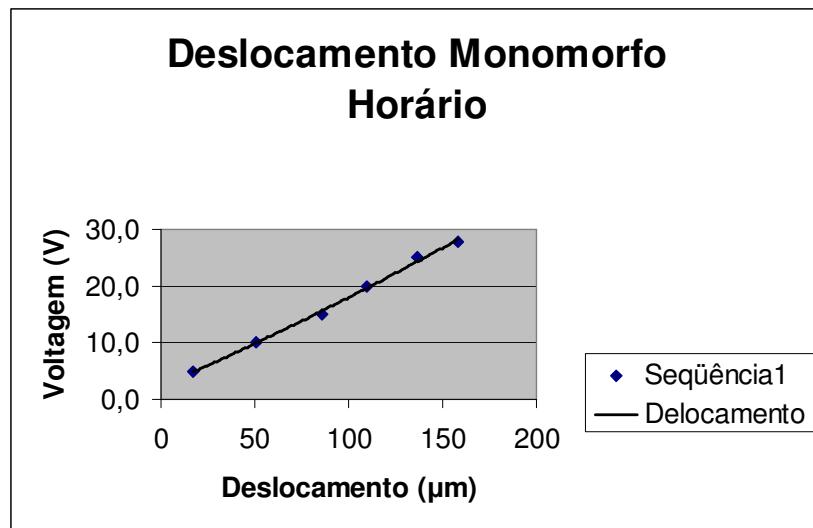


Gráfico 2 – Deslocamento do Monomorfo para Diferenças de potencial positivas

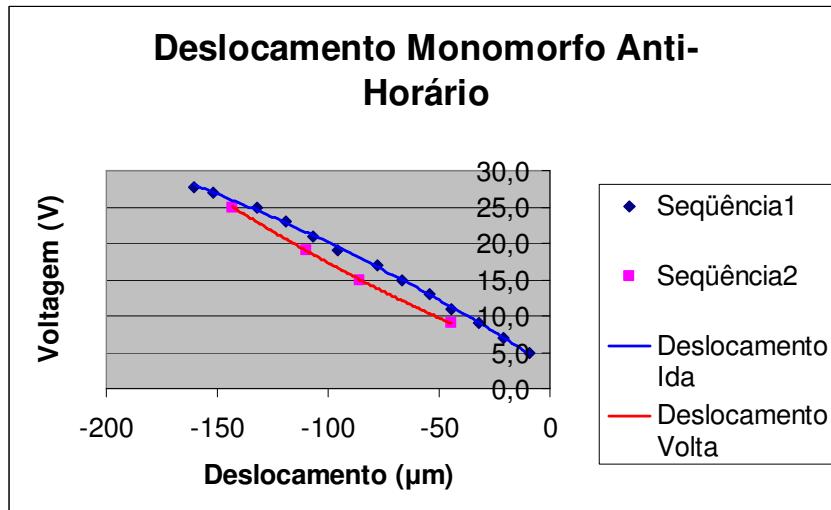


Gráfico 3 – Deslocamento do Monomorfo para diferenças de potencial negativas

Tira de monomorfo 2

Deslocamento do monomorfo Sentido Horário

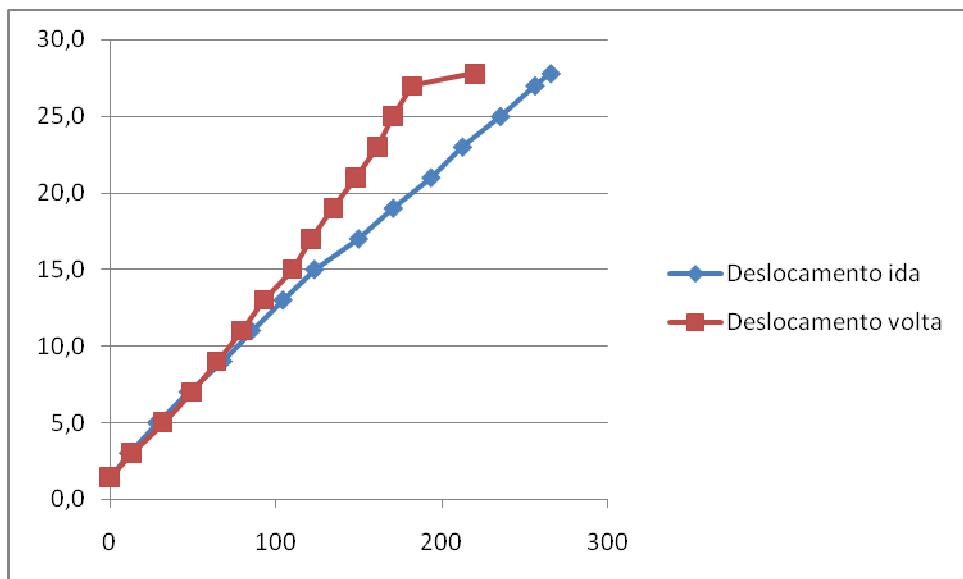


Gráfico 4 – Deslocamento do monomorfo para diferenças de potencial positivas

Deslocamento do monomorfo Sentido Anti-Horario

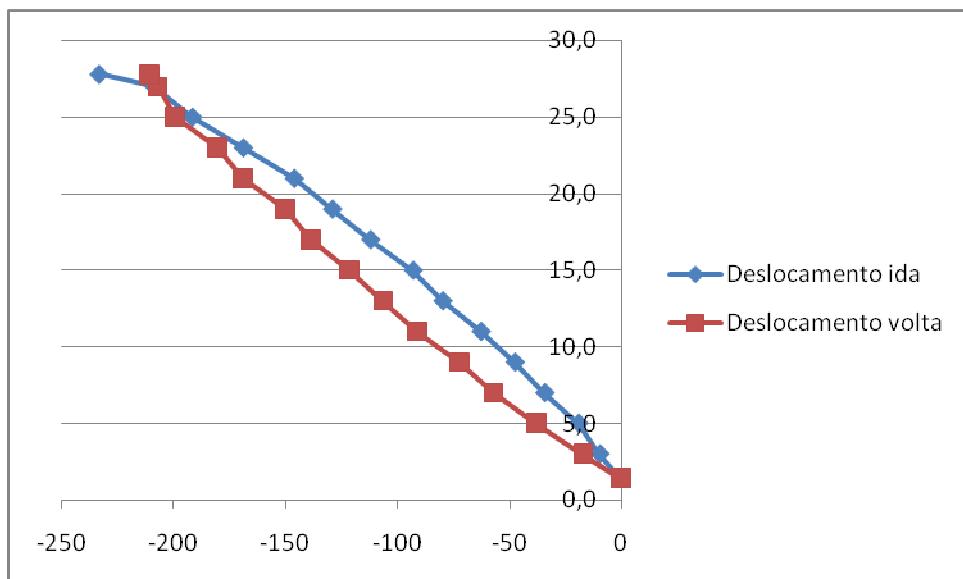


Gráfico 5 – Deslocamento do monomorfo para diferenças de potencial negativas

Todos os gráficos obtidos apresentam um desvio nos valores obtidos durante o aumento da diferença de potencial aplicada (descolamento de ida) em relação a

diminuição da diferença de potencial aplicada (descolamento de volta). Este desvio ocorre devido ao efeito de histerese, comum em materiais piezoelétricos. Existem algumas técnicas para diminuição deste efeito, como por exemplo, a relaxação estrutural que implica em aumentar e diminuir o potencial aplicado na estrutura em torno do valor desejado. Como o próprio nome da técnica sugere, esta ação acarreta em uma acomodação da estrutura e consequentemente na diminuição do efeito de histerese. Esta técnica não foi utilizada durante essa medição, pois neste momento o objetivo é determinar qual a deformação aproximada do monomorfo.

A Tabela II a seguir apresenta os maiores valores atingidos pelo ângulo α que ocorreram durante a deformação do segundo monomorfo na medição dos deslocamentos de ida, mostrando que estes são realmente pequenos. Consequentemente, esta tabela prova que as aproximações mencionadas anteriormente são cabíveis.

Tabela II – Ângulo α em relação ao deslocamento apresentado

Ângulo α (rad)	$\delta(\mu\text{m})$
0,000000	0,0000
0,000600	11,4000
0,001500	28,4999
0,002500	47,4997
0,003600	68,3991
0,004500	85,4983
0,005500	104,4968
0,006500	123,4948
0,007899	150,0906
0,008999	170,9862
0,010199	193,7798
0,011198	212,7733
0,012397	235,5638
0,013497	256,4533
0,013996	265,9479

4.2.3 Medidor Capacitivo

O sensor capacitivo consiste basicamente de um capacitor com cilindros interno e externo capaz de ter sua capacitância alterada por um terceiro elemento se este tiver

composição metálica. Para que isso ocorra basta aproximar o elemento metálico do capacitor. Uma pequena variação da distância entre ambos é acompanhada por uma variação da capacitância do conjunto que é registrada pelo aparelho. Os medidores capacitivos, quando calibrados para tal, podem trabalhar com boa precisão na faixa de deslocamentos entre frações de nanômetros até cerca de 30 micra.

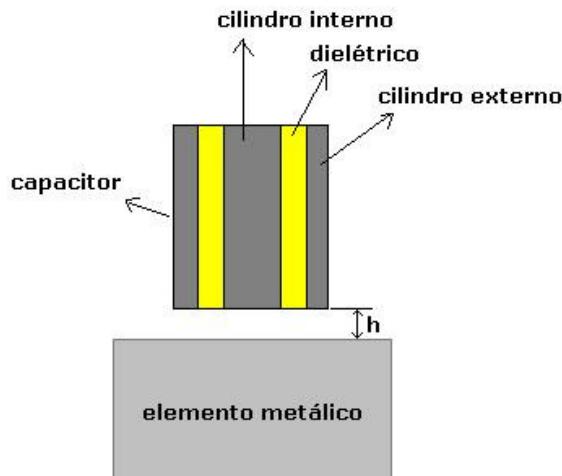


Figura 19 - Desenho esquemático do sensor capacitivo, capaz de medir “h” em nanômetros

Na foto a seguir, observa-se o aparelho utilizado e uma espuma colocada sob o sistema de medição para que a vibração transmitida ao aparato fosse reduzida para poder realizar uma medição com maior precisão.

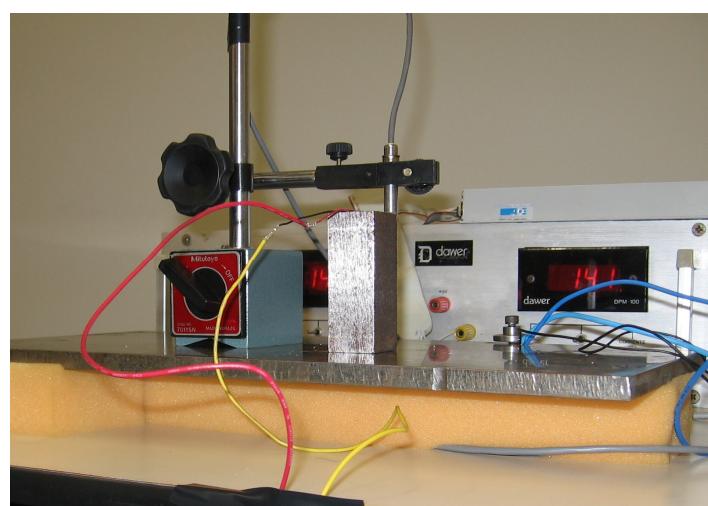


Figura 20 - Sensor capacitivo

4.2.4 Medição do conjunto de stacks com o sensor capacitivo

Primeiramente, para verificar se a calibração do sensor descrito acima estava correta, este foi utilizado para realizar a medição do deslocamento total do conjunto de cerâmicas stack, já que a curva de deformação de um piezo era conhecida previamente como já foi mencionado anteriormente. Os resultados obtidos nessa medição foram muito próximos dos esperados, confirmando assim a calibração correta do sensor. Para a realização desta medição foi necessário colar uma pequena chapa metálica numa das extremidades do conjunto de piezos para que o sensor capacitivo pudesse captar a variação de comprimento. A chapa metálica escolhida para ser utilizada possuía a forma retangular e dimensões 3,6cm X 3,8cm.

Utilizando o salicilato de fenila já mencionado para fazer as uniões necessárias, foi feita a montagem mostrada na foto abaixo.

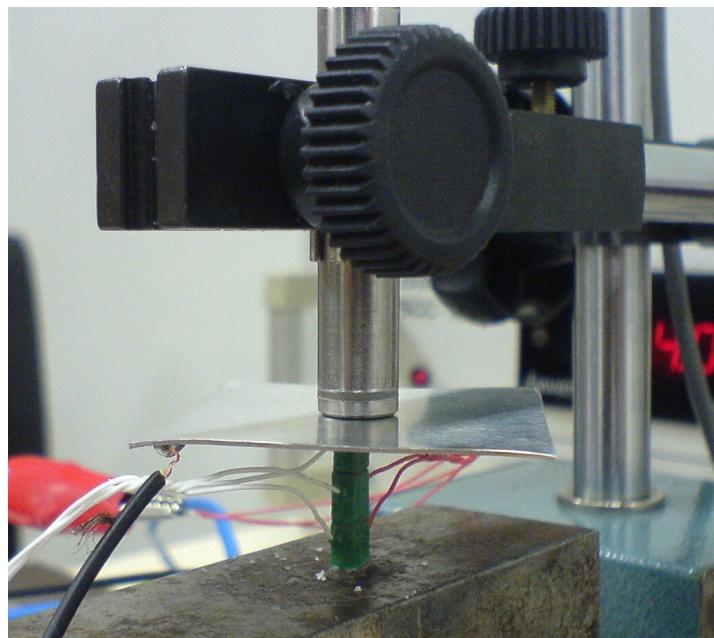


Figura 21 – Calibração do conjunto de cerâmicas com o sensor capacitivo

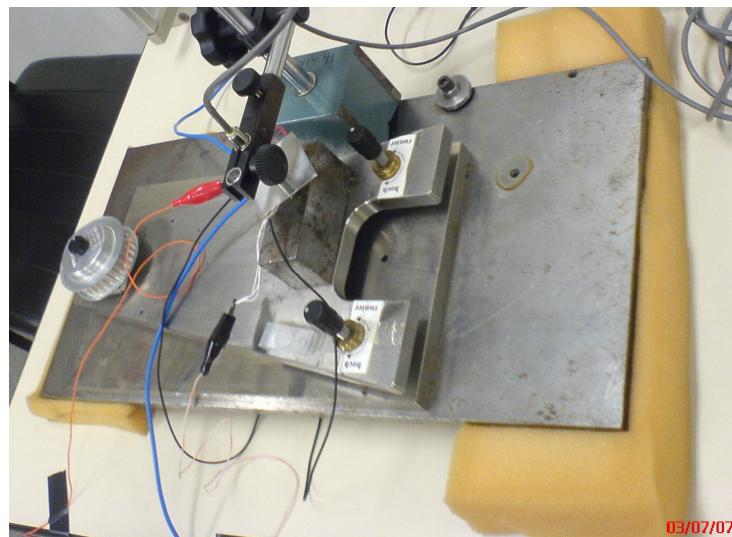


Figura 22 – Sistema utilizado na calibração

Variando a tensão elétrica aplicada nas cerâmicas, oscilações de sinal foram detectadas no osciloscópio. Sabendo que o sensor capacitivo proporciona uma variação de 0,4 V na tela do osciloscópio para cada micrometro de distância foi possível calcular o deslocamento total do conjunto.

Os seguintes resultados foram obtidos das duas medições realizadas:

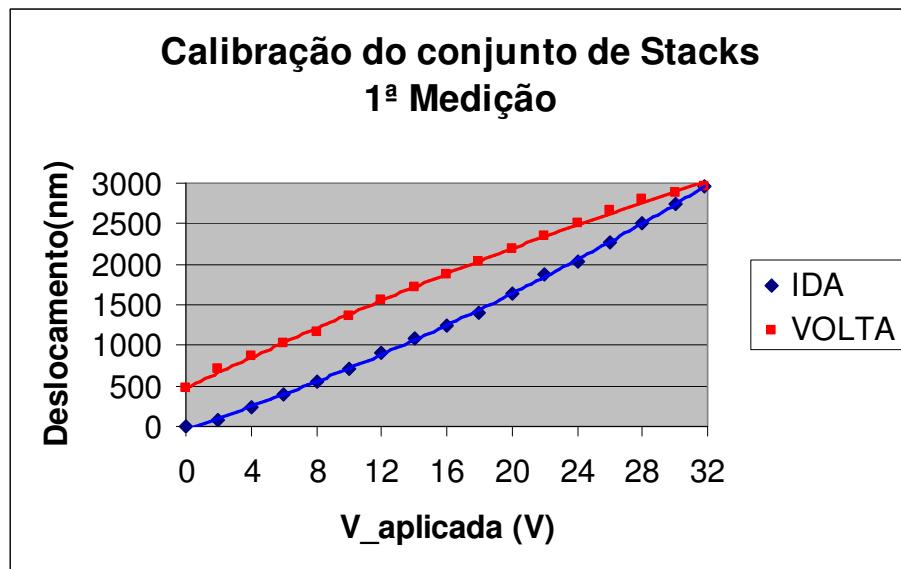


Gráfico 6 - Comportamento do piezelétrico submetido à tensão elétrica

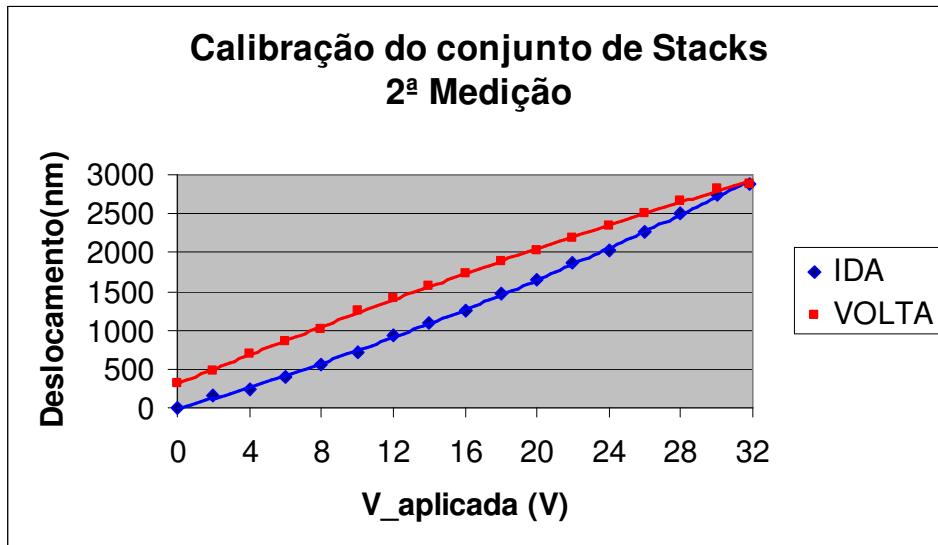


Gráfico 7 - Comportamento do piezelétrico submetido à tensão elétrica

Os gráficos obtidos revelam um comportamento muito próximo do esperado. O conjunto composto por três cerâmicas stack obteve um deslocamento total de aproximadamente 3 μm quando aplicado em torno de 30 V em cada uma das três cerâmicas.

4.2.5 Calibração do monomorfo

Assim como foi feito com o conjunto de cerâmicas, o comportamento do monomorfo também foi analisado através do sensor capacitivo. Novamente foi necessário colar uma pequena chapa metálica à ponta do atuador para que o sensor fosse capaz de detectar a variação de posição entre o sensor e o monomorfo. Lembrando que essa chapa metálica tem que ser “enxergada” pelo sensor capacitivo como sendo infinita para que este funcione de forma adequada, inicialmente tentou-se aproveitar a mesma chapa metálica utilizada no conjunto de cerâmicas, a fim de evitar erros dessa natureza. Porém esta chapa metálica era muito pesada e poderia danificar a tira de monomorfo. Por esse motivo, uma nova chapa teve que ser utilizada. Optou-se então por uma placa retangular mais leve e de dimensões 2,8cm X 3,1cm.

As uniões foram realizadas com o salicilato de fenila e o engaste do monomorfo no bloco metálico foi feito com fita adesiva dupla face.

Os dados obtidos nessa medição estão mostrados em forma de gráfico a seguir.

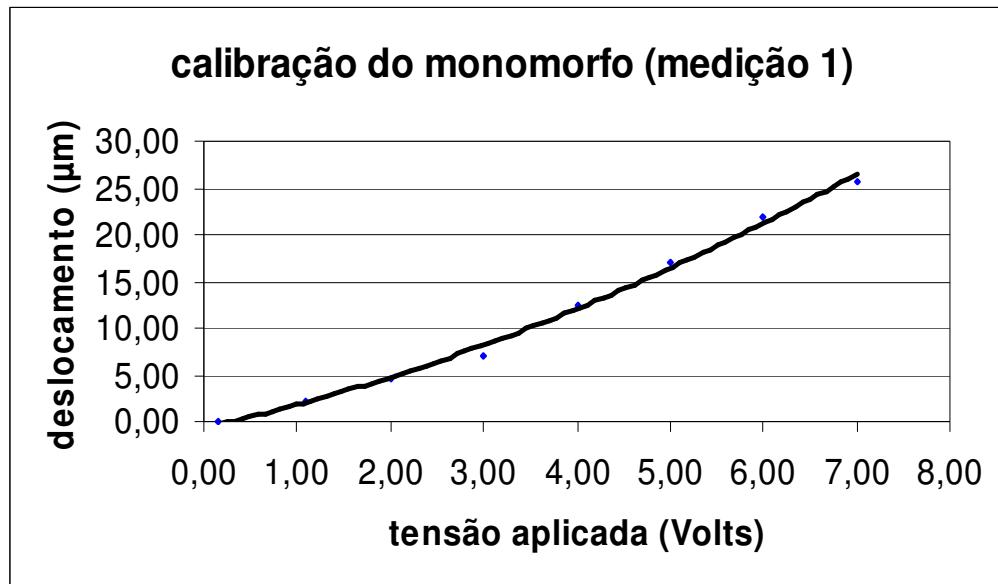


Gráfico 8 - Comportamento do monomorfo submetido à tensão elétrica

Observa-se que nessa medição só foi possível medir aplicando-se uma voltagem máxima de sete volts devido ao mau posicionamento inicial do monomorfo em relação ao sensor, entre outros fatores como vibrações externas impossíveis de serem anuladas. A calibração feita com o sensor capacitivo não apresentou rigorosamente o mesmo resultado obtido na calibração feita pelo método a laser. Considerando-se a possibilidade de ter ocorrido o erro de “placa infinita”, foi realizada uma nova avaliação utilizando uma chapa metálica circular de 8 cm de diâmetro.

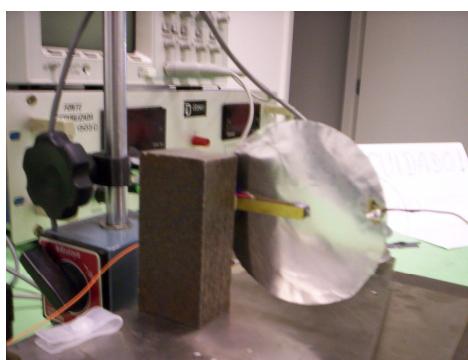


Figura 23 – Calibração do monomorfo

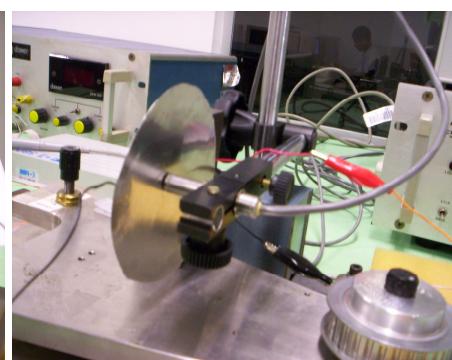


Figura 24 – Calibração do monomorfo

Por essa nova chapa ser mais maleável, sua aproximação do sensor capacitivo foi prejudicado, sendo a medida realizada até a tensão de 5 Volts, como mostra o gráfico a seguir.

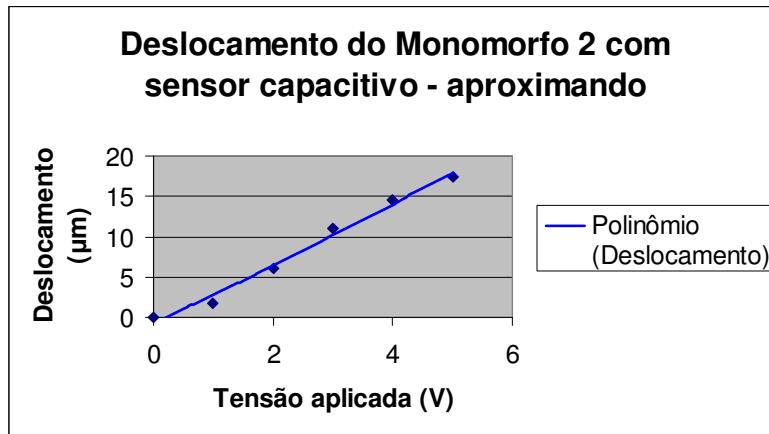


Gráfico 9 – Análise do comportamento do monomorfo com o sensor capacitivo

Devido ao fundo de escala ser reduzido, como mencionado acima, não foi possível construir uma curva aplicando de 0 a 30 Volts de uma só vez, como havia sido feito com o método a laser. Assim, foram feitos testes aplicando uma tensão inicial e a partir de então coletados pontos com variação de 5 Volts. Desta forma foi possível comparar a inclinação entre as pequenas curvas obtidas por esse método e a curva obtida pelo método a laser. Por fim, foi verificado que os resultados obtidos por esses dois métodos eram compatíveis e então foi adotada a curva gerada pelo método a laser como sendo a calibração oficial para a tira de monomorfo.

5. Discussão dos Resultados

Depois de finalizada a análise das duas propostas de solução para o problema estudado, a partir dos resultados obtidos e demonstrados anteriormente, foi possível fazer novas projeções para o projeto. Em uma comparação em linhas gerais, o descolamento atingido pelo monomorfo é da ordem de 60 vezes mais do que o atingido pelo conjunto de cerâmicas tipo stack para uma mesma diferença de potencial aplicada. Destaca-se ainda que esta solução apresenta um baixíssimo custo. Sendo assim, a solução adotada foi a utilização da tira do monomorfo.

6. Projeto do novo sistema de posicionamento da ponta de prova

Para utilização do monomorfo, foram idealizados dois mecanismos para o novo sistema de movimentação da ponta de prova esquematizados nas Figuras 25 e 27.

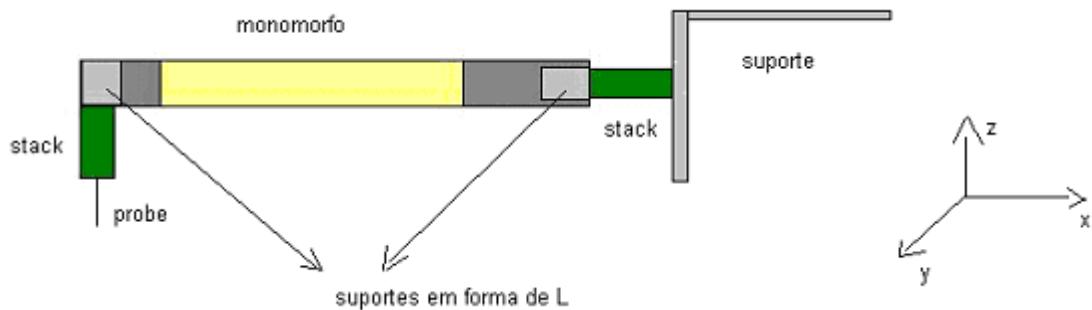


Figura 25 – Primeiro projeto do novo sistema de posicionamento

Nessa primeira concepção o monomorfo encontra-se entre duas cerâmicas do tipo “stack” responsáveis pelos deslocamentos nos eixos “x” e “z”, enquanto o monomorfo realiza a varredura no eixo “y”.

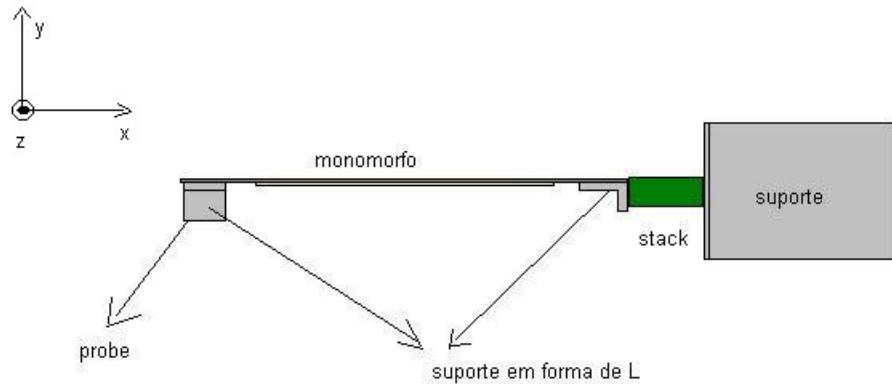


Figura 26 - Vista aérea do primeiro projeto

Uma vantagem dessa estrutura é a ponta de prova 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 stack deste eixo melhorando a qualidade da medição.

Uma desvantagem desse mecanismo é uma possível flexão imposta à tira do monomorfo devido ao carregamento fixo (peso cerâmica stack mais suporte L) em sua ponta. Essa flexão prejudicaria a precisão da varredura nos eixos.

Outra desvantagem é o fato do acoplamento da ponta de prova (probe) na estrutura ser de difícil execução, uma vez que o probe estaria ligado a um material não metálico (cerâmica stack).

Uma solução alternativa seria deixar o monomorfo ligado diretamente à ponta de prova, como no esquema abaixo.

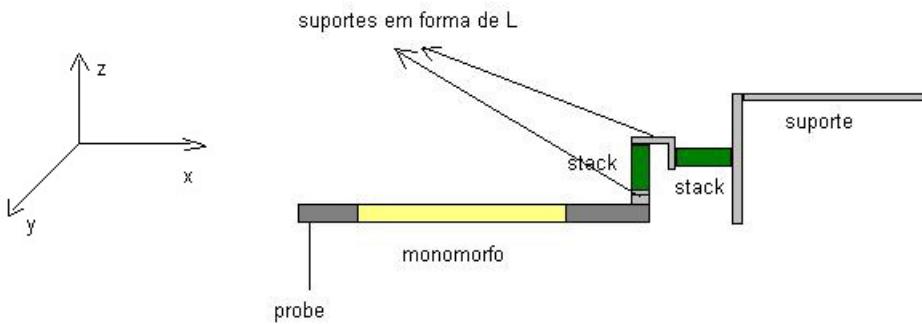


Figura 27 – Segundo projeto do novo sistema de posicionamento

Na representação acima, a cerâmica stack ligada ao suporte principal realiza a varredura em “x”, enquanto que a outra cerâmica stack move o sistema linearmente na direção “z”. O monomorfo varre na direção do eixo “y”.

Nesse mecanismo, a ponta de prova está ligada à tira metálica e, portanto, o acoplamento é mais fácil de ser realizado (probe é preso entre um par de ímãs). Além disso, não há flexão na tira do monomorfo, já que não há carga em sua ponta. Porém uma grande desvantagem dessa estrutura é a distância entre a ponta de prova e a cerâmica stack responsável pela cotagem da superfície da amostra. Uma variação na topografia detectada pelo probe teria uma resposta ruim da cerâmica devido à inércia causada pelo material presente entre ambos (erro ABBE). O sistema deixaria de ser rígido e preciso.

Depois de analisadas as vantagens e desvantagens de cada solução, optou-se pela montagem da primeira alternativa apresentada.

6.1 Montagem do novo sistema de posicionamento da ponta de prova

Os elementos que constituem o novo sistema de posicionamento são peças metálicas fabricadas na forma desejada, duas cerâmicas stack e um monomorfo obtido através do corte do twiter. As peças metálicas servem como material de junção entre os atuadores do sistema (X, Y, Z) e também servem para fixar o mecanismo junto ao STM.

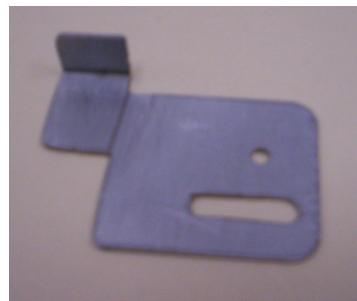


Figura 28 – Suporte para o novo Sistema de posicionamento

Quando se tem a necessidade de fixar cerâmicas piezelétricas em outros materiais, o método mais indicado é a colagem.

Para fazer as uniões necessárias, fez-se uso do material DUREPOX, uma vez que esse tipo de material, assim como colas acrílicas, são os mais recomendados entre os diferentes meios de colagem quando há a necessidade de junções rígidas como no caso das cerâmicas piezelétricas. A colagem com esses materiais proporciona uniões fortes, mas também flexíveis eliminando problemas com fadiga, além de que temperaturas de operação acima de 150°C não causam danos para junções que utilizam esse tipo de colas.

A seguir são mostradas fotos de algumas etapas da montagem do mecanismo até sua forma final.

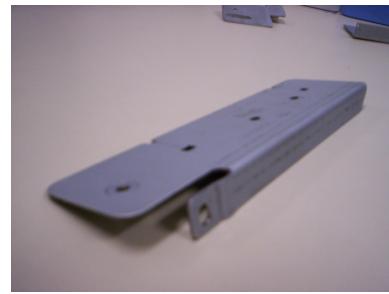


Figura 29 – Peça inicial do Suporte



Figura 30 – Suporte já usinado

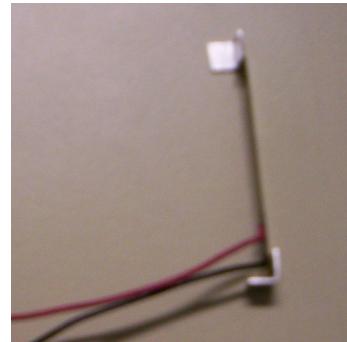


Figura 31 – Monomorfo com as junções para receber as cerâmicas stack

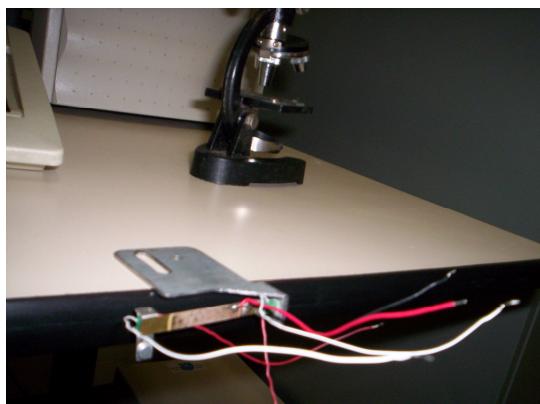


Figura 32 – Novo sistema de posicionamento totalmente acoplado

7. Interferência eletromagnética no circuito

Interferência eletromagnética, ou IEM como também é conhecida, é um campo ou onda elétrica ou magnética que altera o funcionamento de um equipamento, dispositivo ou aparelho. A interferência pode ser proposital ou acidental e pode ser de origem natural ou artificial. Descargas atmosféricas e os ventos são exemplos de causas naturais de IEM. Outros exemplos de fontes que geram campos eletromagnéticos interferentes como são os microcomputadores, micros controladores, linhas de transmissão de energia elétrica, motores elétricos, circuitos de eletrônica digital e rádios

de comunicação. A IEM pode ser radiada (pelo ar) ou conduzida (se propaga por condutores).

Existem várias técnicas para evitar ou reduzir a IEM, entre elas o aterramento elétrico, a blindagem magnética, a blindagem elétrica, o uso de filtros, o isolamento ótico, os protetores elétricos, usar sinais mais fortes que o interferente, entre outros. A interferência pode ser insignificante não comprometendo o desempenho do circuito eletrônico.

Um dos grandes problemas em se trabalhar com diferenças de potenciais e correntes elétricas muito baixas, como é o caso dos piezelétricos do que posicionam a ponta de prova do microscópio STM, é que as interferências eletromagnéticas são muito relevantes para o seu funcionamento.

Utilizando um osciloscópio eletrônico foi diagnosticado que o circuito eletrônico do microscópio estava recebendo uma interferência com freqüência de 60Hz, provavelmente proveniente da rede elétrica do prédio, pois essa opera exatamente nessa freqüência. Por isso, uma caixa metálica foi utilizada como blindagem para a placa do STM. Os cabos usados para a comunicação do computador com o circuito do STM já possuíam blindagem e por isso não foram alterados.

8. Instalação do novo sistema de posicionamento no STM

Após a análise da interferência eletromagnética no circuito do STM e da construção do novo sistema de posicionamento, foi possível fazer a instalação do mesmo do microscópio. A figura a seguir mostra o novo sistema já instalado no STM.

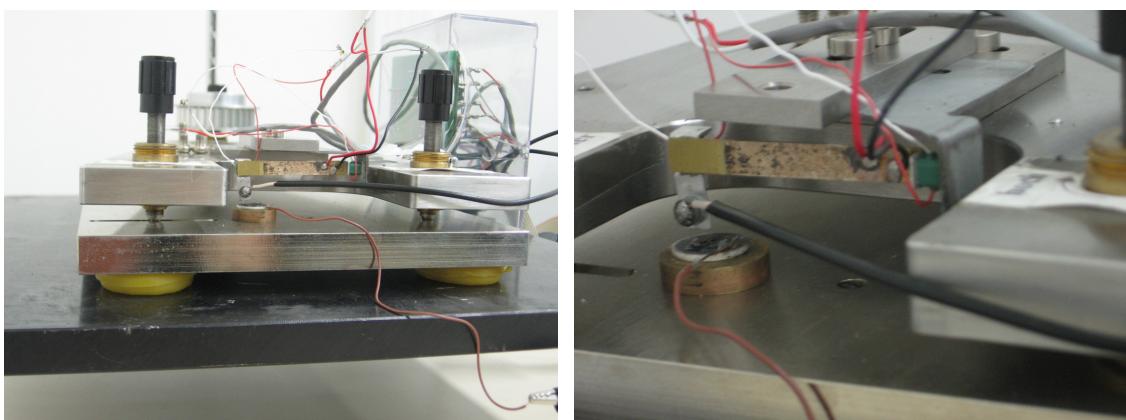


Figura 33 – Novo sistema de posicionamento instalado no STM

Nesse sistema de posicionamento, um piezelétrico e a tira do monomorfo fazem os movimentos no plano da amostra, eixos x e y, enquanto que uma outra cerâmica piezelétrica atua no eixo z, perpendicular a amostra analisada. Devido à forma de funcionamento do microscópio, um atuador deve fazer várias vezes os movimentos de alongamento e compressão, eixo y da figura a seguir, enquanto o outro atuador movimenta-se em apenas uma direção durante uma varredura na amostra.

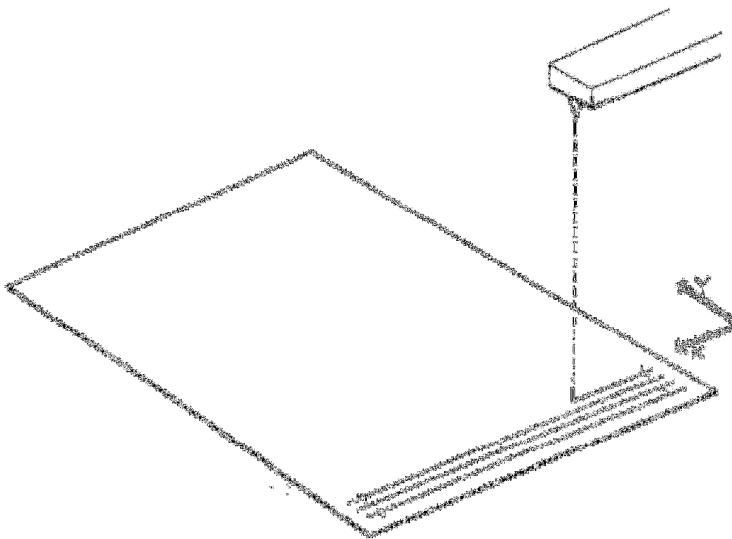


Figura 34 – Esquema do funcionamento do STM

Devido ao maior deslocamento e consequentemente maior efeito de histerese, efeito já discutido anteriormente, o monomorfo foi posicionado para movimentar o probe unidirecionalmente no eixo y.

A solda foi utilizada para conectar os fios dos atuadores aos do circuito do STM.

9. Determinação da área da amostra a ser varrida

Inicialmente, 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 5).

Por exemplo, se for escolhida no software uma área de 1nm X 1nm, o microscópio irá aplicar uma voltagem de 0,03 Volts nos atuadores dos eixos x e y. Desta forma, cada cerâmica piezelétrica irá de fato deformar um nanômetro. Porém a tira de monomorfo quando exposta a uma diferença de potencial de 0,03 Volts sofre uma deformação de 150 nanômetros aproximadamente. Assim, a área final da amostra a ser analisada pelo microscópio é de 1x150 nm².

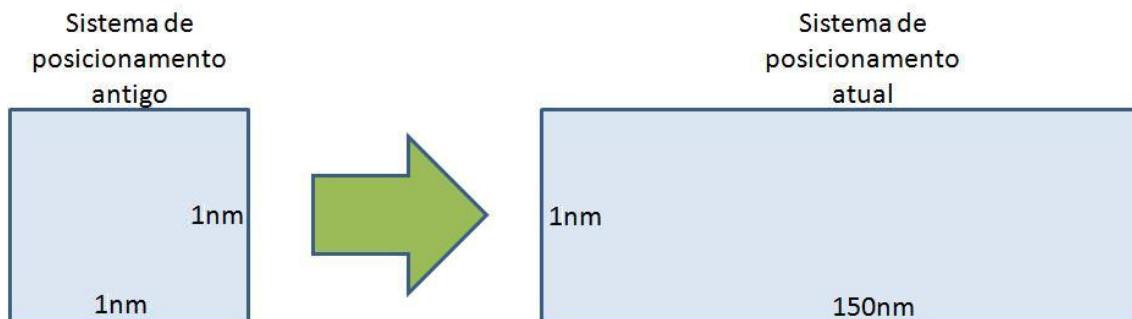


Figura 35 – Área varrida pelo STM antes e depois da modificação do sistema de posicionamento

10. 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. Os dados utilizados pelo software para confecção desta imagem (tensão aplicada no piezoelemento de controle da altura) podem ser utilizados por outros softwares ou serem utilizados para algum tipo de análise através da opção “exportar” presente no software. Esta opção exporta os valores para um arquivo de formato ASCII, possibilitando a utilização dos dados em outros programas.

11. Utilidade do novo sistema de posicionamento

Essa adaptação feita no microscópio STM localizado no departamento da engenharia mecatrônica da Poli-Usp traz muitos benefícios e permite 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.

A análise da rugosidade em escala nanométrica de um material tem várias utilidades. Os materiais quando estudados na escala de nanômetros têm todas suas propriedades alteradas, entre elas a rugosidade.

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 é muito poderosa e tem diversas utilidades.

12. Resultados

Abaixo, encontram-se os resultados obtidos de 3 varreduras realizadas no STM com o novo sistema de posicionamento da ponta de prova.

12.1 Varredura 1

No primeiro exemplo, o software gerou como resultado o desenho quadrado de uma área varrida de $100 \times 100 \text{ nm}^2$ do material amostrado (grafite). Entretanto, somente o piezelétrico, responsável pela varredura no eixo x, percorreu 100 nm, enquanto o monomorfo, responsável pela varredura no eixo y percorreu uma distância 150 vezes maior, equivalente a $15 \mu\text{m}$. Isso ocorre devido ao fato de que, a mesma tensão aplicada sobre o atuador do eixo x (piezo), foi também aplicada no atuador do eixo y (monomorfo).

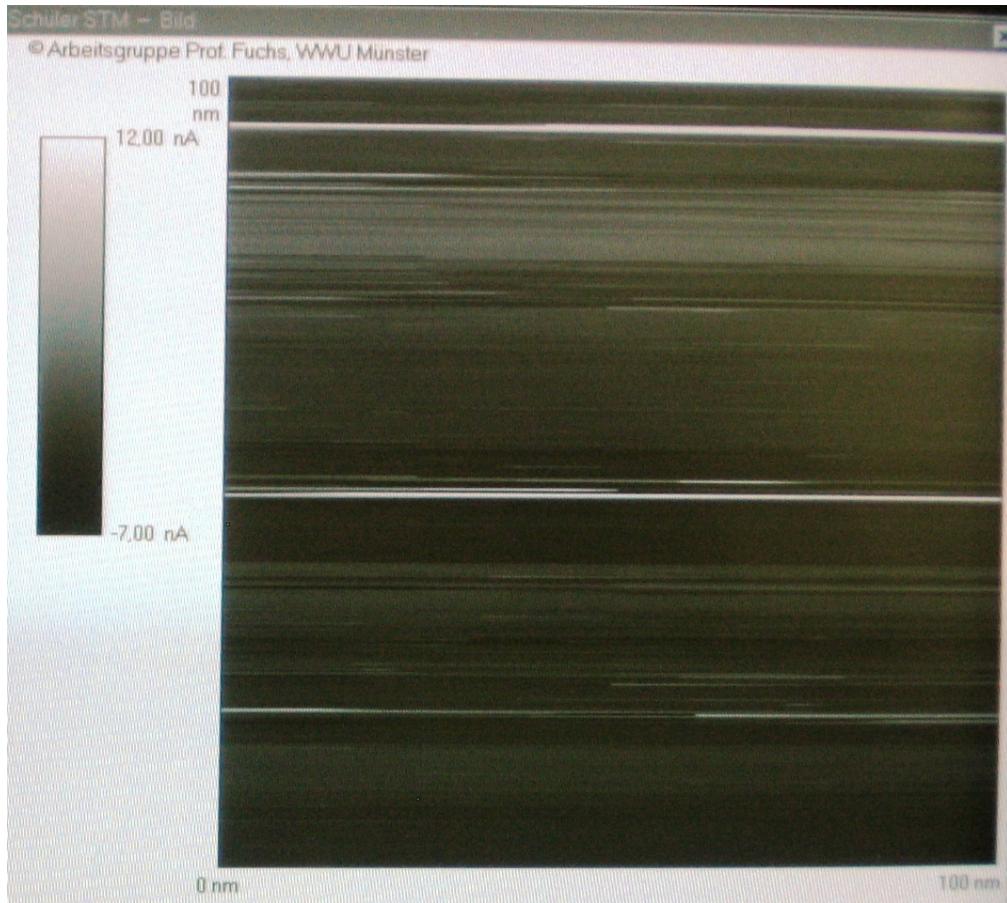


Figura 36: imagem gerada pelo software da uma varredura de uma área quadrada ($100 \times 100 \text{ nm}^2$)

Na figura acima, quanto mais clara for a cor do desenho, maior será a cota correspondente àquela região, como indica a barra vertical ao lado esquerdo do desenho.

Além de gerar uma figura bidimensional da área varrida, o software também cria um arquivo de extensão txt que apresenta todos os pontos aquisitados durante o escaneamento da superfície amostrada. Em cada linha do arquivo são mostrados os valores da linha, da coluna e um valor de corrente proporcional à cota de um ponto aquisitado. No caso do exemplo em questão, um pequeno trecho do arquivo gerado é exposto a seguir.

118	1	-0,8544922
119	1	-0,5859375
120	1	-0,8398438
121	1	-0,6445313
122	1	-0,3271484
123	1	-0,4248047
124	1	-0,5517578
125	1	-0,2294922
126	1	-0,3808594
127	1	-0,7373047
128	1	-0,4736328
1	2	-0,9863281
2	2	-0,8056641
3	2	-1,069336
4	2	-1,137695
5	2	-0,8056641
6	2	-0,6347656
7	2	-0,8203125

Através dos dados contidos no arquivo exportado do software, foi possível obter a micro rugosidade linear da região amostrada, tomando-se a média topográfica de cada linha escaneada como um ponto. A plotagem de cada ponto ao longo de toda extensão varrida da amostra, é mostrada no Gráfico 10.

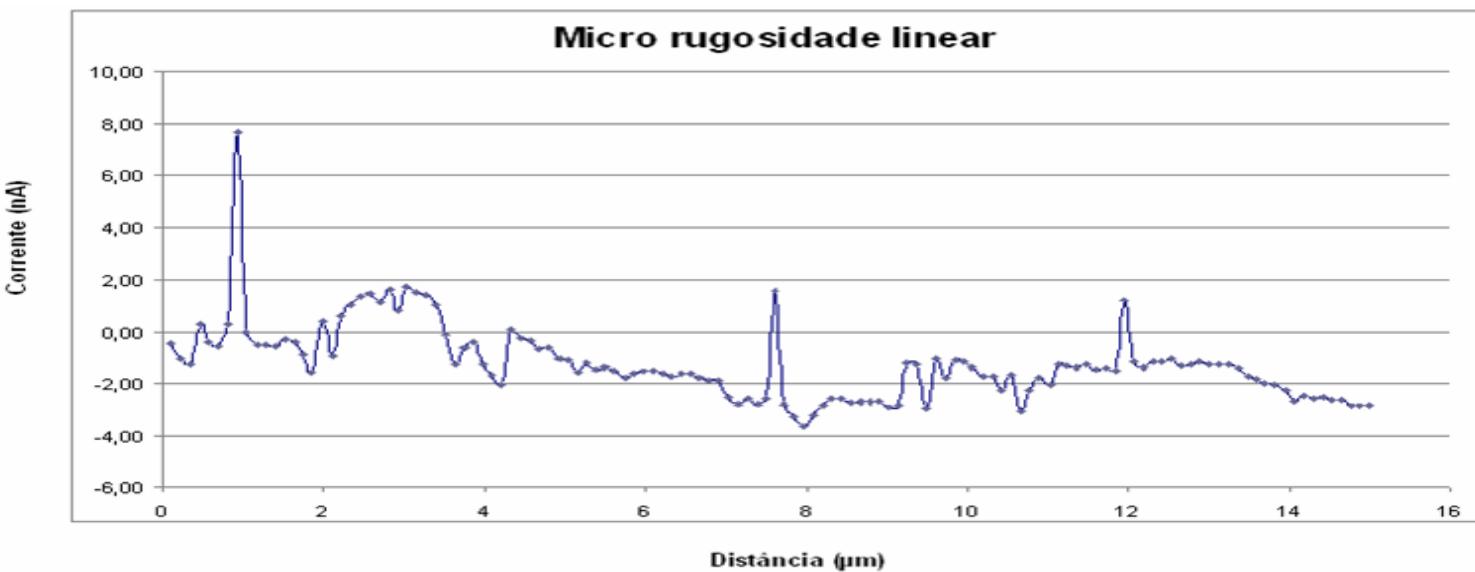


Gráfico 10: Micro rugosidade linear de amostra de grafite

12.2 Varredura 2

No exemplo 2, o software apresenta o desenho de uma área escaneada de 2x2 nm. Na realidade, a região varrida tem 2x300 nm.

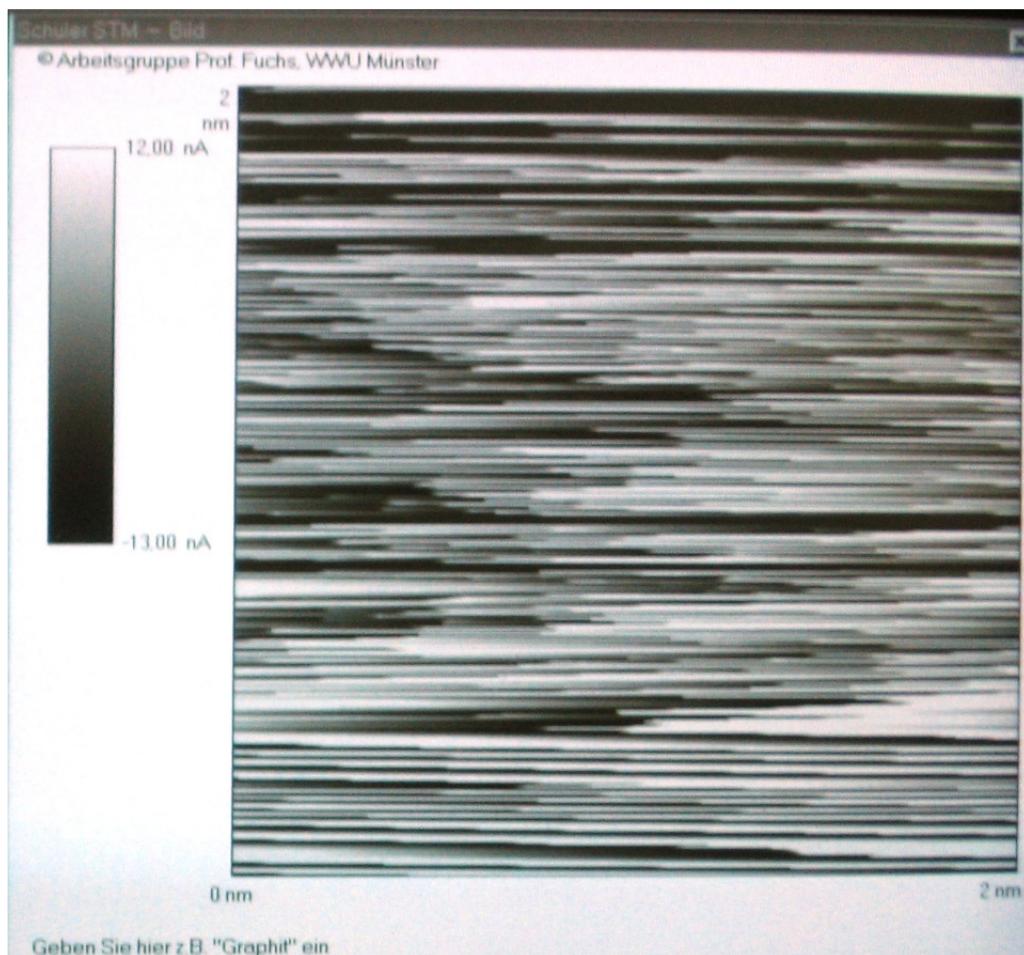


Figura 37: imagem gerada pelo software da uma varredura de uma área quadrada (2x2nm)

Através dos dados contidos no arquivo txt gerado, foi obtido o Gráfico da Micro rugosidade linear também para essa superfície da amostra. Na figura acima é possível observar a mudança brusca da coloração da imagem escaneada evidenciando uma superfície com grande irregularidade. Isso pode ser comprovado no gráfico apresentado abaixo que corresponde à figura 35. É possível observar uma grande amplitude no eixo vertical, o qual é referente à altura da superfície amostrada.

Micro rugosidade linear

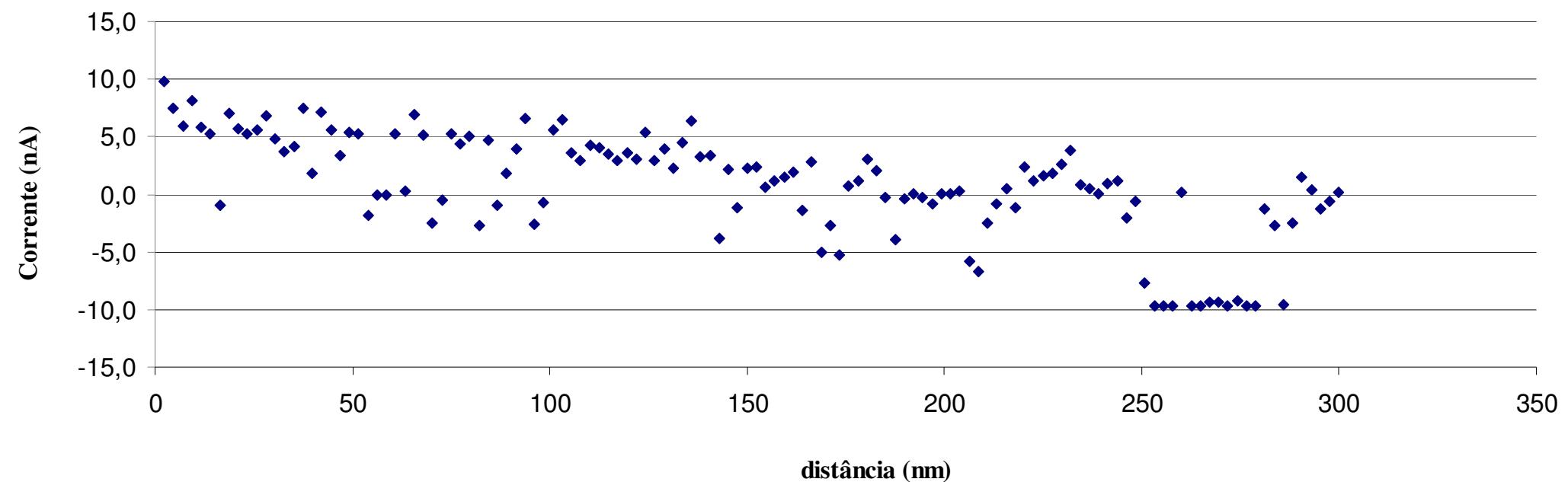


Gráfico 11: Micro rugosidade linear de amostra de grafite

12.3 Varredura 3

Assim como, no exemplo 2, o software apresenta o desenho de uma área escaneada de 2x2 nm, mas na realidade a região varrida tem 2x300 nm.

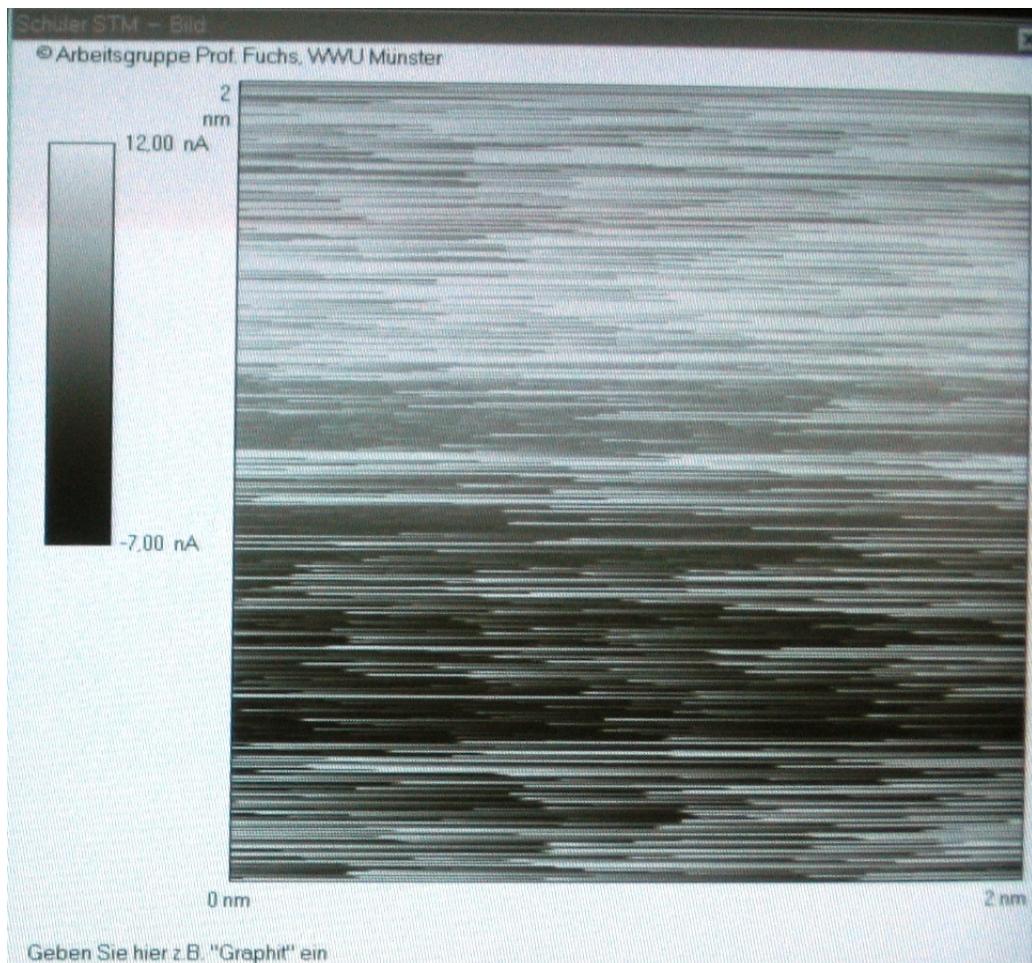


Figura 38: imagem gerada pelo software da uma varredura de uma área quadrada (2x2nm)

Como é possível observar a região superior da figura é mais elevada (tonalidade predominante branca). Já a região inferior, é menos elevada (tonalidade predominante preta). Trata-se, portanto, de um declive na superfície do material amostrado. Essa irregularidade também foi evidenciada no gráfico da micro rugosidade linear da amostra, obtido através dos dados do respectivo arquivo exportado.

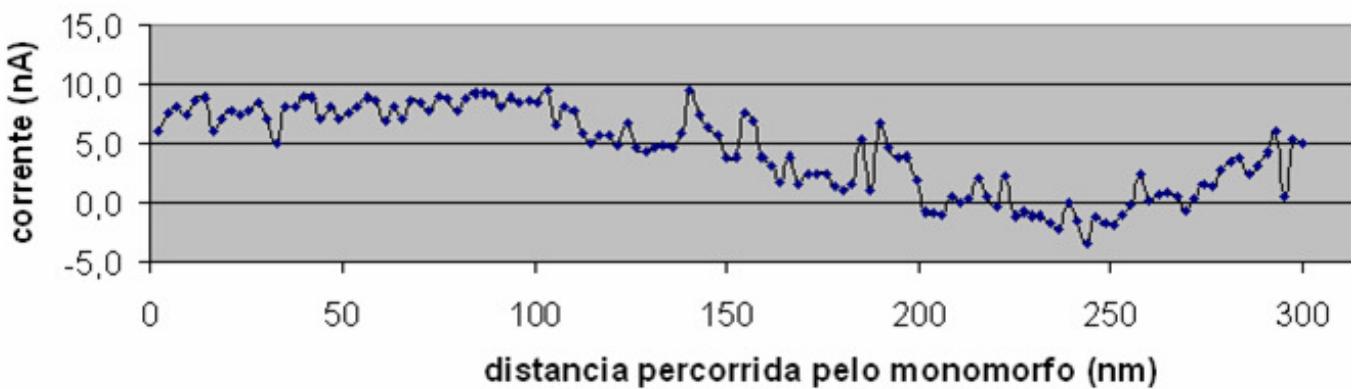


Gráfico 12: Micro rugosidade linear de amostra de grafite

13. Considerações Finais

O objetivo de ampliar o poder de varredura do STM em pelo menos uma direção foi atingido ao final do projeto. O STM, microscópio de tunelamento atômico localizado no departamento de engenharia mecatrônica da Escola Politécnica da USP, foi modificado com sucesso para que o comprimento de varredura em uma direção do material amostrado fosse ampliado mais de 100 vezes. Conseqüentemente, o resultado do escaneamento pelo microscópio permite um estudo melhor das propriedades de um material em uma determinada direção. No projeto em questão, foi calculada a Micro Rugosidade Linear de uma superfície de grafite através dos dados aquisitados pela varredura realizada. É importante ressaltar o baixo custo da solução implementada, assimilável por qualquer laboratório de desenvolvimento.

O STM da Escola Politécnica da USP era capaz de varrer uma área quadrada de no máximo 400x400 nanômetros. Seu sistema de movimentação era composto por três cerâmicas stacks acopladas, cada uma responsável pela movimentação de um eixo.

Substituindo uma das cerâmicas responsáveis pela varredura no plano xy por um monomorfo, proveniente do corte em tira de um tweeter (mecanismo metálico e piezelétrico de baixo custo utilizado para produzir som), aumentou-se o comprimento de varredura em uma dada direção do plano xy.

Com a modificação feita no sistema de varredura do microscópio, a região escaneada deixou de ser um quadrado perfeito e passou a ser um retângulo de lados adjacentes mais de 100 vezes maiores.

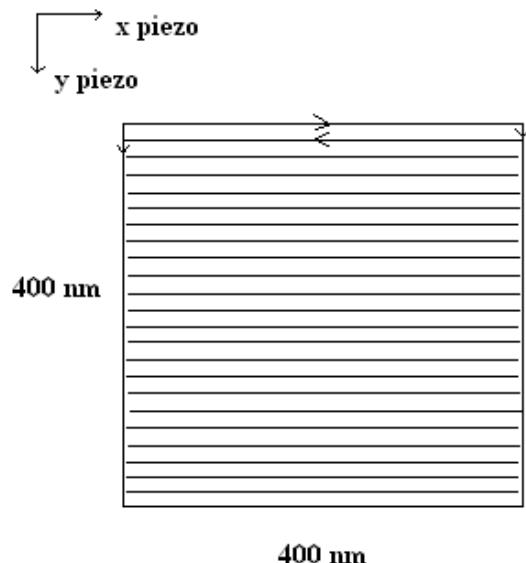


Figura 39: área de varredura antes da modificação

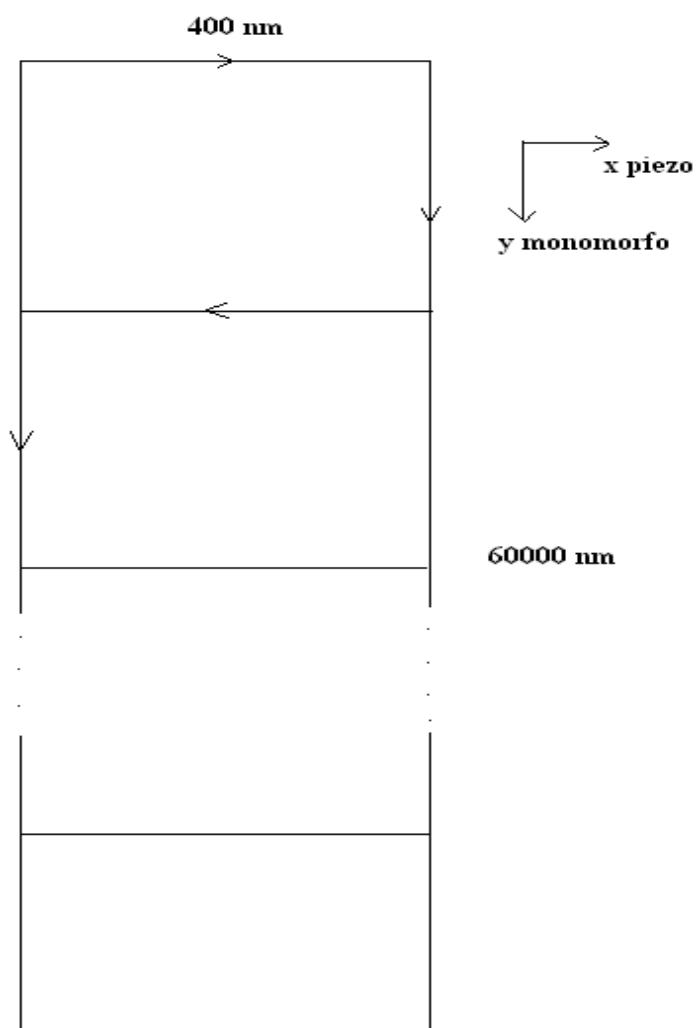


Figura 40: área de varredura depois da modificação

Tomando-se a média dos valores referentes à cota dos pontos aquisitados foi possível atribuir um valor médio referente à cota de cada linha varrida pelo piezelétrico na Figura 40. Logo, a Micro Rugosidade linear é a atribuição de um único valor de cota para cada linha horizontal ao longo da varredura do monomorfo (eixo x, Figura 40).

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 profundamento dos estudos em pesquisas que analisam materiais em escala nanométricas ou micrométricas vêm trazendo avanços inestimáveis e podem trazer benefícios ainda maiores.

14. Bibliografia

- 1- B. Jaffe, W. R. Cook, and H. Jaffe in “Piezoelectric Ceramics”, Academic Press – London and N. York (1971)
- 2- J. F. Nye, in “Physical Properties of Crystals” – Clarendon Press – Oxford (1957)
- 3- Apostila “Materiais Piezoelétricos”, autor Prof. Dr. José Antonio Eiras, Grupo de Cerâmicas Ferroelétricas, Departamento de Física - Universidade Federal de São Carlos
CEP: 13.565-905 São Carlos / SP, Brasil
- 4- T. Ikeda, “Fundamentals of Piezoelectricity” – Oxford University Press – Oxford, N. York and Tokio (1990)
- 5- W. G. Cady, in “Piezoelectricity” – McGraw-Hill Book Company – N.York and London (1946).
- 6- PI, especializada em nanoposicionamento e engenharia de precisão. Disponível em:
<http://www.physikinstrumente.com>
- 7- Cerâmica. Síntese e caracterização da cerâmica PZT dopada com íons bário. Disponível em: www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132003000200008
- 8- R. C. Carbonari, “Projeto de atuadores piezoeletricos flexionais usando o método de otimização topológica”, Tese de mestrado, Escola Politécnica (2003).
- 9- C. A. Nakagawa, G. V. A. Santos, “Obtenção de imagens 3D de um microscópio de tunelamento eletrônico”, Trabalho de conclusão de curso, Escola Politécnica (2005).