

Resumo do curso

Funcionamento e utilização de um microscópio de força atômica

Introdução à nanoscopia

Desde o século XVII, quando o microscópio óptico foi inventado, até meados do século XX, quando surgiram os novos microscópios, era impossível a visualização de objetos de dimensões menores do que alguns milésimos de milímetros.

Neste século, foram desenvolvidos métodos de visualização baseados em feixes de íons ou de elétrons. Os instrumentos ópticos possuem a limitação do comprimento de onda da luz visível e, portanto, podem apenas resolver objetos de até aproximadamente 0,5 micrômetros ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$).

Dentre os microscópios inventados no século XX, destacam-se os **microscópios eletrônicos e os microscópios de sonda**, todos por varredura.

A idéia deste curso é o estudo de um microscópio de força atômica. Os microscópios eletrônicos são caros e requerem muito trabalho na preparação das amostras e sua utilização. É por isso que os **microscópios de varredura por sonda ou SPM** (do inglês *scanning probe microscope*), isto é, sem utilização de elétrons e sim de uma ponteira que varre a amostra, têm-se tornado tão populares nos últimos 20 anos.

No Laboratório de Nanoscopia *Jorge S. Helman* do CBPF, temos um componente desta família – um AFM ou Microscópio de Força Atômica. Seu princípio de funcionamento é muito simples e a sua melhor propriedade, não compartilhada com nenhum outro aparelho de observação nessa escala, é a visão da superfície dos objetos em três dimensões.

Um AFM é composto basicamente por uma ponta ou sonda, que varre a superfície da amostra em estudo. Mede-se a força de interação entre os átomos da ponta e os da superfície e, utilizando recursos computacionais, os resultados são transformados em imagens da amostra.

Essas forças são de vários tipos, mas fundamentalmente resumem-se a forças atrativas de van der Waals – de origem química – que agem a distâncias entre 100 e algumas unidades de nanômetros ($1 \text{ nanômetro} = 10^{-9} \text{ metros}$) e forças repulsivas que provêm do princípio de exclusão de Pauli e que agem quando a ponta aproxima-se muito da superfície e os átomos da sonda e da amostra estão tão próximos que começam a se repelir. Esta repulsão eletrostática enfraquece a força atrativa a medida que a distância diminui e acaba anulando-a quando a distância entre átomos é da ordem de alguns ângstrons (da ordem da distância característica de uma união química). Quando as forças se tornam positivas, podemos dizer que os átomos estão em contato e as forças repulsivas acabam por dominar.

São inúmeras as aplicações que decorrem de este tipo de pesquisa. Investigar a superfície de uma amostra resulta no conhecimento de propriedades chamadas tribológicas como rugosidade, dureza, rigidez, elasticidade, atrito, ... que serão utilizadas na indústria, por exemplo, para obter revestimentos de alto impacto, películas protetoras, etc.

A grande família de microscópios de varredura **SPM** é conhecida também como família de sonda de campo próximo já que, em todas as suas variações, utiliza uma ponteira –para varrer a superfície a ser pesquisada– que permanece muito próxima ou em contato com a superfície. Isto permite a obtenção de imagens com resoluções que chegam a 1 \AA (10^{-10} m) no plano da superfície e a 10 \AA na direção perpendicular a ela.

Em 1986 Rohrer e Binnig receberam o Prêmio Nobel de Física pela invenção do pai da família: o **STM**, sigla em inglês para microscópio de varredura por tunelamento.

O AFM opera medindo as forças entre a ponteira e a amostra que dependem, em parte, da natureza da amostra e da ponteira, da distância entre elas, da geometria da ponteira, e de qualquer contaminação que houver sobre a superfície da amostra.

As forças em função da distância correspondem a um potencial de interação entre átomos que é do tipo Lennard-Jones, ou seja, $A/d^{12} - B/d^6$.

Para dois corpos eletricamente neutros e não magnéticos, mantidos a distâncias entre um e algumas dezenas de nanômetros, as forças de van der Waals predominam entre eles (interação atrativa a “grandes” distâncias).

A força é calculada pela deflexão do *cantilever* (de constante k de elasticidade de mola predeterminada) através da lei de Hooke $F = -k x$, sendo x o deslocamento do *cantilever*. O *cantilever* tem duas propriedades importantes: a constante de elasticidade da mola e sua frequência de ressonância. A constante de mola determina a força entre a ponteira e a amostra quando estão próximas. O seu valor depende da geometria e do material utilizado na construção do *cantilever*.

A escolha do *cantilever* é sem dúvida muito importante pois são necessárias grandes deflexões para atingir alta sensibilidade.

Para um bom funcionamento, também devem ser levados em conta os fatores externos ao aparelho: os ambientais, como umidade e temperatura, e vibrações provenientes do entorno onde está localizado o aparelho, que podem vir a causar interferências.

No AFM convencional, um detector capta a deflexão do *cantilever*. A força entre a amostra e a ponteira é calculada pela lei de Hooke. O método de detecção por luz é muito sensível a asperezas na superfície da amostra. Entretanto, traz a desvantagem de que o *cantilever* pode esquentar, mudando sua reflexão. Por isso, utiliza-se, em geral, um laser de HeNe que garante aquecimento desprezível. Quando o *cantilever* se move, devido a mudanças na topografia da amostra, a luz que ele reflete se move sobre o fotodetector. O quanto o *cantilever* se moveu pode ser calculado a partir da diferença na intensidade de luz nos setores do fotodetector. As mudanças na saída do fotodetector são também utilizadas para realimentação, isto é, para ajustar uma cerâmica piezolétrica na direção vertical z , cujo valor é registrado em função das coordenadas (x,y) , para depois ser traduzido em topografia $z(x,y)$. As coordenadas x,y também são monitoradas através de voltagens aplicadas a cerâmicas piezolétricas colocadas nos *drives* x,y do *scanner*, assim como em z . O controle de movimentos em distâncias tão pequenas é possível graças ao uso dessas cerâmicas piezolétricas. Estes materiais comportam-se de forma tal que ocorre uma mudança em suas dimensões quando neles é aplicado um campo elétrico.

Modos de fazer imagens em AFM

Globalmente, os modos de fazer imagens podem ser classificados como: **contato**, **contato intermitente** e **não-contato**, dependendo das forças entre a ponteira e a amostra. Quando o aparelho é operado na **região atrativa**, o método chama-se **não-contato**. Nesta região, o *cantilever* de AFM se enverga na direção da amostra. A operação na **região repulsiva** chama-se **contato** e o *cantilever* se dobra, afastando-se da amostra. O **contato intermitente** se produz quando o *cantilever* é forçado a oscilar a certa frequência e a certa altura da amostra, de forma tal que periodicamente ele toca a amostra. Ou seja, a força que age nesta forma de operação é às vezes atrativa e às vezes repulsiva.

Modo de Contato

Este é o método standard de fazer imagens em AFM. A ponteira faz um contato suave sobre a amostra o que se consegue com um cantilever de baixa constante de elasticidade (isto significa que o seu k é muito menor do que o k da amostra, que mantém os átomos juntos). Ou seja, a força é repulsiva e o *cantilever* utilizado é mole. Se o *cantilever* fosse duro, poderia danificar a amostra.

A realimentação é por deslocamento da ponteira. Na operação *standard*, este deslocamento é usado pelo *loop* de realimentação para ajustar a cerâmica piezolétrica z , de forma tal que a força entre a ponteira e a amostra se mantenha constante. É por isso que esta forma de operação chama-se modo de força constante ou de varredura lenta. Isto é análogo ao que ocorre com um sensor de tunelamento, no qual, quando a ponteira se move na direção da superfície, a corrente cresce e isto faz com que a cerâmica se contraia, mantendo a ponta a uma distância fixa.

Se a varredura for muito rápida ou se o *loop* da realimentação for desligado, a cerâmica não conseguirá seguir a forma da superfície da amostra. Neste caso, a saída do sensor (que vem da deflexão do *cantilever*) utiliza-se diretamente como dado z para gerar a imagem. Este modo chama-se de força variável ou de varredura rápida ou ainda, de altura constante.

A força constante é utilizada quando ocorre mudança significativa na altura da amostra sobre a área varrida. A força variável é utilizada em áreas muito pequenas, com amostras muito planas, tais como corrugações atômicas. Este modo é muito eficiente também para construção de imagens de amostras submersas.

Cerâmicas piezolétricas movimentam a ponteira (ou a amostra) no plano x,y por meio do sinal de saída do fotodetector. A eletrônica da ponteira realiza a realimentação através de outra cerâmica que movimenta a amostra (ou a ponteira) na direção z , que é ajustada para manter constante a distância ponteira-amostra. As deflexões do *cantilever* são gravadas como função das coordenadas (x,y) determinadas pelas voltagens aplicadas às cerâmicas correspondentes. O sinal obtido, $V_z(V_x, V_y)$ é finalmente traduzido em topografia $z(x,y)$. Para este fim, um computador armazena e processa os dados, além de capturar o sinal de erro que vem do integrador para operar o mecanismo de posicionamento. Há um *software* específico para transformar os dados em imagens.

Microscopia de modulação de força

A microscopia de modulação de força, ou **FMM** é outra variação do AFM para fazer imagens e caracterizar propriedades específicas dos materiais. Neste modo, também a varredura é em contato e o *loop* de realimentação em z mantém constante a deflexão do *cantilever*, isto é, é também um método de força constante. A diferença consiste na aplicação de um sinal periódico à ponteira ou à amostra de forma tal que a amplitude de modulação do cantilever que resulta deste sinal varia de acordo com as propriedades de elasticidade do material. O sistema gera uma imagem que é um mapeamento das propriedades elásticas da amostra, a partir das mudanças na amplitude de modulação do *cantilever*. A frequência do sinal aplicado é da ordem de **centos** de kc/s , o que é mais rápido que a velocidade de detecção do *loop* de realimentação. Então, a informação topográfica pode ser separada das variações locais nas propriedades elásticas do material e podem ser feitas imagens de topografia e modulação de força simultaneamente.

Microscopia de força lateral

O **LFM** (do inglês *lateral force microscopy*) é uma modificação do modo *standard* de contato no qual se faz a imagem medindo as forças laterais sobre a amostra. Com isto se visualizam variações de atrito na superfície e também se aumenta

o contraste nas bordas. Este modo chama-se também microscopia de força de atrito (FFM, do inglês *frictional force microscopy*).

Os *cantilevers* usados em LFM são sempre triangulares, devido à sua maior resistência à torção no contato. A varredura é feita na direção a 90^0 do eixo maior do *cantilever*. A força é sempre repulsiva.

A microscopia de força lateral trabalha com um princípio similar ao de força variável, no qual, os movimentos do *cantilever*, em resposta a variações na topografia da superfície, são detectados por variações na corrente do fotodetector e o que se usa para fazer a imagem é a variação da corrente de saída do detetor (já a topografia é feita em força constante e utiliza-se a voltagem necessária para manter a distância ponteira-amostra constante). Isto é feito medindo a diferença entre a saída das metades superior e inferior do fotodetector [(1+2)-(3+4)]. Quando o *cantilever* é entortado no eixo z, as intensidades relativas de luz que batem nas metades superior e inferior mudam, fornecendo assim dados topográficos para a feitura da imagem.

Como a saída dos 4 setores pode ser detectada simultânea e separadamente, os dados de topografia e força lateral podem ser obtidos durante a mesma varredura. Quando o LFM é usado em conjunto com o modo de topografia ele mostra variações no material e também aumenta o contraste nas bordas agudas. Então, ele pode ser usado para ajudar na interpretação de imagens assim como para estudos de tribologia (efeitos de contato).

Métodos com modulação

Modular significa introduzir modificações de alguma propriedade com um sinal de uma certa frequência (em geral, alta). Esta técnica, é utilizada para modular a frequência do *cantilever*, geralmente montando na sua base uma cerâmica piezolétrica, pela qual passa voltagem de corrente alternada capaz de causar oscilação. A relação entre a oscilação da entrada e a do *cantilever* depende de sua frequência de oscilação ressonante. A oscilação do *cantilever* também depende da distância até a amostra. Em outras palavras, depende da força que age sobre ele, pois quanto mais perto da amostra, menor é a frequência de ressonância, isto é, o *cantilever* comporta-se como se a sua massa aumentasse com a proximidade da amostra. Ou seja, quando a ponteira se aproxima da amostra, sua força sobre a amostra causará uma mudança da frequência de ressonância. Esta variação de frequência, em fase ou amplitude, é utilizada na medição da força (e para controlar a realimentação).

Contato intermitente

Devido às forças utilizadas para varrer a ponteira em cima da amostra é possível que haja certos problemas quando da utilização do modo de contato, para certo tipo de amostras. Por exemplo, quando a ponteira toca na camada de contaminação forma-se um menisco e o *cantilever* é puxado contra a amostra pela tensão superficial. Como já vimos, esta força depende da ponteira, da amostra e da camada e é da ordem de 100nN. A força do menisco e outras forças atrativas podem ser neutralizadas operando com o sistema imerso em um líquido mas, às vezes este recurso não pode ser usado pois a amostra pode deteriorar-se. Também devemos levar em conta que grande quantidade de amostras de diferentes tipos podem capturar cargas superficiais, coisa que também contribui para aumentar a força entre a ponteira e a amostra. Então, existe uma força normal mínima que devemos poder controlar pois ela cria uma força de atrito assim que começa uma varredura. Na prática, estas forças de atrito podem ser bastante destrutivas.

O modo de *tapping* foi desenvolvido para atingir alta resolução sem induzir forças de atrito destrutivas.

Neste modo o *cantilever* oscila a quase sua frequência de ressonância com baixa amplitude. A ponteira pode permanecer na camada de contaminação ou sair de dentro dela, dependendo de sua espessura. Ela é aproximada da amostra até que começa um contato intermitente sobre a superfície o que causa uma redução da amplitude de oscilação. Esta variação é diretamente proporcional à distância média da ponteira à superfície. Em números, se a separação é da ordem de 10 nm, a amplitude de oscilação será aproximadamente 20 nm pico a pico. O sistema de realimentação mantém esta amplitude constante durante a varredura. Como o contato é apenas intermitente, as forças de atrito da ponteira sobre a amostra são desprezíveis e portanto não haverá danos. A amplitude de oscilação é fixada a valores suficientemente altos (10-100 nm) de forma tal que quando a ponteira toca a superfície o *cantilever* tenha suficiente força de restauração (devida a sua deflexão) para evitar que a ponteira fique presa na camada de contaminação devido às forças de menisco ou eletrostáticas. A força de *tapping* é menor do que se possa imaginar pois a amostra precisa apenas absorver a energia adicional que o *cantilever* ganha durante cada ciclo.

A realimentação se faz detectando as mudanças de amplitude. As imagens feitas neste modo dependem das forças da camada de contaminação e podem mudar quando a camada muda (isto é, devido a aquecimento da amostra, variações na umidade, na forma da superfície, etc.). É por isto que sempre é muito conveniente manter as condições ambientais do laboratório.

Não-contato

Ressonâncias de grande amplitude (HAR)

Neste modo o *cantilever* oscila em regime de força atrativa a sua frequência de ressonância, com amplitude muito alta. A amplitude das oscilações é suficientemente grande para que a ponteira entre e saia rapidamente da camada de contaminação. A força é atrativa. O *cantilever* é duro pois um *cantilever* mole iria “flamejar” sem controle a grande amplitude. A oscilação em ressonância, está dentro da faixa de 50-500 kHz, com amplitudes de centos de Å. A realimentação é por deslocamento de fase ou variação de amplitude.

Este modo pode ser usado para fazer imagens de amostras muito macias ou de amostras que não aderem muito bem ao substrato, já que as forças agindo sobre a amostra são muito menores que em contato.

Vejamos então, como se mede no modo que é realmente de não-contato, isto é, no qual a ponteira não toca a superfície da amostra.

Quando a separação entre a ponteira e a amostra é de 10 a 100 nm, permanecem só as forças de interação de longo alcance, isto, van der Waals, eletrostáticas e forças dipolares magnéticas.

Como a grandeza das forças de longo alcance, para separações relativamente grandes, é em geral muito menor ($\sim 10^{-12}$ N) que aquela das forças interatômicas de curto alcance ($\sim 10^{-8}$ N), o método de detecção da força de interação no modo de operação de não-contato é normalmente diferente do de contato. Em vez de medir as deflexões quase estáticas do *cantilever*, ele é obrigado a vibrar perto de sua frequência de ressonância por meio de um piezelétrico e, o que se mede, são as variações na frequência de ressonância que resultam da interação das forças entre a ponteira e a amostra.

Como dissemos, não-contato é preferível para amostras moles, assim como quando queremos preservar a integridade da ponteira após muitas varreduras. No

caso de amostras rígidas, as imagens de contato e não contato são as mesmas, a menos que haja uma grande camada de contaminação. Neste caso, as imagens podem ser muito diferentes. Quando operamos em contato atravessamos a camada de contaminação mas em não-contato, podemos estar fazendo a imagem da camada e não da amostra.

TRIBOLOGIA

O termo tribologia é relativamente novo e refere-se a todas as propriedades de materiais que têm a ver com interação de interfaces em movimento relativo. Estas propriedades em geral são diferentes quando se trata de materiais de tamanhos macroscópico e microscópico.

Existem na natureza fenômenos provenientes de movimento relativo que são muito importantes tanto para a indústria como para a pesquisa básica. Atrito, lubrificação de interfaces, desgaste resultante de asperezas microscópicas e adesão, são estes fenômenos do dia a dia que, quando ocorrem em escala nanoscópica, podem ser medidos com um AFM. Com estes microscópios podemos estudar propriedades mecânicas de superfícies, atrito em escala atômica, em superfícies limpas e também propriedades de atrito de superfícies recobertas com filmes moleculares. A importância da invenção do AFM para medidas de tribologia, reside em que ele tem a sensibilidade necessária para permitir a aplicação de forças fracas o suficiente para não produzir o deslocamento de átomos de sua posição, durante o contato. Nas pesquisas em escala nanométrica, é bom sempre ter em mente a ordem de grandeza da força que pode levar a ruptura das uniões químicas.

Os lubrificantes hoje em dia têm um papel muito importante na redução do atrito e do desgaste aumentando a eficiência das peças que compõe um circuito. Atualmente, os circuitos são lubrificados com filmes moleculares, isto porque em muitos casos, especialmente na indústria aeroespacial não é desejável e, às vezes é impraticável, a presença de lubrificantes líquidos.

Os processos químicos e físicos afetam o comportamento tribológico nas interfaces dos materiais e verifica-se que este comportamento, em escala microscópica, também é diferente daquele em escala macroscópica.

As duas maiores causas de desgaste de materiais são a quebra de junções adesivas e as deformações plásticas das asperezas da superfície. Também ocorre desgaste no processo descrito anteriormente quando a ponteira se tranca em um lugar e depois escorrega até outra posição de equilíbrio, o que requer uma força muito grande para vencer o atrito estático.

O atrito ocorre quando dois corpos em contato se põem em movimento relativo entre eles. As pesquisas em atrito microscópico são muito recentes. Há evidências que o atrito em escala atômica é devido a dois fatores distintos: um conservativo e periódico e outro constante, não conservativo, e na direção oposta ao movimento. Se o movimento relativo entre a superfície da amostra e a ponteira de AFM fosse simplesmente um movimento entre duas estruturas rígidas de átomos, a medida da força de atrito seria apenas uma força conservativa oscilando ao redor do zero. Uma deformação elástica lenta e reversível da amostra ou da ponteira poderia também contribuir para esta força conservativa. A origem das forças não conservativas e dependentes da direção poderia ser uma geração de fónons (energia de vibração da rede), histerese elástica, deformação plástica e/ou desgaste. Quando se realizam diversas varreduras com o AFM a força de atrito mantém-se invariável e o processo é reversível com a carga. Isto significa que para a maioria dos materiais é improvável que ocorram desgaste ou deformações plásticas significativas. Geração de fónons pode ocorrer de deformações elásticas

variáveis. Por exemplo, se a ponteira se tranca momentaneamente durante a varredura, quando ela se soltar resultará em uma propagação de ondas elásticas que produzirão um movimento vibratório da rede, isto é, uma geração de fónons responsável por forças de atrito não conservativas. Por outro lado, quando a ponteira se movimenta dentro de um vale, a amostra recebe energia da extremidade da ponteira. Uma parte de esta energia é devolvida à ponteira e faz com que ela continue o seu percurso. A perda de energia neste processo pode resultar, por exemplo, em instabilidade da ponteira que poderia escorregar sobre a superfície até achar outra posição de equilíbrio. Há ainda outro fator para uma variação no atrito nessas dimensões. Trata-se da variação das forças atrativas entre as duas superfícies. Tendo uma ponteira cuja extremidade é do tipo esférico, quando ela se aproxima de uma superfície, a grandeza das forças de van der Waals é inversamente proporcional ao quadrado da distância de separação. Como a superfície tem uma rugosidade característica, as forças de vdW serão mais fracas sobre a cima de uma rugosidade do que na profundidade de um vale. Esta variação pode também contribuir para o atrito. Podemos concluir então que o estudo de estes processos é bastante complexo.

A teoria de atrito é regida pelas leis de Amonton, que dizem que a força de atrito F_{at} é proporcional à força de carga F_c e independe da área aparente de contato:

$$F_{at} = \mu F_c ,$$

onde μ é o coeficiente de atrito.

Então, fora de medidas de força normal à superfície da amostra, por detecção da deflexão do *cantilever* nesta direção, é também possível estudar as forças laterais ou de atrito, detectando a torção causada ao *cantilever* pela varredura.

A descrição analítica do atrito dinâmico começou quando foi estabelecida a lei de Amonton; foi até inventada uma disciplina, chamada **mecânica de contato**. Com a construção dos microscópios de força, começou a ser possível o estudo e análise de superfícies em escala atômica, seja de materiais cristalinos, amorfos ou de sistemas orgânicos.

As pesquisas sobre **DUREZA** em filmes ultra-finos, isto é, da ordem de 10 a 30 nm são de interesse no que se refere a recobrimento com camadas de proteção, para aumentar a durabilidade, por exemplo, de discos magnéticos. Macroscopicamente, a dureza está determinada pela carga normal aplicada, dividida pela área superficial. A ponteira para indentar, deve penetrar apenas o 10% da espessura do filme para evitar qualquer influência do substrato. Para camadas de proteção de espessura da ordem de 30nm esta regra é muito importante, pois se ela não for seguida, corre-se o risco de estar medindo camadas internas da amostra e substrato.

As medidas de dureza em filmes ultra finos em escala micrométrica requerem aparelhos muito sensíveis pois a dureza do material não é só determinada pela grandeza das forças interatômicas, mas também pelos mecanismos de deformação utilizados. O valor da dureza pode variar também com os espaços vazios que o material possa ter, com as impurezas, defeitos, textura, etc. A ponteira usada para indentar deve não apenas penetrar na amostra alguns nanômetros, como também realizá-lo de uma forma que seja completamente reproduzível. Isto requer um controle de carga bastante rigoroso. A caracterização da dureza de filmes de menos de 100 nm só pode ser feita com um aparelho do tipo do AFM, já que com ele se tem a possibilidade de medir a área indentada diretamente. Conhecendo a constante de mola do *cantilever* e o movimento em z da amostra, temos a carga aplicada. O quociente entre a carga aplicada e a área de indentação, determina a dureza da amostra. As dimensões utilizadas para dureza são GPa (Pascal = Newtons/m²).

Os componentes importantes na técnica de medir dureza são os sensores de força e a ponteira, a qual deve possuir uma geometria apropriada para indentação e uma dureza maior que a da amostra a ser estudada. Por exemplo, para indentar filmes metálicos, as ponteiras de silício são recobertas com carbono ou, em geral, com compostos contendo diamante. Outro elemento que é muito importante nestas experiências é o sistema de posicionamento e localização, pois, uma vez indentada a amostra, é necessário achar exatamente o local da indentação para fazer a varredura. Uma técnica muito utilizada é fazer muitas indentações iguais em diversos locais da amostra para não ter o problema de localização.

Até recentemente, a indústria não tinha dado muita atenção à micro-rugosidade. Atualmente, o seu controle tornou-se importante devido ao necessário incremento da qualidade dos materiais.

MICROSCOPIA DE FORÇA ELETROSTÁTICA (EFM)

Quando duas superfícies entram em contato, em geral intercambiam cargas e, se depois se separam, ficam carregadas com cargas opostas. Isto se observa nos eventos mais corriqueiros do dia a dia, como quando passamos um pente no cabelo. Apesar disto, os fenômenos de triboeletrificação estão ainda por serem bem explicados.

O modo de não-contato pode ser usado para estudos não destrutivos da distribuição de cargas elétricas sobre superfícies, usando a ponteira para detectar as forças Coulombianas eletrostáticas, que são de longo alcance se comparadas com as de vdW.

Como resultado da interação atrativa entre a carga superficial local e a carga imagem induzida sobre a ponteira, o gradiente de força cresce na medida em que a ponteira é varrida sobre a superfície carregada.

Outro importante campo de aplicação do EFM é a feitura direta de imagens no espaço real dos domínios e das paredes dos domínios em ferroelétricos. A carga de polarização superficial σ_p associada à polarização ferroelétrica P induz uma carga imagem Q sobre a ponteira. Quando a ponteira passa sobre a parede do domínio a polarização P muda de sinal e passa por zero.

MICROSCOPIA DE FORÇA MAGNÉTICA (MFM)

Para amostra e ponteira magnéticas, quando a ponteira se aproxima da superfície da amostra dentro de uma distância de 10 a 500 nm, é possível perceber a interação magnética da ponteira com o campo que emana da amostra. Neste caso, é a força da interação magnética que determina a deflexão do *cantilever* que, por sua vez, é monitorada pelo sensor de deflexão do microscópio. A interação dipolar magnética de longo alcance é em geral testada usando o método de detecção de ac, ou seja, **mede-se o gradiente de força** e não a força dipolar magnética.

A separação completa dos contrastes magnético e topográfico pode ser conseguida, fazendo medidas da força e sua derivada, enquanto se faz a imagem topográfica.

Uma das grandes vantagens do MFM é que ela não requer uma preparação sofisticada da amostra. MFM em não-contato pode até ser feita na presença de camadas de contaminação em condições ambiente.